



**Podręcznik**

# ***Korek w lotnictwie: uprawa do zastosowania***

**ecoCORK**



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union

"Funded by the Erasmus+ Programme of the European Union. However, European Commission and Turkish National Agency cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein"

# Korek w lotnictwie: uprawa do zastosowania

*Redaktorzy* Selim Gürgen

Mehmet Alper Sofuođlu

Melih Cemal Kuşhan



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union

"Funded by the Erasmus+ Programme of the European Union. However, European Commission and Turkish National Agency cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein."

# Zawartość

<b>Przedmowa</b>	<b>i</b>
<b>1. Wprowadzenie do nauki o korku: uprawa, zbieranie i przetwarzanie korka</b>	<b>1</b>
1.1 Lasy korkowe	1
1.1.1 Opis botaniczny	4
1.1.2 Hodowla lasu/Agroleśnictwo	7
1.1.2.1 Regeneracja drzewostanu	7
1.1.2.2 Stoiska młodzieżowe	8
1.1.2.3 Dojrzałe drzewostany	8
1.1.3 Zrównoważone zarządzanie	9
1.1.4 Zagrożenia dla upraw	11
1.1.4.1 Choroby	11
1.1.4.2 Zmiany klimatyczne	12
1.2 Ekstrakcja korka	13
1.2.1 Proces paskowania korka	14
1.2.1.1 Intensywność usuwania korka	17
1.2.1.2 Wpływ na wzrost drzew	20
1.2.2 Operacje po żniwach	21
1.2.2.1 Przechowywanie w terenie	21
1.2.2.2 Zmienność zawartości wody	23
1.2.2.3 Przechowywanie na placu i przygotowanie do przetwarzania	23
1.2.2.4 Rodzaje surowego korka	25
1.2.2.5 Wymagania przemysłowe	28
1.2.3 Wady korka i implikacje	29
1.2.4 Klasyfikacja jakości desek korkowych	32
1.2.4.1 Klasy grubości	32

1.2.4.2 Klasyfikacja jakości	32
1.2.4.3 Zintegrowany wskaźnik wartości korka	34
1.3 Zabiegi po zbiorach	35
1.3.1 Gotowanie w wodzie	35
1.3.1.1 Jak gotowanie wpływa na korek	37
1.3.2 Proces po wrzeniu	38
1.3.3 Obróbka korka na mokro	39
1.3.4 Drugie gotowanie	39
<b>2. Zrównoważony rozwój, ślad węglowy i potencjalne produkty korka</b>	<b>46</b>
2.1 Korek i zrównoważony rozwój	47
2.1.1 Ekosystem korka	47
2.1.2 Usługi środowiskowe	50
2.1.3 Zrównoważone zarządzanie	53
2.1.4 Wpływ zmian klimatu na ekosystem korka	57
2.2 Ślad węglowy produktów z korka	58
2.2.1 Wprowadzenie do śladu węglowego	58
2.2.2 Wiązanie węgla w lasach	60
2.2.3 Cykl życia produktów z korka	64
2.2.4 Wartości śladu węglowego	67
2.3 Potencjalne zastosowania korka	68
2.3.1 Główne właściwości korka	68
2.3.2 Zastosowanie korka	75
2.3.3 Korek w budownictwie	76
2.3.4 Tekstylnia i mobilność	79
2.3.5 Farmacja i kosmetyki	81
2.3.6 Inne	82

<b>3. Sektory produktów z korka, właściwości korka i przyszłe trendy dla korka</b>	<b>90</b>
3.1 Wprowadzenie	90
3.2 Sektory produkcji korka	93
3.2.1 Aglomeraty korkowe do użytku ogólnego	95
3.2.2 Izolacja termiczna i akustyczna	97
3.2.3 Obudowa dźwiękochłonna	98
3.2.4 Struktury podobne do kanapek	100
3.2.5 Motoryzacja	104
3.2.5.1 Studium przypadku	105
3.2.6 Technologia pochłaniania energii	111
3.3 Wnioski	113
<b>4. Wytwarzanie i wdrażanie kompozytów na bazie korka w lotnictwie</b>	<b>119</b>
4.1 Przegląd kompozytów o strukturze warstwowej na bazie korka	119
4.1.1 Definicja i rodzaje kompozytów o strukturze warstwowej	119
4.1.2 Właściwości, zalety i wady najbardziej znaczących kompozytów o strukturze warstwowej na bazie korka w aeronautyce	121
4.1.3 Obszary zastosowania kompozytów o strukturze warstwowej na bazie korka w aeronautyce	124
4.2 Metody wytwarzania kompozytów o strukturze typu sandwich na bazie korka	129
4.2.1 Metody wytwarzania płaskich płyt warstwowych (sandwiczów)	129
4.2.1.1 Wytwarzanie płaskich płyt typu sandwich poddawanych mechanicznemu ściskaniu	129
4.2.1.2 Wytwarzanie paneli o strukturze warstwowej pod wpływem kompresji próżniowej	130
4.2.2 Proces produkcji paneli pojedynczo lub podwójnie zakrzywionych	132
4.2.3 Specyfika miejsca montażu płyt o konstrukcji typu sandwich	136
4.2.3.1 Wzmocnienie płyt o konstrukcji warstwowej w miejscach mocowania innych elementów konstrukcyjnych	136
4.2.3.2 Wzmocnienie płyt o konstrukcji typu sandwich w punktach mocowania innych elementów konstrukcyjnych przy skręcaniu tych elementów	137

4.2.4 Właściwości zamknięć krawędziowych płyt o strukturze typu sandwich	138
4.3 Zastosowania kompozytów korkowych w uszczelkach i innych materiałach uszczelniających	140
4.3.1 Najczęściej stosowane płyny w przemyśle lotniczym	141
4.3.2 Technologie uszczelniania płynów	142
4.3.3 Sprawdzone na przestrzeni czasu zastosowania korka w lotnictwie	144
4.4 Badania materiałów kompozytowych o strukturze typu sandwich z wypełniaczami korkowymi	145
4.4.1 Analiza widma materiałów kompozytowych o strukturze kanapkowej z wypełniaczami korkowymi	145
4.4.2 Stanowisko badawcze i warunki pomiarów	146
4.4.3 Wnioski z pierwszej analizy	151
4.4.4 Wnioski z drugiej analizy	152
4.5. Próba zginania kompozytów o strukturze typu sandwich na bazie korka	153
4.5.1 Próbkki	153
4.5.2 Przeprowadzanie prób zginania	156
4.5.3 Porównanie wyników i analiza	158
4.5.4 Próby rozciągania	159
4.5.5 Wyniki próby rozciągania	159
<b>5. Zastosowania kompozytów korkowych w lotnictwie i kosmosie</b>	<b>166</b>
5.1 Wprowadzenie	166
5.2 Ogólne właściwości kompozytów korkowych	169
5.2.1 Właściwości mechaniczne/fizyczne	170
5.2.1.1 Zmiany właściwości mechanicznych w zależności od temperatury	174
5.3 Aktualne zastosowania korka w zastosowaniach lotniczych i kosmicznych	176
5.3.1 Komponenty strukturalne z korkiem w zastosowaniach kosmicznych	178
5.3.2 Projekty dotyczące wykorzystania korka w konstrukcjach lotniczych: projekt Aerocork	183

5.4 Potencjalne zastosowania kompozytów korkowych w konstrukcjach lotniczych/kosmicznych	184
5.4.1 Korek i kompozyt na osnowie ceramicznej w zastosowaniach lotniczych/kosmicznych	184
5.4.2 Izolacje kosmicznego systemu startowego	185
5.4.3 Korek w misji na Marsa	187
5.5 Wnioski	188

## **Przedmowa**

Podręcznik ten powstał w ramach projektu finansowanego przez Unię Europejską w ramach programu Erasmus+ KA203: Partnerstwa strategiczne dla szkolnictwa wyższego. Projekt zatytułowany EcoCork: Educational Development for Sustainable and Eco-friendly Cork Composites in Aerospace Applications, (#2020-1-TR01-KA203-092763) jest prowadzony przez konsorcjum sześciu partnerów; Eskişehir Osmangazi University (Turcja), University of Aveiro (Portugalia), Amorim Cork Composites (Portugalia), Catalan Institute of Cork (Hiszpania), Politechnika Wrocławska (Polska) oraz Vilnius Gediminas Technical University (Litwa).

Ojczyzną korka jest Europa, a zwłaszcza Portugalia i Hiszpania. Z tego powodu produkty na bazie korka stały się powszechnie podzielaną wartością w Europie i tym samym przodują w nauce o korku, jednocześnie kształtując najnowocześniejszą technologię w tej dziedzinie. Korek, jako materiał naturalny, ma kilka zalet w różnych zastosowaniach inżynieryjnych. Zrównoważony rozwój i ekologiczne właściwości to najważniejsze zalety dla przyszłości naszej planety. Ponieważ przemysł lotniczy jest jednym z wiodących sektorów na świecie, w EcoCork zbadano korek pod kątem lotniczym.

Ten podręcznik zawiera szczegółową wiedzę na temat nauki o korku, od uprawy po zastosowania. W rozdziale 1 omówiono uprawę korka, zbiór i obróbkę korka. Rozdział 2 koncentruje się na zrównoważonym rozwoju i przyjaznych dla środowiska właściwościach korka. W rozdziale 3 omówiono produkty z korka, właściwości korka i przyszłe trendy korka. W rozdziale 4 omówiono wytwarzanie i wdrażanie wyrobów na bazie korka. W rozdziale 5 omówiono zastosowania produktów z korka w przemyśle lotniczym i kosmicznym.

Redaktorzy

Selim Gürgen

Mehmet Alper Sofuoğlu

Melih Cemal Kuşhan



# ROZDZIAŁ 1

## Wprowadzenie do nauki o korku: uprawa, zbieranie i przetwarzanie korka

GF Serra, FAO Fernandes\*, GJA Sousa, RJ Alves de Sousa, AB Pereira

Wydział Inżynierii Mechanicznej, Campus Universitário de Santiago, University of Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugalia

\*Korespondencja: fabiofernandes@ua.pt

### Abstrakt

Ten rozdział zawiera przegląd głównych aspektów nauki o korku. Opisuje podstawowe kroki, począwszy od specyfiki utrzymania, uprawy i pozyskiwania lasów korkowych, a na koniec kroki niezbędne do przekształcenia zewnętrznej kory w odpowiedni surowiec do opracowania produktów inżynierskich. W tym zakresie zostanie również omówiony wkład surowców na bazie korka w realizację niektórych celów zrównoważonego rozwoju (bezpieczniejsze miasta sprzyjające włączeniu społecznemu, zrównowazona produkcja i inne). Rozpoczyna się od zajęcia się wyzwaniami związanymi z uprawą i utrzymaniem lasów korkowych – różnymi typami drzew i lasów korkowych, planowaną uprawą w celu utrzymania dostępności materiałów i głównymi zagrożeniami. Następnie omówiono techniki i pielęgnację wydobycia korka – narzędzia, kwalifikacje człowieka, czas między wydobyciami oraz różne rodzaje i jakość wydobytego korka. Wreszcie, wykorzystanie korka jako surowca i jego obróbka, z uwzględnieniem różnych zabiegów i przekształceń niezbędnych, aby uczynić go odpowiednim surowcem do konstrukcji lub produktów.

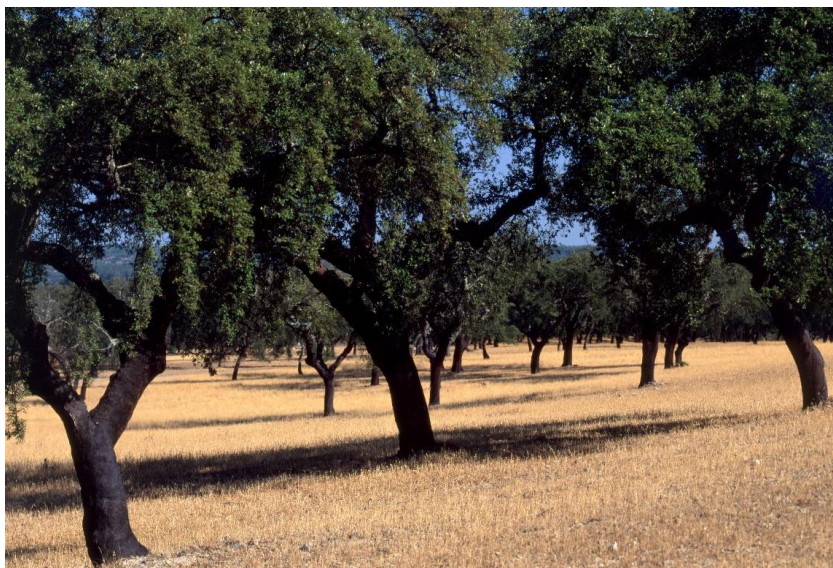
**Słowa kluczowe:** korek, las, surowiec, materiał inżynierski.

### 1.1 Lasy korkowe

Dąb korkowy lub *Quercus suber* L. – jego nazwa naukowa – to wiecznie zielony dąb o rzucającej się w oczy grubej i pomarszczonej korze, zawierającej ciągłą warstwę korka w swojej zewnętrznej części. Dąb korkowy osiągnął znaczenie gospodarcze ze względu na właściwości kory, estetykę i trwałość. Dęby korkowe można podzielić na dwa odrębne systemy rolno-leśne:

- Lasy dębu korkowego składają się ze stosunkowo rzadkich lasów – związanych z uprawami lub pastwiskami do wypasu bydła – z niewielką liczbą drzew na hektar (około 50–150 drzew na hektar). Ten system, przedstawiony na rysunku 1.1, jest określany odpowiednio jako montado i dehesa w Portugalii i Hiszpanii;
- Lasy dębu korkowego, gęstsze drzewostany w regionach górskich, nie pozwalają na rolnictwo pod dębami korkowymi.

Obecne dęby korkowe w stanie dojrzałym powstały głównie w wyniku gospodarowania przez właścicieli gruntów odnowieniami naturalnymi drzewostanów. Jednak w niektórych przypadkach wynikały one ze sztucznego wysiewu uzupełnionego odnowieniem naturalnym. Dlatego większość drzewostanów ma niejednorodny rozkład przestrzenny i nie jest w tym samym wieku.



Rysunek 1.1 Typowy krajobraz montado/dehesa (zdjęcie dzięki uprzejmości APCOR© [1]).

Ten półtolerancyjny gatunek jest dobrze przystosowany do klimatu łagodnego, takiego jak śródziemnomorski – z łagodnymi zimami oraz gorącymi i suchymi latami – oraz do gleb o niskiej żyzności. Lasy dębu korkowego odgrywają kluczową rolę ekologiczną w powstrzymaniu pustoszenia i erozji gleby, a także przyczyniają się do zachowania różnorodności biologicznej. Lasy dębu korkowego wspierają wyjątkową i delikatną ekologię, stanowiąc siedlisko rzadkich i zagrożonych gatunków, takich jak zagrożony wyginięciem orzeł cesarski (*Aquila adalberti*). Obok Amazonii, Borneo i afrykańskiej sawanny lasy korkowe są jednym z 36 najważniejszych ekosystemów na świecie dla zachowania różnorodności biologicznej, będąc domem dla ponad 200 gatunków zwierząt i 135 gatunków roślin [2].

Dąb korkowy wykazuje dużą plastyczność ekologiczną. Ma zdolność dostosowywania swojej fenologii i aktywności fizjologicznej do zmieniających się warunków środowiskowych, takich jak wysokie temperatury, a nawet scenariusze suszy. Optymalnie rośnie od poziomu morza do 600 m n.p.m.; jednak jest to możliwe do 2000 m. Jeśli chodzi o sezonowy rozkład opadów, jest on przystosowany do wyższych opadów w okresie od października do marca (jesień-zima) oraz bardzo małych lub zerowych opadów w okresie letnim. Idealny średni roczny opad wynosi 600-800 mm, ale minimum dla zrównoważonego rozwoju drzew powinno wynosić 500 mm. Niemniej jednak nadal przeżywa lata z niskimi opadami, np. poniżej 400 mm. Z drugiej strony, mimo że dopuszczalne są opady do 1700 mm, dąb korkowy jest podatny na zaleganie wody.

Idealna średnia roczna temperatura wynosi od 13 °C do 16 °C. Bezwzględna minimalna temperatura do przeżycia to -12°C, a minimalna średnia temperatura zimą to 4-5°C. Typowe letnie temperatury w basenie Morza Śródziemnego mogą sięgać ponad 40°C. Niemniej jednak ważnym aspektem jest dobra reakcja dębu korkowego na wzrost temperatury i optymalna temperatura 33–34°C w sadzonkach dębu korkowego [3]. Na ogół temperatury -5°C [3]. Ogólnie rzecz biorąc, temperatury około -5°C i 40°C można uznać za minimalne i maksymalne wartości graniczne. Gatunek jest również bardzo tolerancyjny w stosunku do gleb; jedynymi wyjątkami są podłoża kalcytowe i wapienne. Pozwala na pH w zakresie od 4,8 do 7,0 i najlepiej rośnie na dobrze przepuszczalnych glebach krzemionkowych i piaszczystych. Jednak wzrost na słabych glebach płytkich, ubogich w azot i materię organiczną jest nadal możliwy. Ponadto dęby korkowe są w stanie zapobiegać degradacji gleby i generować wysoki poziom różnorodności biologicznej. Dęby korkowe zwiększają zawartość materii organicznej w glebie, wyszukując składniki odżywcze w podłożu i zawracając je glebie poprzez upuszczanie liści i gałęzi, co zwiększa ich produktywność.

Lasy i lasy dębu korkowego rozciągają się w zachodniej części basenu Morza Śródziemnego (ponad 2 miliony hektarów). Dokładniej, na południowym Półwyspie Iberyjskim i północnej Afryce. Geograficzną reprezentację dębów korkowych przedstawiono na rysunku 1.2. Dęby korkowe występują również we Francji i we Włoszech. Według Heleny Pereiry [4] w latach 90. Portugalia miała ok. 713 tys. ha, Hiszpania ok. 475 tys. ha, Francja 68 tys. ha, Włochy 65 tys. ha, Maroko 348 tys., Tunezja 90 tys. mając 440 000 ha, prawdopodobnie zmniejszył się do około 230 000 ha.

W dwóch różnych regionach zidentyfikowano dwie grupy populacji dębu korkowego o odmiennej genetyce: jedną na Półwyspie Iberyjskim i pobliskich obszarach francuskich, a drugą w Afryce Północnej, Prowansji (Francja) i na wyspach Morza Śródziemnego (Sycylia, Sardynia i Korsyka). Pierwsza grupa wykazywała większą różnorodność genetyczną w swojej populacji i mniejsze zróżnicowanie między populacjami niż druga.



Rysunek 1.2 Geograficzne rozmieszczenie dębów korkowych: obszary zielone reprezentują rodzimy zasięg; krzyżyki oznaczają izolowane populacje, a trójkąty oznaczają obszary, gdzie *Quercus Suber* został wprowadzony i naturalizowany [5].

Portugalia i Hiszpania mają większe lasy dębu korkowego, będąc jednocześnie głównymi producentami wyrobów z korka. Portugalia ma największy obszar montado i obecnie przoduje w eksporcie wyrobów z korka, będąc największym producentem. Szacuje się, że rocznie wytwarza się około 374 000 ton wyrobów z korka, z czego większość pochodzi z Portugalii i Hiszpanii, które odpowiadają za 74% całości (odpowiednio 51% i 23%) [6]. Roczna produkcja może się różnić z powodu zjawisk klimatycznych lub klęsk żywiołowych. Na przykład w Portugalii pożary lasów w 2003 r. czy dotkliwa susza w 2004 r.

Oprócz *Quercus Suber* istnieją inne drzewa korkowe, takie jak *Quercus Cerris* i *Quercus Variabilis*. Ten ostatni pasuje do orientalnych klimatów i potocznie nazywany jest chińskim dębem korkowym [7]. Mikrostruktura korka z *Quercus Variabilis* jest podobna do tego z *Quercus Suber*, ale komórki są znacznie bardziej pofałdowane i zapadnięte. Komórki są zwykle mniejsze i występują w większej liczbie na jednostkę objętości, co skutkuje gęstszym rodzajem korka. Około 1,2 mln ha lasów składa się z Powstaje z niego *Quercus Variabilis* i około 50-100 kiloton przetworzonego korka. Niemniej jednak różnica w jakości jest znacząca. Korek z *Quercus Suber L.* prezentuje surowiec znacznie wyższej jakości. Dodatkowo wykazuje znacznie wyższy poziom jednorodności, co skutkuje deskami o większym wymiarze i regularności [8].

### **1.1.1 Opis botaniczny**

Uważa się, że gatunek, do którego należy dąb korkowy – rząd *Fagales* i rodzina *Fagaceae* – obejmuje ponad 40 odmian i ostatecznie dzieli się na cztery grupy: *subcrinita*, *macrocarpa*, *genuine* i *occidentalis* [9]. Występują również naturalne mieszańce między odmianami o podobnych systemach hodowlanych, takie jak krzyżowanie *Q. ilex* z *Q. suber* [10,11]. Wykazują różne formy botaniczne i mogą różnić się okresem kwitnienia, kształtem i rozmiarem liści (w tym kwiatów i owoców) oraz formą samego drzewa. Ogromna różnorodność pod względem morfologii i fenotypu jest w dużej mierze spowodowana przeszłym transferem materiału genetycznego z jednego gatunku do puli genów innego gatunku, znanym również jako hybrydyzacja introgresywna. Jakość korka i potomstwa jednego drzewa może wykazywać duże różnice w obrębie tej samej populacji drzew.

Dęby korkowe to drzewa o krótkich pniach i grubych gałęziach, osiągające maksymalnie 16 m wysokości. Drzewa rosnące w drzewostanach mniej zwartych mogą jednak mieć duże obwody pnia i wymiary korony (dochodzi do około 500 m<sup>2</sup> rzutu korony), zwłaszcza u drzew dojrzałych w wieku 150–200 lat. W drzewostanach zwartych drzewa mają zwykle węższe korony i wyższe pnie, ponieważ inne otaczające drzewa mają wpływ na ich rozmiary. Rys. 1.3 i Rys. 1.4 przedstawiają przykłady pojedynczego dębu korkowego i gęsto zalesionego obszaru. W wyniku przycinania w młodym wieku i jego ciągłości wiele obecnych dębów korkowych w zarządzanym montado ma inny kształt. Zwykle mają rozwidloną łodygę. Bifurkacja zaczyna się na małej wysokości, po której następują dwa lub trzy główne konary ustawione z otwartymi kątami w stosunku do pnia i okrągła korona ze spłaszczonym wierzchołkiem.



Rys. 1.3 Pojedynczy dąb korkowy o większej średnicy korony (zdjęcie dzięki uprzejmości APCOR© [1]).



Rysunek 1.4 Dęby korkowe na gęsto zalesionym obszarze (zdjęcie dzięki uprzejmości APCOR© [1]).

System korzeniowy gatunku jest dymorficzny, z silnym i długim korzeniem palowym oraz grubymi gałęziami bocznymi, które mogą wykazywać dużą ekspansję poziomą z licznymi powierzchniowymi korzeniami na drzewach rosnących w otwartym terenie. Główny korzeń może osiągnąć kilka metrów penetracji w głąb gleby. Świadczy to o zdolności dębów korkowych do docierania latem do głębokich warstw wodonośnych, co pozwala na utrzymanie wysokiego nawodnienia liści, a tym samym

utrzymanie ich rozwoju w okresach dużego zapotrzebowania na wodę i promieniowania [12]. System korzeniowy jest często związany z różnymi mikroryzami.

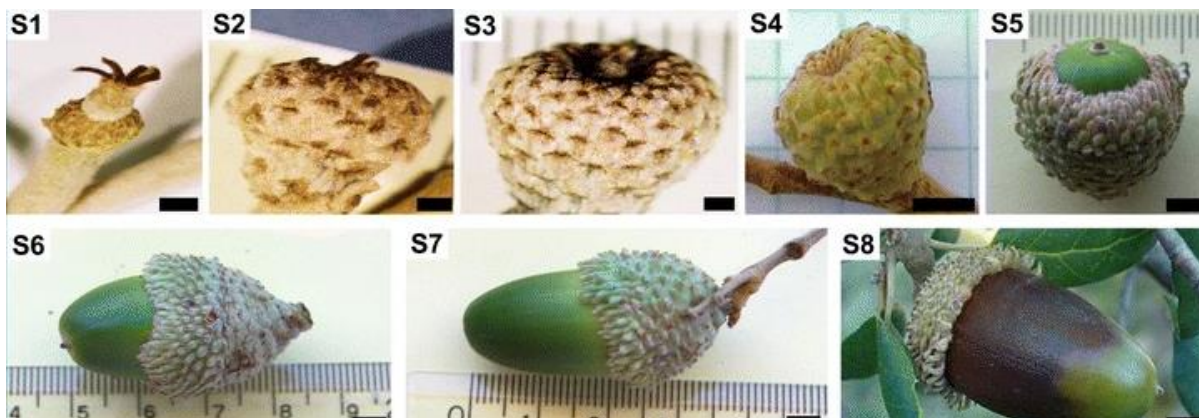
Pąki są ciemnofioletowe, jajowate i małe, o długości około dwóch milimetrów. Liście są ciemnozielone z gęstym białym pokwitaniem na dolnej stronie i gęstą siecią aparatów szparkowych z komórkami ochronnymi rozciągającymi się od płaszczyzny naskórka [13]. Kształt liści waha się od jajowatego do podłużnego z pomarszczonym lub falistym brzegiem. Długość i szerokość liści waha się odpowiednio od 4 do 7 cm i od 2 do 3 cm. Kształt i rozmiar liści różnią się znacznie między drzewami i baldachimem. Rysunek 1.5 przedstawia typowe liście dębu korkowego.



Rysunek 1.5 Typowe kształty liści (zdjęcie dzięki uprzejmości APCOR© [1]).

Fizjologiczna aktywność rozpoczyna się około lutego/marca wraz z rozwojem pąków. Jego wydłużanie i tworzenie nowych liści rozpoczyna się wczesną wiosną do czerwca. Liście przeżywają do około 14 miesięcy, w zakresie od 11 do 18 miesięcy [14,15]. Dlatego liście mają tendencję do opadania na wiosnę (chyba że wystąpią ulewne zimowe deszcze, prowadzące do szybszej defoliacji). Ze względu na sezonowość opadania liści wiosną w koronie drzewa nadal dominuje wyblakły kolor liści z poprzedniego roku, kontrastując z innymi gatunkami prezentującymi nowo pojawiające się liście. Kiedy dąb korkowy ma około 15-20 lat, rozpoczyna się owocowanie i kwitnienie (od kwietnia do końca maja). Zapylenie występuje wiosną i może wystąpić z pyłkiem z tego samego drzewa lub z sąsiednich drzew. W rezultacie potomstwo może znacznie różnić się od siebie.

Owoce dębu korkowego i żołądź, które można zobaczyć na rysunku 1.6, mają różne kształty i rozmiary — od mniej niż 2 cm do ponad 5 cm długości. Dojrzewanie żołądź może odbywać się w cyklach rocznych i dwuletnich [16]. W pierwszym przypadku okres wzrostu żołądź przypada na późne lato i jesień, osiągając pełną dojrzałość do listopada [17]. Jeśli chodzi o rośliny dwuletnie, mają one okres wegetacji z minimalnym wzrostem, po którym następuje okres intensywnego wzrostu wiosną drugiego roku. Na częstość tych ostatnich ma wpływ długość okresu wegetacyjnego, czyli skrócenie spowodowane intensywnymi i długimi letnimi suszami. Na dekadę drzewo zwykle ma od 2 do 3 lat wysokiej produkcji żołądź. Zimna pogoda w okresie kwitnienia może powodować szkody i przyczyniać się do znacznej międzyrocznej zmienności produkcji żołądź [18].



Rysunek 1.6 Etapy rozwoju żołądzi korkowych do dojrzewania (na podstawie [19]).

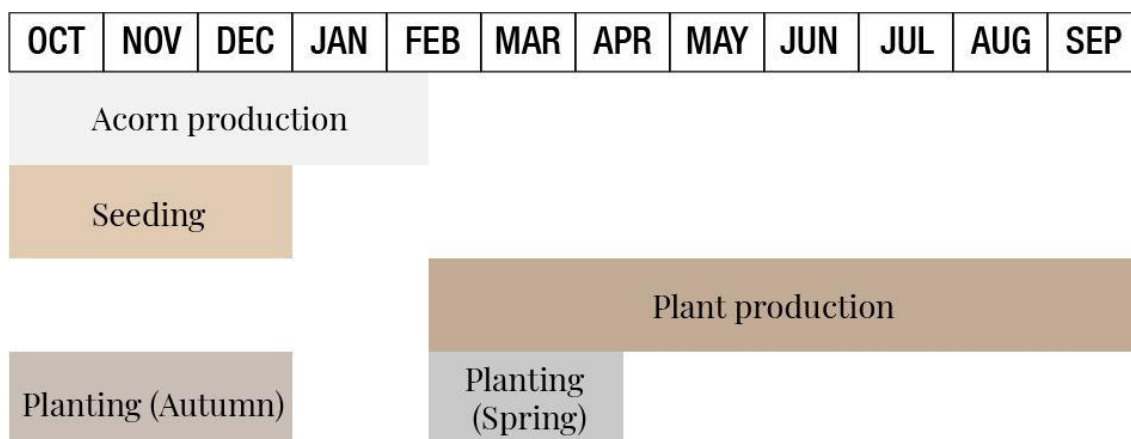
### ***1.1.2 Hodowla lasu/Agroleśnictwo***

#### ***1.1.2.1 Regeneracja drzewostanu***

Większość dębów korkowych jest wynikiem spontanicznej regeneracji kielkujących żołądzi. Sztuczna regeneracja drzewostanów dębu korkowego to stosunkowo nowa praktyka, która znacznie rozwinęła się w latach 90. XX wieku w wyniku polityki UE i zachęt do zalesiania odłogowanych gruntów rolnych. W ciągu ostatnich piętnastu lat w całej Portugalii i Hiszpanii zasadzono kilka tysięcy hektarów dębów korkowych, zarówno poprzez plantację, jak i bezpośredni wysiew. Jednak śmiertelność we wczesnych latach jest zwykle wysoka. Przyczyny są na ogół związane z brakiem odpowiedniej gleby lub jej przygotowaniem w celu stworzenia wydajnego systemu korzeniowego, krytycznego na lato; wrażliwość roślin na stres wodny w młodym wieku; a żołądzie i młode rośliny są bardzo apetyczne odpowiednio dla małych szczerów i bydła [20–22].

Przygotowanie terenu obejmuje odchwaszczanie, często wykonywane za pomocą brony talerzowej, oraz poprawianie właściwości gleby w celu ułatwienia rozwoju systemu korzeniowego. Techniki przygotowania mogą obejmować spulchnianie lub głęboszowanie na głębokość około 60 i 80 cm, zwłaszcza w glebach z twardych skał, lub orkę i kopanie wzdłuż konturów, a następnie głęboką orkę i/lub bronowanie talerzowe. Może obejmować cały obszar lub ograniczać się do linii nasadzeń. Zazwyczaj nawóz na bazie azotu, fosforu i potasu stosuje się w dawce 40–100 g na roślinę.

Możliwe sadzenie wiosenne lub jesienne sadzonkami wyhodowanymi w mateczniku i/lub siew. Diagram z rocznymi operacjami przedstawiono na rysunku 1.7. Liczba drzew sadzonych na hektar jest mniejsza niż w przypadku innych gatunków drzewiastych. Zalecane odstępstwa wynoszą około czterech metrów kwadratowych, aby zrównoważyć gęstość i koszty instalacji. Niemniej jednak stosuje się również szersze (8m x 4m) i gęstsze rozstawy (4m x 2m).



Rysunek 1.7 Coroczne wydarzenia związane z zalesianiem (na podstawie [23]).

Ze względu na dużą śmiertelność w pierwszych latach, roślinę uważa się za zdomowioną, gdy osiągnie wiek 8–10 lat. Chociaż uważa się, że ochrona młodych sadzonek pojedynczymi schronieniami drzew chroni je przed zgryzaniem i stymuluje początkowy wzrost wysokości, technika ta zaowocowała zwiększoną śmiertelnością i młodymi roślinami o cieńszych i słabo rozwiniętych łodygach w regionach o dotkliwej suszy i wysokich temperaturach [24]. Gdy wiosenno-letnie opady są niewystarczające, w okresach wzmożonego stresu należy zastosować nawadnianie dwu- lub trzykrotne. Zaleca się również pielienie w pierwszych latach po posadzeniu wokół pojedynczych sadzonek lub całego obszaru.

### ***1.1.2.2 Stoiska młodzieżowe***

Okres ten trwa od założenia drzewa do pierwszego wydobycia korka, co zwykle ma miejsce między 25 a 40 rokiem życia. Zwykle wystarczy 25 lat w krajach takich jak Portugalia i południowa Hiszpania. Dłuższe okresy są konieczne w przypadku obciążonych środowiskowo i gęstych drzewostanów.

Młode drzewa mają rozległe rozgałęzienia i często brakuje pędu wiodącego. W rezultacie wykonanie przycinania ma kluczowe znaczenie dla uzyskania czystego pnia o wysokości co najmniej 2,5–3 metrów. Zwykle wykonuje się trzy przycinanie: pierwsze w wieku od trzech do sześciu lat w celu usunięcia wszystkich gałęzi z pierwszych 2/3 pnia, następnie kolejne przycinanie w wieku od dwunastu do piętnastu lat, a na końcu przycinanie następujące po pierwsze zejście. Ze względu na dużą podatność dębów korkowych na konkurencję w pierwszych latach ich odchwaszczania należy dokonywać nie później niż w wieku 4–5 lat, a następnie co 3–4 lata do osiągnięcia wieku 10–15 lat.



### ***1.1.2.3 Dojrzałe drzewostany***

W dojrzałych drzewostanach najbardziej krytycznymi czynnościami hodowlanymi są trzebież i korowanie. Przerzedzanie odbywa się w celu uzyskania z góry określonego współczynnika odstępu. Współczynnik rozstawu definiuje się jako iloczyn średniej odległości między drzewami i średniej średnicy korony drzewa. Chociaż ta reguła empiryczna nie została potwierdzona eksperymentalnie ze względu na brak merytorycznych danych, ogólnie przyjmuje się, że nadmierna konkurencja między drzewami ogranicza produkcję korka. Dlatego zaleca się stosowanie współczynnika rozstawu, aby mieć dostępny odstęp niezbędny do swobodnego rozwoju korony. Podczas gdy niektórzy zarządcy lasów badają stosowanie nawozów między okresami korowania, mając na celu zwiększenie produkcji korka, skąpa literatura na ten temat wskazuje, że ma to niewielki wpływ na wzrost lub jakość korka.

Ponieważ żołądźce były ważną gospodarczo uprawą, przycinano dęby korkowe, aby poprawić plonowanie owoców. Ta praktyka jest nadal stosowana w celu poprawy żywotności drzew i plonu korka, co nigdy nie zostało udowodnione eksperymentalnie. W zależności od rodzaju uprawy można również przeprowadzić pielęgnację chwastów. Bardzo ważne jest, aby pielenie mechaniczne, podobnie jak inne, nie było szkodliwe dla powierzchniowej struktury korzeni dębów korkowych.

Dąb korkowy może żyć 250–350 lat. Jednak ich aktywność fellogenu spada wraz z wiekiem i grubością kory. Wymagana jakość korka dla żywotności przemysłowej kończy się po 150–200 latach. Dlatego dąb korkowy jest gatunkiem chronionym z dobrze zdefiniowanymi przepisami dotyczącymi prac hodowlanych, okorowania, wycinki i końca życia.

### ***1.1.3 Zrównoważone zarządzanie***

Cały łańcuch produkcji korka, od lasu do klienta, zależy od konsekwentnej i zrównoważonej produkcji korka, a tym samym od właściwego zarządzania lasami dębu korkowego. Zwłaszcza biorąc pod uwagę ogólne rozmieszczenie geograficzne i zasięg dębu korkowego. Według World Wide Fund for Nature (WWF) prawie 100 000 ludzi w południowej Europie i Afryce Północnej polega bezpośrednio lub pośrednio na tych lasach.

Lasy te stanowią model równoważenia ochrony środowiska i zrównoważonego rozwoju - fakt, że żadne drzewo nie jest ścięte podczas procesu usuwania korka, jest pierwszym pod względem zrównoważonego rozwoju. Rolnictwo dębu korkowego zapewnia szeroki zakres działalności leśnej, rolniczej, wypasu leśnego, łowiectwa i działalności gospodarczej. Sektor korkowy przoduje w tym zrównoważonym wzroście, utrzymując tysiące miejsc pracy i pozwalając rodzinom pozostać na swojej ziemi. Lasy dębu korkowego różnią się od innych systemów leśnych tym, że produktem nie jest drewno (łodyga) prowadzące do końca życia drzewa, ale kora, którą można zbierać wielokrotnie.

Wzrost korka, element krytyczny dla właścicieli lasów i podstawowy czynnik zarządzania, określa atrybuty surowca do przetwórstwa przemysłowego, biorąc pod uwagę, że korek jest ukierunkowany na

tworzenie zatyczek do wina, które wymagają minimalnej grubości desek. Wydajność produkcji korka zależy od wzrostu korka i drzew oraz zmiennych zarządzania, takich jak intensywność wydobycia korka, tj. W rezultacie inwentaryzacja lasów dębu korkowego wymaga uzupełnienia informacji o innych gatunkach drzew. Modele prognozowania produkcji korka są stosowane od dawna, ale modelowanie wzrostu i produkcji dębu korkowego w zarządzaniu drzewostanami opracowano dopiero niedawno.

Trwałość lasów dębu korkowego i łańcucha korkowego jest kwestią budzącą powszechne zaniepokojenie, biorąc pod uwagę ich krytyczne znaczenie w ochronie środowiska przed erozją gleby i pustynnieniem, a także w ramach społecznych i gospodarczych dotkniętych populacji i obszarów. Korek ma również znaczący wpływ społeczny i kulturowy oraz dziedzictwo, które wykracza daleko poza obszary wzrostu. Planowanie i certyfikacja zrównoważonego zarządzania dębem korkowym zyskały ostatnio na znaczeniu w tym kontekście.

Głównym źródłem obaw o trwałość lasów dębu korkowego są systemy montado i dehesa, które doświadczają braku lub niewystarczającej regeneracji [25]. Naturalna regeneracja rzadko występuje w tych rzadkich środowiskach, a obecne drzewostany są w dużej mierze dojrzałe i przestarzałe. Chociaż obfitość sadzonek może być zwykle widoczna wiosną w pobliżu starych dębów korkowych w wyniku kiełkowania żołędzi rozsianych po regionie, większość zginie w następnym roku. Młode sadzonki wymagają ochrony np. przed słońcem, co nie ma miejsca w tak otwartych, nasłonecznionych i nagranych środowiskach. Przeciwnie jest weryfikowane w gęstych lasach dębu korkowego, zapewniających idealne warunki do naturalnej regeneracji. Liczba młodych roślin jest w tych drzewostanach wysoka pomimo powolnego wzrostu spowodowanego konkurencją.

Niemniej jednak w tych warunkach powierzchnia lasów jest niewielka w porównaniu z zasięgiem systemów montado i dehesa. Aby zapewnić długotrwałą żywotność drzewostanów dębu korkowego, należy rozważyć odnowienie sztuczne poprzez wysiew lub sadzenie sadzonek uprawianych w szkółkach [23]. Zalesianie dębu korkowego było poważnym przedsięwzięciem w Portugalii i Hiszpanii, wspieranym przez zachęty Europejskiej Wspólnej Polityki Rolnej w ciągu ostatnich dwóch dekad. Po przygotowaniu gleby w ramach tych inicjatyw zalesiania sadi się drzewa w dużym zagęszczeniu wynoszącym około 600 roślin na hektar. Jednakże, chociaż przetrwanie nie zawsze jest zadowalające, pierwsze 5 do 8 lat ma kluczowe znaczenie dla sukcesu w zakładaniu drzew.

Innym zagrożeniem dla naturalnej regeneracji drzewostanów dębu korkowego jest jego wielofunkcyjność, szczególnie w odniesieniu do łańcucha pokarmowego. Na przykład młode rośliny, które przetrwały trudne letnie warunki, są zagrożone w obecności bydła. W takich przypadkach rolnictwo musi zostać zakazane w regenerujących się regionach, dopóki młode drzewa nie osiągną wieku dziesięciu lat i więcej.

Europa i reszta świata podzielają zaangażowanie w zrównoważoną gospodarkę leśną. Krytyczna rola lasów na planecie została uznana i rozwinięta w kolejnych rezolucjach międzynarodowych, w

szczególności ich wielorakie funkcje (społeczne, gospodarcze, środowiskowe i kulturowe), które przyczyniają się do zrównoważonego rozwoju społeczeństwa, zwłaszcza na obszarach wiejskich, produkcji dóbr odnawialnych i ochrony środowiska. Celowi, jakim jest zrównoważona gospodarka leśna, towarzyszy zestaw kryteriów i towarzyszących im wskaźników, które służą jako wytyczne do działań. Kryteria obejmują wszystkie obszary gospodarki leśnej i służą do oceny funkcjonowania gospodarki leśnej. Wskaźniki to ilościowe, jakościowe lub opisowe miary lub parametry, które regularnie mierzone lub kontrolowane ujawnią zmianę kryterium. Kryteria i wskaźniki na rys. 1.8 są spójne z kryteriami określonymi w paneuropejskich umowach dotyczących zrównoważonej gospodarki leśnej. Jest to priorytet ze względu na wrażliwe pod względem środowiskowym i społecznym obszary, na których występują lasy dębu korkowego. Ta koncepcja zaczyna kiełkować i rozwijać się na poziomie opinii publicznej i interesariuszy. Proces certyfikacji drzewostanów dębu korkowego na potrzeby zrównoważonej gospodarki leśnej dopiero się rozpoczął, a kilka spraw zostało już zakończonych.

Criteria	Indicators
1. Resources and carbon cycles	Forest area, Growing stock, Age structure, Diameter distribution, Carbon stock
2. Ecosystem health and vitality	Soil condition, Defoliation, Forest damage, Deposition of air pollutants
3. Productive functions	Increment and fellings, Services, Roundwood, Non-wood goods, Forests under management plans
4. Biological diversity	Naturalness, Tree species composition, Introduced tree species, Regeneration, Deadwood, Genetic resources, Landscape pattern, Threatened species, Protected forests
5. Protective functions	Soil, water and other ecosystem functions, Infrastructure, Managed natural resources
6. Other socio-economic functions	Forest holdings, Contribution to GDP, Net revenue, Expenditure for services, Occupational safety and health, Forest workforce, Trade in wood, Energy from wood, Accessibility for recreation, Cultural and spiritual values

Rysunek 1.8 Podsumowanie istniejących kryteriów i powiązanych wskaźników, które ustanawiają ramy dla zrównoważonej gospodarki leśnej (na podstawie [4]).

#### **1.1.4 Zagrożenia dla upraw**

##### **1.1.4.1 Choroby**

Niewiele poważnych chorób dotyka dębów korkowych. W literaturze dotyczącej dębu korkowego opisano ponad 300 gatunków grzybów i lęgniowców. Spośród nich co najmniej 100 jest patogennych [26]. Na szczęście tylko kilka pierwotnych infekcji jest w stanie zaatakować zdrowe drzewa. Większość z nich to patogeny oportunistyczne, które atakują tkanki dębu wcześniej naruszone przez przyczyny abiotyczne lub biotyczne [26]. Ostatnio kilka gatunków grzybów oportunistycznych zyskało większe zainteresowanie ze względu na ich zdolność do kolonizacji tkanek dębu jako endofity przez dłuższy czas bez powodowania objawów chorobowych [27]. Zdrowe drzewa zazwyczaj radzą sobie z tymi endofitami [28]. Jednak gdy stresory środowiskowe osłabiają drzewa, początkowo zawarte w nich grzyby są zdolne do kolonizacji sąsiednich tkanek, co prowadzi do stopniowego zamierania drzewa i jego ostatecznej śmierci [29]. Zwiększona częstotliwość i dotkliwość susz oraz rosnące temperatury sprzyjają najbardziej termotolerancyjnym patogenom dębu korkowego. W połączeniu ze stresem fizjologicznym wywołanym klimatem niektóre z tych patogenów powodują zamieranie i ostatecznie obumieranie dębów korkowych [30].

Zamieranie dębów jest często określane jako choroba wieloczynnikowa obejmująca różne oddziałujące na siebie czynniki abiotyczne i biotyczne (np. susza, mróz, szkodniki owadzie i patogeny), które różnią się pod względem rodzaju, intensywności, częstotliwości, a nawet w zależności od miejsca/regionu [31,32]. Wykazano jednak, że choroby z rodzajów *Diplodia* i *Phytophthora* istotnie wpływały na różne środowiska pod względem zamierania i śmiertelności dębów [33,34].

##### **1.1.4.2 Zmiany klimatyczne**

Globalne ocieplenie powoduje utratę lasów na całym świecie [35]. W Morzu Śródziemnym potwierdza to wzrost średnich temperatur i ogólny spadek rocznych opadów, które są coraz bardziej nieregularnie rozłożone w poszczególnych porach roku, co często skutkuje dłuższymi suszami [36]. Zmiana klimatu może potencjalnie wpłynąć na drzewostany dębu korkowego, zmieniając wzrost i śmiertelność drzew, a także produkcję i jakość korka [37,38]. Wykazano, że w szczególności susza i wysokie temperatury hamują wzrost korka [39]. Dostosowanie praktyk zarządzania lasami, takich jak optymalizacja harmonogramów wydobycia korka, obniżenie powierzchni korowania i zwiększenie zagęszczenia drzew, może zwiększyć produktywność korka w obliczu zmian klimatycznych [40]. Ze względu na wyjątkowość lasów dębu korkowego promowanie długoterminowych, zrównoważonych technik zarządzania i proaktywnych interwencji opartych na inicjatywach zalesiania w celu zachowania różnorodności biologicznej i usług ekosystemowych powinno się oceniać na poziomie lokalnym lub regionalnym [41].

Dąb korkowy nie jest jedyną rzeczą, na którą wpływają zmiany klimatyczne. Wpływa to również na wiele patogenów dębu korkowego, a także na sposób, w jaki te patogeny wchodzi w interakcje z żywicielem. Z drugiej strony zmiany klimatu mogą wpływać na różne patogeny w różny sposób, a literatura na temat adaptacji patogenów do klimatu jest wciąż ograniczona [42].

Istnieje wiele czynników, które wpływają na to, jak dobrze patogen może przetrwać i rozprzestrzeniać się. Należą do nich temperatura, opady, wilgotność względna, światło, wilgotność liści, wilgotność gleby, promieniowanie słoneczne, turbulencje powietrza i inne czynniki. Na południowym Półwyspie Iberyjskim, gdzie oomycete *Phytophthora cinnamomi* jest istotną przyczyną zamierania dębu korkowego, połączenie przedłużających się susz i pór deszczowych wraz z kiepską charakterystyką terenu (gleby nieurodzajne o niskim poziomie fosforu, słabo osuszone gleby) oraz przyjazne chorobom środowisko (np. drzewostany położone na południowym pagórkowatym terenie) stwarzają idealne warunki dla patogenu [31]. Biorąc pod uwagę obecne prognozy zmian klimatycznych, które obejmują wzrost średnich temperatur i wzrost częstotliwości występowania ekstremalnych zjawisk klimatycznych (np. suszy, powodzi i burz) w Europie, prawdopodobne jest rozprzestrzenianie się zgorzeli korzeni *Phytophthora*, co zwiększy niestabilność i podatność ekosystemów lasów dębowych [43].

Ponadto silny stres fizjologiczny zmniejsza żywotność drzew, czyniąc je bardziej podatnymi na pasożyty. W połączeniu z ciągłą suszą, patogennymi endofitami, takimi jak *Brevundimonas mediterranea*, zwiększone wskaźniki infekcji są związane z utratą dębu korkowego [32]. Ekologiczny wpływ grzybów xylariaceous na różne gatunki drzew leśnych wyraźnie wzrósł w regionie śródziemnomorskim w wyniku niezwykle suchych lat [6]. Potrzebne są dodatkowe badania, aby określić wpływ podwyższonych temperatur i suszy na specyficzne cechy gatunkowe i dynamikę populacji niektórych chorób dębu korkowego.

## **1.2 Ekstrakcja korka**

Ekstrakcja korka lub usuwanie korka to starożytny i ręczny proces polegający na cięciu dużych prostokątnych desek, które są następnie wyciągane z drzewa, co wymaga skrupulatnych i doświadczonych rąk, aby uniknąć uszkodzenia kory drzewa. Procedura wykorzystuje kruchość fologenu i świeżo rozwinięte warstwy komórek korka, aby usunąć korę z drzewa bez uszkodzenia wewnętrznej kory lub kambium. W rezultacie proces ten ma charakter czysto sezonowy, późną wiosną i wczesnym latem, co wymaga aktywności fizjologicznej dębu korkowego. Średnio dąb korkowy można ogolić 15 do 18 razy w ciągu swojego życia w odstępach 9-letnich, a pierwsze ogołocenie (korek dziewiczy) ma miejsce w wieku 25 lat. W wieku 34 lat uzyskuje się korek wtórny, a ostatecznie, w wieku 43 lat uzyskuje się korek reprodukcyjny, który posiada idealne właściwości do wykonywania najwyższej jakości zatyczek.

Proces rozbierania dębu korkowego składa się z pięciu etapów:

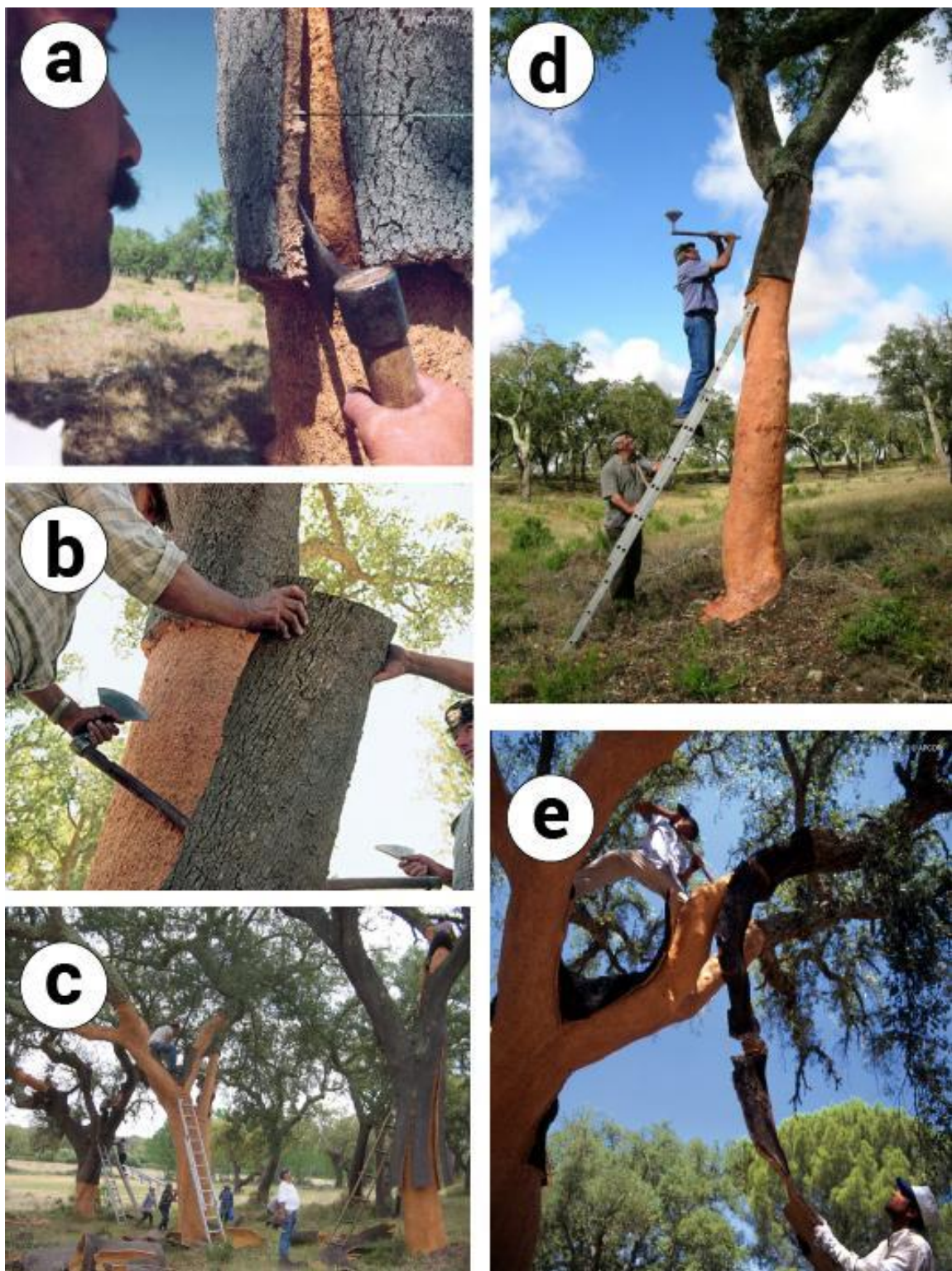
1. Otwarcia - Deska korkowa jest oddzielana od łyka poprzez cięcie jej pionowo wzdłuż najbardziej widocznego rowka za pomocą siekiery.
2. Oddzielenia - Deska jest oddzielana przez przekręcenie krawędzi siekiery między deską a łykiem.
3. Ciecicia - Poziome cięcie lub rysowanie określa rozmiar deski korkowej pobieranej z drzewa.
4. Ekstrakcji - Deska jest delikatnie usuwana z drzewa, aby się nie złamała. (Im większa deska, tym większa jest jej wartość handlowa).
5. Usuwanie odpadów - U podstawy drzewa pozostają fragmenty korka, które są wielokrotnie wbijane w celu wyeliminowania ewentualnych pasożytów.

Wymagania przemysłowe dotyczące surowca są określone przez specyficzne zastosowanie, które obecnie jest ukierunkowane głównie na produkcję zatyczek. Zatem wymagana jest odpowiednia grubość (tj. deski korkowe o minimalnej grubości 27 mm) i nie występują znaczące wady, takie jak poważne nieciągłości (tj. głębokie pęknięcia). Są to główne powody, dla których korek pierwotny i wtórny, otrzymane odpowiednio z pierwszej perydermy i pierwszej traumatycznej perydermy, nie są brane pod uwagę do produkcji zatyczek korkowych.

### ***1.2.1 Proces paskowania korka***

Wyciągnięcie kory następuje podczas aktywności perydermy, gdy komórki macierzyste phellogenu i nowo powstałe komórki phellemu są nabrzmięte, a ściany komórkowe cienkie i słabe. Najpierw należy przeciąć korę, a następnie chwycić i wyciągnąć. Łagodna siła w kierunku promieniowym wystarczy, aby oddzielić korę na poziomie strefy aktywnej phellogenu w tym stanie jest to możliwe. Czas wykonania tej operacji ma kluczowe znaczenie dla uniknięcia uszkodzenia leżącego poniżej łyka i kambium. W efekcie wydobycie korka ogranicza się do okresu szczytowej aktywności phellogenu, zwykle przypadającej na okres od połowy maja do początku sierpnia. Pogoda determinuje okres korowania, co może spowodować opóźnienie lub przewidywanie operacji. Jak widać po tworzeniu się pędów i liści, początki nowych wiosennych przyrostów są zazwyczaj oznaką fizjologicznej aktywności drzewa i warunkiem koniecznym do zaplanowania rozpoczęcia procesu korkowania. Jednym z powszechnych podejść jest ocena łatwości, z jaką można wydobyć korek z kilku dębów korkowych. Gdy nie można jej łatwo wydobyć, kory nie można usunąć konwencjonalnymi metodami; jeśli przyłożona siła jest nadmierna, może dojść do pęknięcia na poziomie kambium, powodując nieodwracalne uszkodzenie. Jednak ze względu na zmienność stanu fizjologicznego drzew w obrębie drzewostanu, możliwe jest, że niektóre drzewa nie będą dawały korka w trakcie operacji wydobycia korka, tj. drzewa, w wyniku częściowego porażenia korony. Znajomość zdzieraczy korka ma kluczowe znaczenie dla pomyślnego ukończenia operacji pod względem technicznym i dokonania niezbędnych osądów.

Obieranie korka odbywa się ręcznie. Zazwyczaj ekipa robocza składa się z dwóch osób jednocześnie odzierających to samo drzewo. Rysunek 1.9 ilustruje proces ekstrakcji korka. Do oddzielania desek korkowych używa się siekiery z zakrzywionym ostrzem tnącym i dość długim drewnianym ramieniem z rzeźbionym końcem. Proces usuwania korka rozpoczyna się od poziomego cięcia w poprzek obwodu drzewa na wysokości pierśnicy lub nieco wyżej, po którym następują dwa/trzy cięcia pionowe w zależności od obwodu drzewa. Cięcie wykonuje się poprzez wyważenie siekiery i dostosowanie siły tak, aby przecięła warstwę korka, ale nie wniknęła w wewnętrzną korę. Kolejne pociągnięcia tnące przebiegają po linii prostej lub wokół łodygi. Warstwa korka jest oddzielana poprzez włożenie ramienia siekiery w nacięcie i podważenie. Deska korkowa jest następnie wyjmowana. Pasek korka stykający się z glebą na dolnym końcu łodygi jest usuwany, pozostawiając czystą, odartą z powierzchni powierzchnię. Technikę powtarza się podobnie w górę pnia drzewa i głównych gałęzi, aż do osiągnięcia zdolności usuwania korka. Drabiny, pierwotnie wykonane z drewna, ale obecnie zwykle wykonane z aluminium, służą do uzyskiwania dostępu do najwyższych gałęzi drzewa. Usuwanie korka jest dość szybkim procesem, gdy jest wykonywany przez wykwalifikowanych pracowników, a zespół (2 elementy) osiąga średnio około 900 kg/dzień [4]. W przypadku dużych drzew z krótkimi pniami i kilkoma rozłożystymi grubymi gałęziami, usuwanie korka jest wykonywane przez kilka grup zdzieraczy korka, którzy muszą wspinać się po drzewie, stojąc na gałęziach, jak widać na rysunku 9c. Drzewa te produkują znaczne ilości korka, które ważą kilkaset kilogramów. Whistler, największy i najstarszy dąb korkowy w Portugalii, który w Księdze Rekordów Guinnessa jest również uważany za największy na świecie, ważący 102 tony, został ścięty w 2000 r., dając 650 kg korka, podczas gdy poprzednie zbiory korka w 1991 r. dał 1,2 tony [44].



Rys. 1.9 a) Topór przecina korę - linie poziome i pionowe; b) Ramię siekiery służy do wyciągania deski korkowej; c) Operacja oddzielania kory; d) Do rozbiórki górnej części wymagane jest użycie drabin; e) Obcinanie gałęzi (zdjęcia dzięki uprzejmości APCOR© [1]).



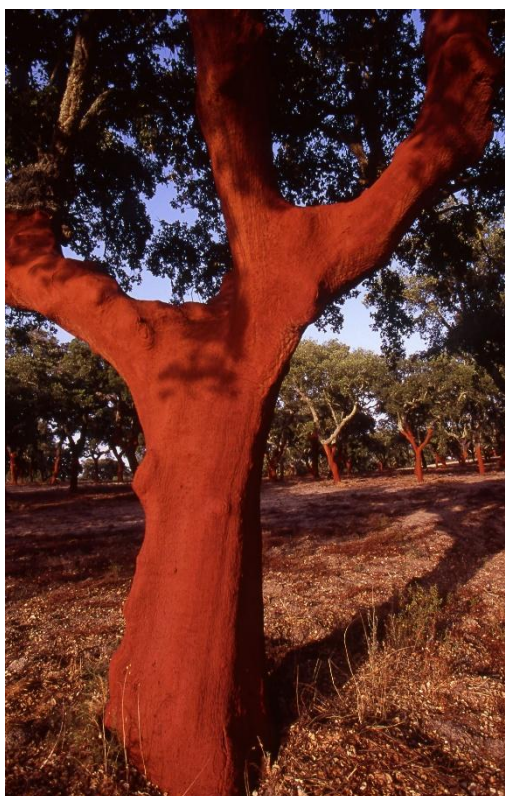


Rysunek 1.10 Ciągnik załadowany deskami korkowymi (zdjęcie dzięki uprzejmości APCOR© [1]).

Usuwanie korka jest wykonywane przez szeroką grupę pracowników, w większości wyspecjalizowanych w pozyskiwaniu korka, liczącą około 100 osób. Oprócz ściągaczy korka, grupy te składają się z kierownika i osób, które zbierają i transportują deski do centralnej lokalizacji, a także z osób układających je w stosy. Rysunek 1.10 pokazuje, w jaki sposób deski są zbierane z ziemi i ładowane na traktor.

Usuwanie korka to spektakularne wydarzenie zakorzenione w kulturowej i społecznej przeszłości tych regionów. Często pojawia się w rękodzielach, takich jak garncarstwo i ręcznie malowane kafle. Podejmowano próby zautomatyzowania procesu usuwania korka. Chociaż przetestowano bardziej złożone podejścia, takie jak użycie strumienia wody pod wysokim ciśnieniem lub wiązki laserowej, zostały one wykluczone ze względu na ograniczenia praktyczne lub finansowe. Dodatkowo zaproponowano do cięcia i przetestowano w warunkach polowych kilka mechanicznych pilarek ręcznych [45]. Chociaż ogranicza się to do pionowego i krótkiego usuwania łądy, wyniki są obiecujące pod względem precyzji cięcia i kosztów operacyjnych.

Natychmiast po usunięciu kory korkowej łądyga dębu korkowego wygląda na złocistobrązową i gładką. W ciągu następnych tygodni ciemnieje, ostatecznie osiągając ciemnoczerwono-brązowy kolor, gdy zewnętrzne tkanki łyka szybko wysychają, nadając łądydze szorstką teksturę, jak pokazano na rysunku 1.11. Po latach ekspozycji na warunki atmosferyczne łądyga staje się ciemnoszarawobrązowa i jeszcze bardziej szorstka z głębokimi bruzdami, które różnią się głębokością w zależności od rosnącej intensywności leżącej pod nią warstwy.



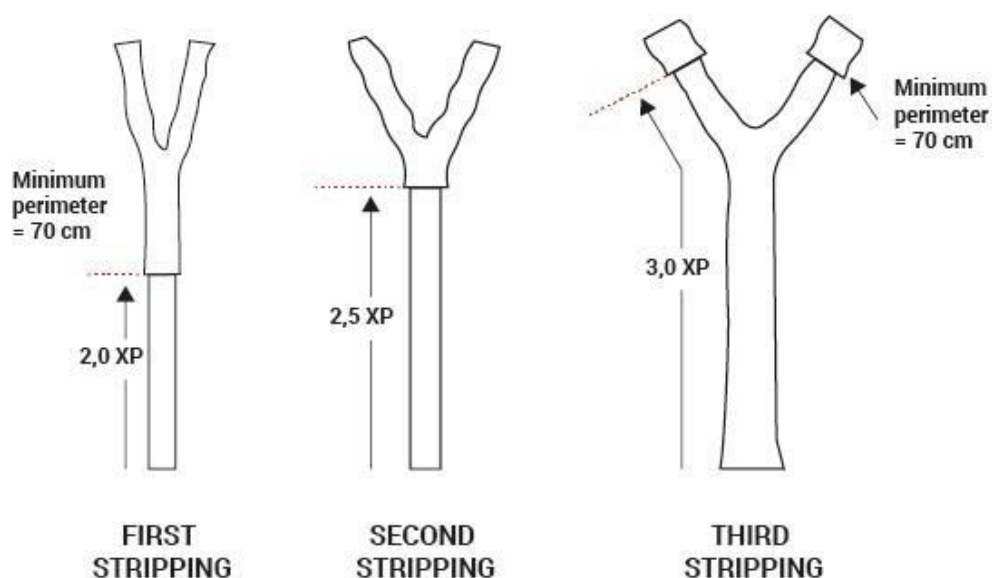
Rysunek 1.11 Wygląd pnia dębu korkowego po usunięciu korka (zdjęcie dzięki uprzejmości APCOR© [1]).

#### **1.2.1.1 Intensywność usuwania korka**

Intensywność zdzierania korka określa się jako powierzchnię usuniętej kory w stosunku do wielkości drzewa. Współczynnik korowania jest określony przez (Równanie 1.1) jako stosunek wysokości korowania do obwodu dębu korkowego w pierśnicy,  $pbh_{overcork}$  (na wysokości 1,3 m) [45]:

$$\text{Debarking coefficient} = \frac{\text{debarking height}}{pbh_{overcork}} \quad (1.1)$$

Przepisy prawa lub procedury dobrych praktyk ograniczają współczynnik korowania. W Portugalii maksymalny współczynnik korowania jest regulowany prawnie [4]. Zależy to od stadium rozwoju drzewa: odpowiednio 2,0, 2,5 i 3,0 dla pierwszego, drugiego i kolejnych wykrojów korkowych, jak pokazano na rysunku 1.12. Korka nie można wyciągnąć, dopóki drzewo nie osiągnie obwodu 70 cm (22 cm średnicy) na wysokości pierśnicy. Jest to również limit wydobycia w oddziałach. W Hiszpanii ograniczenie wynosi 60 centymetrów w obwodzie na wysokości piersi (19 cm średnicy). Gdy gałęzie są usuwane z dębu korkowego, wysokość okorowania obejmuje wysokość pnia i długość gałęzi mierzoną wzdłuż najdłuższej okorowanej gałęzi. Wiek produkcji zależy od wzrostu promieniowego. Jednak ogólnie przyjmuje się, że wymaganą średnicę osiąga się w wieku 20–25 lat w typowych scenariuszach wzrostu lub 30–40 lat w mniej sprzyjających środowiskach.

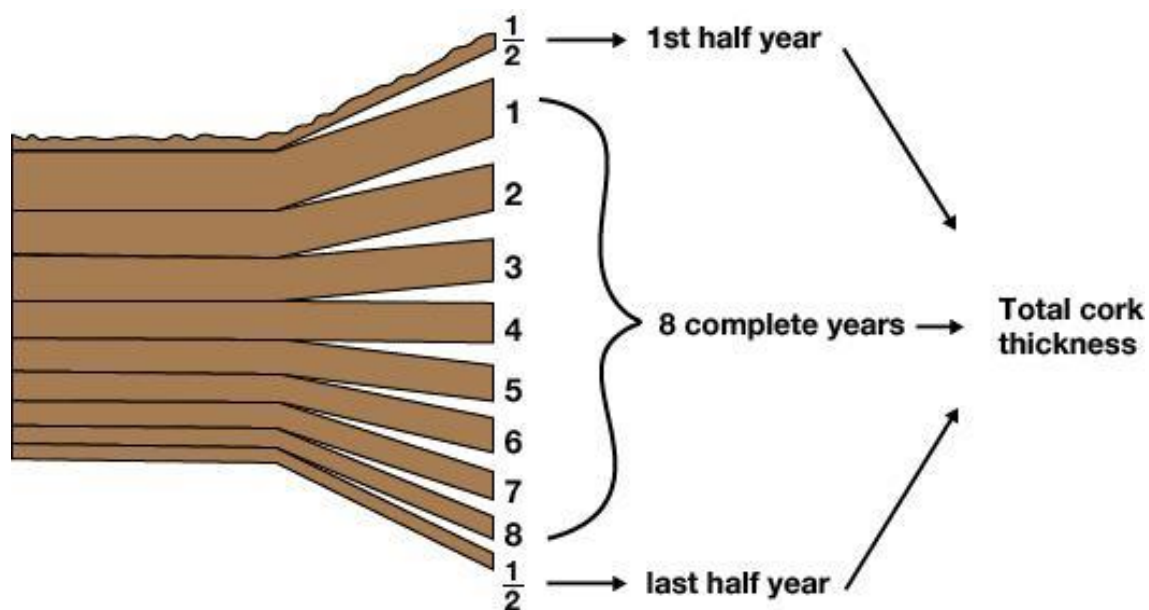


Rysunek 1.12 Trzy fazy usuwania izolacji w życiu dębu korkowego (na podstawie [46]).

Granice intensywności zostały ustalone na podstawie doświadczenia i empirycznego zdrowego rozsądku odnośnie procentowej powierzchni pnia i gałęzi, jaką drzewo może tolerować utratę perydermy bez nieodwracalnej utraty vitalności. Intensywność usuwania korka jest powiązana z częstotliwością ekstrakcji, określaną jako liczba lat między dwoma ekstrakcjami, określaną jako cykl produkcyjny. Nie są dostępne żadne badania mierzące wpływ czasu cyklu korka na wzrost drzew. Wzrost korka w całym cyklu został dokładnie zbadany i wydaje się, że czas trwania cyklu był podyktowany koniecznością osiągnięcia określonej grubości deski korkowej do późniejszego wykorzystania przemysłowego. W rezultacie czas trwania może się różnić w zależności od regionu, w zależności od średniego rocznego wzrostu korka. W większości Portugalii i południowej Hiszpanii grubość deski wynosząca około 3–3,5 centymetra jest zazwyczaj osiągnięta w ciągu dziewięciu lat. Jednak osiągnięcie takiej wartości w Katalonii, Hiszpanii czy południowej Francji zajmuje ponad piętnaście lat.

W Portugalii i Hiszpanii istnieje prawny limit dziewięciu lat na minimalny okres między ekstrakcjami. Wiek można określić, licząc słoje na przekroju poprzecznym korka, przy czym lata wydobywania liczy się jako pół roku, jak pokazano na rysunku 1.13.

Wydobywanie korka w drzewostanie może odbywać się jednocześnie na wszystkich drzewach – korek równowieczny – lub w podzbiorze drzew – korek nierównowieczny. W stojakach korkowych o nierównomiernym wieku ustala się dwie rotacje usuwania korka, zdzieranie korka z drzewa i stojaka, w zależności od liczby różnych wieków korka w stojaku. Aby pomóc w zarządzaniu lasami, rok pozyskania jest rejestrowany na drzewie poprzez pomalowanie na biało ostatniej cyfry na pniu po usunięciu korka – na przykład, jeśli drzewo zostało wydobyte w 2005 r., malowana jest cyfra 5, jak pokazano na rysunku 1.14. Obecna strategia zarządzania faworyzuje strefy zarządzania korkami o równym wieku i dwa lub trzy korki w dużych stoiskach.



Rysunek 1.13 Przedstawienie liczenia słoików na przekroju korka w celu określenia jego wieku (na podstawie [7]).

Dawniej stosowano również frakcjonowane usuwanie korka z pnia: w ciągu jednego roku korowano około połowy wysokości pnia, a pozostałą powierzchnię usuwano po 4-5 latach. W rezultacie jedno drzewo doświadczyło dwóch cykli korkowych rozdzielonych 3-5 letnim opóźnieniem. Ta praktyka jest obecnie zabroniona lub zdecydowanie odradzana, ponieważ powtarzające się cięcie tej samej części łodygi powoduje reakcje na rany, które tworzą pas wokół łodygi, co skutkuje złą jakością korka. Te dęby nadal są bardzo charakterystyczne dla środowiska Montado.



Rysunek 1.14 Wskazanie roku usunięcia korka (zdjęcie dzięki uprzejmości APCOR© [1]).

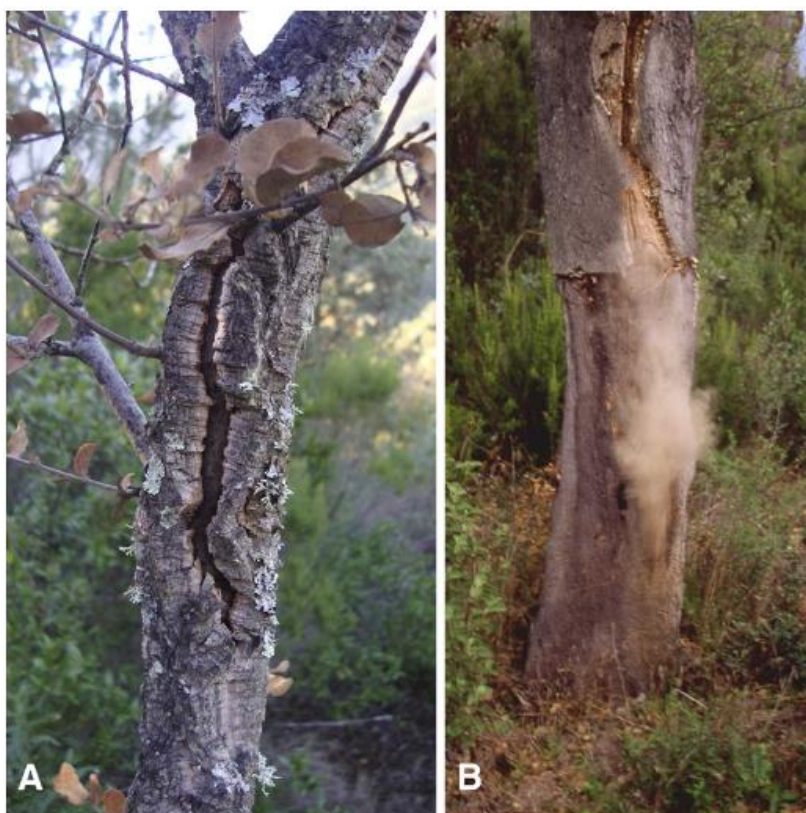
### 1.2.1.2 Wpływ na wzrost drzew

Uznaje się, że pracownik zajmujący się wydobyciem korka musi być wykwalifikowany i ostrożny, aby przeciąć korę bez uszkodzenia drzewa. Rzeczywiście, konieczne jest mocne i szybkie cięcie, w przeciwnym razie korek pochłonie większość energii, ale nie będzie tak silny, że przebije łyko lub kambium. Rany, takie jak powstałe w wyniku ekstrakcji korka, stanowią punkty wejścia dla infekcji i ataku biologicznego. Drzewo reaguje, tworząc modzele pojawiające się na łodydze, czasami dość wyraźnie, jako linia graniczna między ekstrakcjami we frakcjonowanym odpędzaniu. Zjawisku temu sprzyjają powtarzające się linie cięcia w dokładnym miejscu podczas kolejnego oddzielania. Produkcja korka zmniejsza się w strefach reakcji, a późniejsze usuwanie korka jest technicznie trudniejsze i wiąże się z większym prawdopodobieństwem zranienia. Wpływ uszkodzeń drzew spowodowanych kolejnymi wycięciami na ich wzrost analizowano w [47]. Ogólnie rzecz biorąc, rozwój promieniowy drzew został zmniejszony o około trzynaście procent w porównaniu z drzewami nieuszkodzonymi [47]. Produkcja korka spadła o czternaście procent, z wyraźnym skutkiem w ciągu dwóch lat po wydobyciu [47].

Badanie szkód spowodowanych usuwaniem i przycinaniem korka w czterech wybranych miejscach w regionie Estremadura w Hiszpanii wykazało znaczną częstość uszkodzeń (od trzydziestu jeden do czterdziestu siedmiu procent drzew) i godne uwagi podobieństwa między uszkodzeniami a dziurami spowodowane atakiem chrząszczy *Cerambyx* i późniejszą infekcją grzybiczą *Biscogniauxia mediterranea* (rys. 1.15) [48]. Konieczność zatrudniania wysoko wykwalifikowanych pracowników do usuwania korka, dezynfekcji narzędzi tnących między usuwaniem poszczególnych drzew oraz ścisłego kontrolowania operacji to powracające tematy w zarządzaniu dębem korkowym, ale nie zawsze są przestrzegane.

Usuwanie korka ma bezpośredni fizjologiczny wpływ na drzewo. W miejscu usunięcia korka dochodzi do większej utraty wody w wyniku transpiracji łydy, a aparaty szparkowe szybko zamykają się w kolejnych godzinach (np. brak aktywności aparatów szparkowych po 24 godzinach), co powoduje zakłócenie procesów odżywiania i powrót do normy dopiero po 24–30 dniach. W tym przedziale czasowym tworzy się traumatyczny felogen i tworzy się kilka warstw komórek korka, chroniąc aktywne łyko przed utratą większej ilości wody. Ponieważ proces ten wymaga znacznego zużycia rezerw, aktywność kambium naczyniowego spada, a wzrost drewna ustaje w tej fazie. Istnieje niewiele wyników badań dotyczących wpływu usuwania korka lub jego nasilenia na wzrost promieniowy drzewa. Ze względu na trudność w obserwowaniu słoików rocznych dębu korkowego nie jest możliwe prześledzenie, w jaki sposób usuwanie korka wpływa na dalszy wzrost za pomocą analizy krążków łydy. Wydaje się jednak, że kiedy drzewo zaczyna wytwarzać korek, zmienia się anatomia drewna: mniejsze komórki o grubszych ścianach, więcej włókien i mniej miąższu, elementy drewna rozmieszczone nieregularnie bez charakterystycznego stopniowego przejścia od drewna wczesnego do późnego [48]. Odnotowuje się również zmniejszenie przyrostu drewna dojrzałych drzew w ciągu dwóch lat po usunięciu korka (około piętnaście procent w dziewięcioletnim cyklu

produkcyjnym) [49]. Jednak usunięcie korka nie zmniejszyło ogólnego promieniowego wzrostu drzewa u bardzo młodych drzew rosnących w sprzyjających warunkach [13].



Rysunek 1.15 Dąb korkowy *Biscogniauxia mediterranea*: a) Charakterystyczne, czarne stromaty przebijające się przez korę; b) sporulujący rak na dolnym pniu (zdjęcie z [43]).

## ***1.2.2 Operacje po żniwach***

### ***1.2.2.1 Przechowywanie w terenie***

Zdzieracze korka pozostawiają usunięte deski korkowe na ziemi. Następnie zostaną one zebrane traktorem i ułożone w stos na podwórku. Na stromych terenach z ograniczonym dostępem deski korkowe są transportowane za pomocą traktora pasowego lub mułów (w Hiszpanii).

Tworzenie pali to skrupulatny proces, rozpoczynający się od wybrania terenu (płaski, suchy i łatwo dostępny drogą). Deski korkowe dopasowują się do kształtu łądygi (zakrzywione - tył korka skierowany w stronę wypukłą). Są one układane jeden na drugim, z korkiem skierowanym do góry i starannie układane, aby utworzyć prostą i solidną zewnętrzną ścianę stosu za pomocą desek o regularnych kształtach. Deski o nieregularnych kształtach i mniejsze układane są we wnętrzu stosu. Wymiary pali są różne, ale zazwyczaj mają 8 – 10 metrów szerokości, 2 – 2,2 metra wysokości i 30 – 50 metrów długości. Rysunek 1.16 i rysunek 1.17 przedstawiają kilka przykładów. Stos jest układany natychmiast po przybyciu desek ze stojaka. W rezultacie zawiera deski korkowe o różnej grubości i jakości, ponieważ nie dokonano jeszcze segmentacji. Wyraźne stopy są zbudowane w całości z desek korkowych (minimalna powierzchnia 400 cm<sup>2</sup>), oprócz korka pierwotnego i wtórnego.

Mistrzowie układania korka to wykwalifikowani profesjonalści, którzy układają stos wiedząc, że potencjalni nabywcy go obejrzą. Rzeczywiście, komercjalizacja korka i uzgodnienie ceny następuje po oględzinach stosu. Podczas gdy okazy z rdzenia stosu są czasami pobierane przed złożeniem oferty, widoczne deski odgrywają znaczącą rolę. Cena ustalana jest według wagi, ze standardową jednostką wagową 15 kg. Wymagane jest jednak dodatkowe uzgodnienie ilości wody zawartej w korku i związanego z tym rabatu wagowego, jak określono w następnej sekcji. Czas przechowywania w terenie jest różny i może trwać kilka tygodni lub ostatecznie nawet rok. Decydują o tym w dużej mierze ustalenia między producentem a klientem, a często logistyka w zakładzie przemysłowym określa czas odbioru korka. Niedawno wyeliminowano składowanie w terenie i układanie stosów, a deski korkowe są dostarczane bezpośrednio na plac przemysłowy po usunięciu korka. Aby jednak osiągnąć doskonałe dojrzewanie i stabilizację, korek musi być pozostawiony na zewnątrz po rozebraniu. Międzynarodowy Kodeks Praktyk Zatyckich Korkowych (CIPR) ustanowił ściśle wytyczne dotyczące tego kroku, w tym układania desek pod materiałami niezanieczyszczającymi przez co najmniej sześć miesięcy [50].



Rysunek 1.16 Zbieranie desek w terenie (zdjęcie dzięki uprzejmości APCOR© [1]).



Rysunek 1.17 Stos desek (zdjęcie dzięki uprzejmości APCOR© [1]).

### ***1.2.2.2 Zmienność zawartości wody***

Korek prezentuje zawartość wilgoci podczas usuwania. Można się tego spodziewać, biorąc pod uwagę aktywność fellogenu i jędrność komórek w tym miejscu. Po usunięciu, deski korkowe zawierają około 25% wody, ale różni się ona znacznie w zależności od próbki, od zawartości procentowej niższej niż 10% do wyższej niż 50% [51].

Deska korkowa jest wilgotna w środku i wysycha na krawędziach. Po oddzieleniu od łądygi, najbardziej wewnętrzna warstwa korka o grubości 1 mm jest przezroczysta, jak można się spodziewać po bibułce wypełnionej wodą. W momencie ekstrakcji korek ma niższą zawartość wody niż drewno zebrane podczas pozyskiwania (wilgotność ponad 50%). Powodem jest niska higroskopijność korka i długi okres schnięcia zewnętrznych warstw perydermy w obecnym cyklu korka. W temperaturze pokojowej deski korkowe szybko tracą wodę. Po około dziewięciu dniach deski korkowe ułożone w stosie powinny mieć mniej niż 14% zawartości wody i można je uznać za suchy korek dostępny w handlu. W pełni zrównoważony korek ma poziom wilgoci od 6 do 10%. Przechowywanie w stosach polowych nie wpływa na szerokość słoików korka ani na porowatość desek korkowych.

Przy negocjacjach sprzedaży stosu korka cena jest zwykle uzgadniana (po zważeniu). Korek noszony zaraz po usunięciu lub wkrótce potem ma 20% zniżki na zawartość wody, co zwykle jest przedmiotem ożywionej debaty. Można oszacować rzeczywistą zawartość wody i obliczyć stosunek wody do masy korka. Przy zawartości wilgoci 25% w momencie usuwania, 14% po dziewięciu dniach i 10% po miesiącu, 100 kg suchego korka (0% wilgoci) waży odpowiednio 125, 114 i 110 kg. Sugeruje to, że „obniżka” wagi spowodowana wodą wyniosłaby (a) w odniesieniu do absolutnie suchego korka, 20, 12,3 i 9,1% korka zważonego odpowiednio po dziewięciu dniach i jednym miesiącu oraz (b) dotyczące korka suchego na powietrzu (metoda powszechna) o wilgotności 10%, 10%, 2,3 i 0% korka zważonego po rozpruciu, odpowiednio po dziewięciu dniach i jednym miesiącu.

### ***1.2.2.3 Przechowywanie na placu i przygotowanie do przetwarzania***

Tradycyjnie zakłady przemysłowe mają na swoich terenach znaczną powierzchnię na świeżym powietrzu przeznaczoną do przechowywania surowców korkowych. Miejsce przechowywania desek korkowych lub obszar stabilizacji ma niewielkie nachylenie i jest cementowane, aby zapobiec gromadzeniu się wody deszczowej blisko gruntu. Ten środek ostrożności ma na celu uniknięcie rozwoju drobnoustrojów lub zanieczyszczenia desek korkowych, które mogłyby wprowadzić lub uwydatnić spleśniałe smaki. Producenci zwracają baczną uwagę na ten problem, ponieważ plamy z zatyczek korkowych i nieprzyjemne zapachy w winie są krytycznymi kwestiami jakościowymi.

Stosy desek korkowych na placach, pokazane na rysunku 1.18, mogą być ułożone w sposób regularny (taki sam sposób jak stosy polowe) lub bardziej losowo, jeśli zostaną wzniesione bezpośrednio po rozładunku ciężarówki, jak na rysunku 1.19. W młynie zachowuje się pochodzenie surowców, a stosy



magazynowe są oddzielane zgodnie z ich pochodzeniem, co jest pierwszym krokiem w kierunku śledzenia korka w procesie przemysłowym.



Rysunek 1.18 Deski regularnie składowane na placu (zdjęcie dzięki uprzejmości APCOR© [1]).



Rysunek 1.19 Deski na placu po rozładunku z ciężarówki (zdjęcie dzięki uprzejmości APCOR © [1]).

Czas przechowywania jest w dużym stopniu zależny od wymagań procesu przemysłowego w zakresie przepływu surowców. Historycznie rzecz biorąc, przeprowadzano przedłużone okresy do dwóch lat, a następnie skracano je do jednego roku, i uznano je za konieczne do chemicznej i strukturalnej

stabilizacji desek korkowych. Podobnie jak w przypadku dużej liczby norm empirycznych, ta również nie ma podstaw naukowych. Kolejne operacje gotowania w wodzie skutkują strukturalnym rozluźnieniem naprężeń, podczas gdy suszenie wewnętrznych warstw korka i utlenianie powietrzem produktów przemiany materii odbywało się w terenie, pamiętając, że te ostatnie są ograniczone do kilku warstw komórek blisko do fellogenu. Obecnie dobre praktyki urzędowe zalecają okres przechowywania wynoszący sześć miesięcy. Jednak surowiec jest często przetwarzany przy krótszych okresach przechowywania ze względu na czynniki ekonomiczne i logistyczne związane z sezonowością produkcji korka i niezwykle wysokimi kosztami surowców. Czas przechowywania nie ma wpływu na zmiany szerokości pierścienia korka, porowatości korka i właściwości mechanicznych zatyczek korkowych [52] – to ostatnie badanie dotyczyło czasu trwania od zera do sześciu miesięcy.

Przygotowanie do obróbki przemysłowej odbywa się na placu składowym i polega na zebraniu desek korkowych na palety w celu wygotowania ich w wodzie. Podczas tej procedury deski o ewidentnie skrajnie niskiej jakości są oddzielane i określane jako odpadowe surowe deski korkowe, a także deski korkowe z wtrąceniami pleśni i żółtymi plamami. Kilka desek z najniższej części pnia dębu korkowego ma kołnierz korkowy umieszczony w ziemi na styku korzeni drzewa, zwanym stopką. Ta sekcja jest wycinana z deski na wysokości około dwudziestu centymetrów, aby uniknąć ataku drobnoustrojów z gleby. Procedura ta rozpoczyna się również w terenie przed budową pała.

#### ***1.2.2.4 Rodzaje surowego korka***

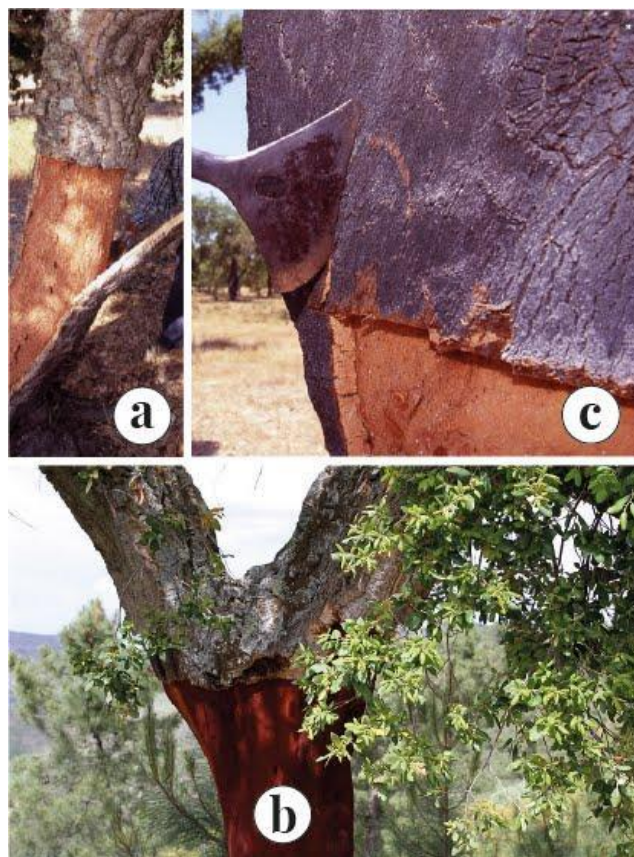
Dziewiczy korek, utworzony w pierwszej perydermie dębu, można zobaczyć na młodych drzewach, takich jak ten przedstawiony na rysunku 1.20a, przed pierwszym wydobyciem korka lub na nieosłoniętych gałęziach dojrzałych dębów korkowych. Tak więc pierwsze wydobycie korka w wieku 25 lat daje w rezultacie korek pierwotny. Ze względu na nierówną strukturę i nadmierną twardość korek ten nie nadaje się do produkcji zatyczek korkowych. Ten korek jest również używany do różnych celów, takich jak podłogi i izolacja.

Po wstępnej ekstrakcji korka nowa uszkodzona peryderma rozwija się aż do późniejszej ekstrakcji (korek wtórny). To drugie usuwanie ma miejsce dziewięć lat po poprzednim i skutkuje mniej sztywnym korkiem o bardziej jednolitej strukturze, co widać na rysunku 1.20b. Jednak korek wtórny często wykazuje głębokie pęknięcia, co czyni go również bardziej odpowiednim do aglomeratów, jak również do stosowania w budownictwie i innych produktach. Korek reprodukcyjny, przedstawiony na rysunku 1.20c, zawiera się w następnej perydermie – gdy drzewo ma około 43 lat – jak również we wszystkich innych, które mogą rozwinąć się później. Jest to surowiec, który przemysł wykorzysta do produkcji zatyczek. Dąb korkowy będzie produkował doskonały korek co dziewięć lat od tego momentu przez mniej więcej półtora wieku.

Korek dziewiczy pozyskuje się z młodych drzew, które dopiero co zaczęły rodzić drzewa dojrzałe, których korek może być zdejmowany z większej wysokości ze względu na rozrost promieniowy

drzewa. W takiej sytuacji pasek dziewiczego korka umieszcza się w najwyższej części pnia aż do osiągnięcia pożądanej granicy wysokości.

Rysunek 1.21 przedstawia młode drzewo po usunięciu korka, z widocznymi granicami między wydobyciem korka: pierwotny korek znajduje się w górnej części, drugi korek z następnego dolnego obszaru i odsłonięta wewnętrzna kora w pozostałej dolnej części pnia.



Rysunek 1.20 Trzy rodzaje surowego korka: a) korek pierwotny (zdjęcie dzięki uprzejmości APCOR© [1]); b) korek wtórny (fot. Gerd Eichmann [53]); c) korek reprodukcyjny (zdjęcie dzięki uprzejmości APCOR© [1]).



Rysunek 1.21 Na tej łodydze można zwizualizować, od góry do dołu, pierwotny korek, korek wtórny i odsłonięty florogen po usunięciu korka (zdjęcie z [54]).

Korek pierwotny można również uzyskać z przyciętych gałęzi lub młodych drzew, które zostały usunięte podczas przeredzania. Ponieważ dęby korkowe są przycinane zimą, warstwa korka mocno przylega do wewnętrznej kory. Korek jest usuwany ręcznie za pomocą małej siekiery lub mechanicznego urządzenia do korowania. Korek uzyskuje się w obu przypadkach w kawałkach o wielkości od kilku centymetrów do dłuższych pasków (około 20 centymetrów), chociaż zawiera znaczną ilość kory wewnętrznej. Ta odmiana korka nazywana jest drewnem korkowym (znanym również jako korek zimowy). Surowiec ten ma niższą wartość przemysłową, ponieważ po zmieleniu musi zostać dokładnie oczyszczony w celu usunięcia masy drzewnej z granulatu korkowego.

W tabeli 1.1 podsumowano możliwe rodzaje korka (surowca), które można uzyskać z eksploatacji tych drzew, wraz z jego głównymi cechami i zastosowaniami przemysłowymi.

Tabela 1.1 Rodzaje korka uzyskanego z eksploatacji dębów oraz ich odpowiednia charakterystyka i zastosowanie (na podstawie [3]).

	Origin	Characteristics	Main use
Virgin cork	First cork extraction of young trees	It contains deep fractures and a distorted structure	Trituration for agglomerates
	Increase of cork stripping height from stem and branches during the juvenile and first age of mature trees		
	From branches of pruned felled trees (obtained manually with an axe)	It contains a large portion of inner bark and wood. (Also called winter cork)	Trituration for expanded agglomerates
Secondary cork	Second cork extraction	It contains deep fractures	Trituration for agglomerates
Reproduction cork	From third extraction onwards	May be obtained either by stripping of the standing tree or by axe removal after felling. In the latter, it contains portions of inner bark	Planks for production of stoppers
	Under-aged cork from tree fellings		Refuse, pieces and very thin planks for trituration for agglomerates

#### 1.2.2.5 Wymagania przemysłowe

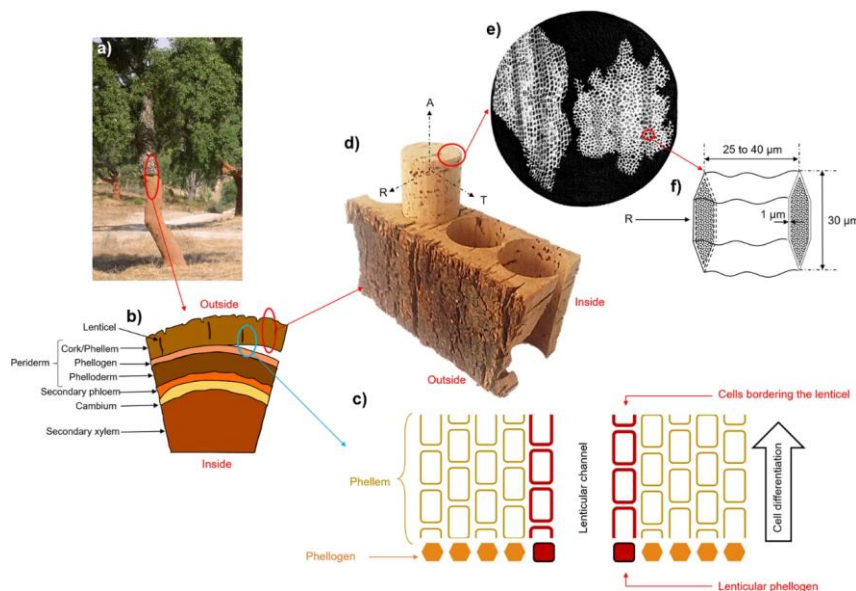
Przemysł wytwarza różnorodne towary o różnym stopniu zaangażowania korka i transformacji technologicznej. Jednak ekonomiczna wykonalność całego sektora jest definiowana głównie przez produkcję korków z naturalnego korka, głównie do butelkowania wina. W dzisiejszych czasach przydatność korka jako surowca do tego zastosowania w dużej mierze determinuje jego wartość handlową i cele zarządcy lasu.

Krytyczną zmienną przy określaniu przydatności surowca do obróbki jest grubość deski. Dlatego potencjalny klient przemysłowy często zwraca baczną uwagę na rozkład grubości desek korkowych podczas kontroli przym polowych. Grubość desek uzyskanych z różnych drzew w obrębie tego samego drzewostanu oraz pomiędzy drzewostanami w obrębie tego samego regionu jest bardzo zróżnicowana. Decydującym czynnikiem jest frakcja desek korkowych o odpowiedniej grubości (minimum dwadzieścia siedem milimetrów) do produkcji stoperów. Cieńsze deski są używane do produkcji krążków korkowych do zatyczek technicznych, takich jak te stosowane w butelkach szampana.

Grubość deski zależy od warunków środowiskowych, genetyki drzewa i długości cyklu korka: grubsze warstwy korka uzyskuje się przy dłuższych przerwach między ekstrakcjami. Jest to zmienna zarządzania, którą leśnicy mogą wykorzystać do optymalizacji wartości produkcji z uwzględnieniem wymagań przemysłowych. Dodatkowo zwraca się uwagę na jakość desek korkowych pod względem jednorodności tkanki korkowej. Nadmierna porowatość spowodowana kanałami soczewkowatymi, widoczna na rysunku 1.22, oraz inne nieciągłości, takie jak pęknięcia lub chodniki po owadach, znacznie zmniejszają wydajność i jakość produkcji zatyczek, co może skutkować odrzutami jakościowymi. W takiej sytuacji deski takie traktowane są jako odpady i przetwarzane na granulaty korkowy do produkcji aglomeratów korkowych.

Wymiary surowych desek korkowych różnią się w zależności od wielkości drzewa i czynników eksploatacyjnych związanych z odzieraniem dębu korkowego. Są mniej więcej prostokątne, o wysokości 1–1,8 m i szerokości 0,4–0,8 m. Deski korkowe użyte do wykonania stoperów miały średnią wysokość 1,19 m i szerokość 0,47 m, co dało średnią powierzchnię 0,37 m<sup>2</sup> [47]. Porównywalne wymiary desek korkowych przeznaczonych do produkcji krążków wykazały średnią wysokość 0,75 m i szerokość 0,35 m, co daje średnią powierzchnię 0,19 m<sup>2</sup> [56]. Kawałki o powierzchni mniejszej niż 400 cm<sup>2</sup> nie mieszczą się w kategorii desek i są układane oddzielnie w celu wykorzystania do produkcji granulatów.

Po ugotowaniu w wodzie deski korkowe klasyfikuje się według ich grubości i jakości. Podstawowym kryterium jest jego przydatność do produkcji zatyczek.



Rysunek 1.22 Kanały soczewkowate przecinające warstwę korka: (a) dąb korkowy po zbiorach; (b) przekrój dębu korkowego; (c) Region fellogenu z różnicowaniem komórkowym. (d) Produkcja zatyczki korkowej z kory (A – kierunek osiowy, R – kierunek promieniowy, T – kierunek styczny). Możliwe jest obserwowanie kanałów soczewkowatych wyrównanych z kierunkiem promieniowym; (e) Pierwsza obserwacja komórek korkowych przez Roberta Hooke'a w 1665 r. (f) Typowy kształt i wymiary komórek korkowych (z [55]).

### 1.2.3 Wady korka i implikacje

Porowatość spowodowana kanalikami soczewkowatymi, naturalna i ważna cecha fizjologiczna umożliwiająca komunikację między żywymi komórkami drzewa a środowiskiem zewnętrznym, nie może być uznana za wadę. Jednakże, gdy jest w nadmiarze, jak wyjaśniono wcześniej, może pogorszyć jakość desek w taki sposób, że nie można ich już używać do zatyczek, ponieważ może zwiększyć przepuszczalność płynów, a tym samym zanieczyścić wino lub spowodować wycieki.

Czasami korek zawiera również cechy pochodzenia biologicznego lub zewnętrznego, które korelują z wadami konstrukcyjnymi i mają pewien wpływ na jakość surowca w zależności od ich rodzaju i ilości.

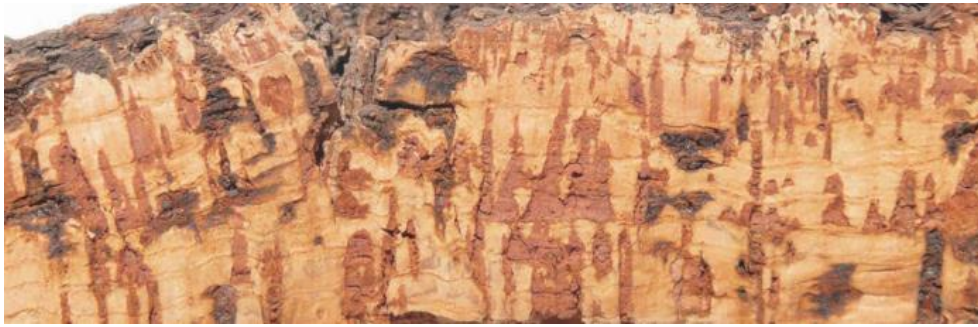
Można je sklasyfikować w następujący sposób :

- Korytarze dla owadów: dąb korkowy może być atakowany przez owady, które rozwijają chodniki w tkance korka (warstwa felogenu), jak pokazano na rysunku 1.23. Mrówki – najpowszechniejszy to *Crematogaster scutellaris* Oliv. – zamieszkują w korze dębu korkowego i wykopują kanały biegnące przypadkowo przez deski. Poza okazjonalnymi zanieczyszczeniami, takimi jak cząsteczki piasku, odchody owadów, strzępki grzybów, chodniki są całkowicie puste [57]. Ponadto coleopterony (*Coroebus undatus* F) składają jaja w szczelinach korka, a larwy, które dorastają do sporych rozmiarów trzech centymetrów, żywią się fallogenem. Te obszary, które zostały zaatakowane przez takie owady, nie nadają się do produkcji zatyczek.



Rysunek 1.23 Galerie owadów spowodowane przez mrówki (zdjęcie z [58]).

- Gwoździe: defekt znany jako „gwoździe”, przedstawiony na rysunku 1.24, polega na obecności w tkance korka zdrewniałych komórek, o grubych ścianach, często prawie bez otwartego światła i lignocelulozowym składzie chemicznym. Występują one w wyniku braku aktywności niektórych komórek fellogenu, co prowadzi do regeneracji nowej porcji fellogenu. Z tego powodu charakteryzują się większą ciągliwością, gęstością i niską elastycznością [6].



Rysunek 1.24 „Gwoździe” w desce korkowej (zdjęcie z [58]).

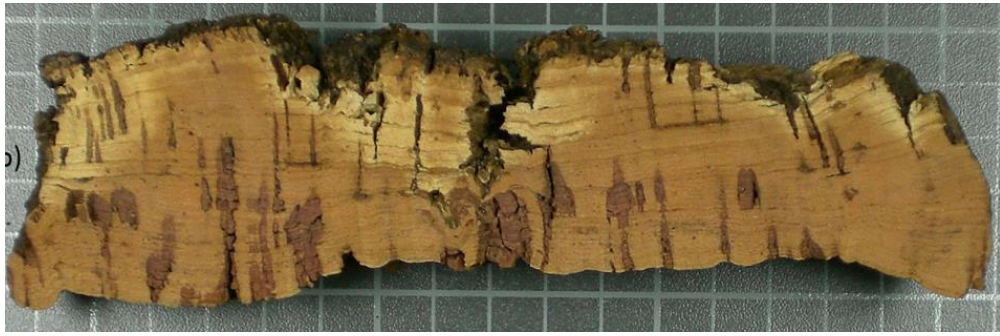
- Bruzda głęboka: głęboka bruzda może wystąpić na grzbiecie deski, jak pokazano na przykładach na rysunku 1.25. Biegają pionowo, penetrując tkankę korka. Linie rowków wskazują na uszkodzenie tkanki w wyniku naprężeń stycznych wzrostu i dlatego są bardziej rozpow szechnione w drzewach o wysokim promieniowym tempie wzrostu (typowym dla wtórnego korka).



Rysunek 1.25 Deski z głęboką bruzdą (zdjęcie z [58]).

- Plamy: na deskach mogą pojawiać się plamy, takie jak żółte i marmurowe, będące wynikiem ataków drobnoustrojów. *Armillaria Mellea*, saprofityczne podstawczaki, które rosną na glebie i materiałach lignocelulozowych, powodują żółte plamy, jak widać na rysunku 1.26. Komórki korka chronią drzewo przed inwazją patogenów. Korek szarzeje, a otaczające tkanki wykazują biało-żółte przebarwienia i wyraźny zapach pleśni. Ekstrakty polarne zastępują ligninę i polisacharydy w składzie chemicznym korka. Przebarwienie występuje częściej bliżej gleby u podstawy łodygi. W rezultacie barwione korki nie są używane do produkcji zatyczek do wina. Jeśli chodzi o plamę marmuru, atak grzyba (*Melopia opiospora Sacc*) powoduje niebieskawe zabarwienie korka w warstwach zewnętrznych i wokół kanalików soczewkowatych. Poza miejscem perforacji ściana komórkowa korka pozostaje nienaruszona, a strzępki nie wpływają na właściwości korka [57]. Z takiego korka nie robi się zatyczek korkowych. Zamiast tego może znaleźć wartość dodaną do celów dekoracyjnych ze względu na losowy rozkład plam podobny do marmuru i ciemne linie konturowe.





Rysunek 1.26 Przykład żółtej plamy na kawałku korka (zdjęcie z [59]).

- **Mokry korek:** Jest to wada korka, która powoduje wyjątkowo wysoki poziom wilgotności (400-500%) i której przyczyna jest nieznana. Jednak Natividade [6] sugeruje, że jest to spowodowane utratą nieprzepuszczalności komórek, co z kolei wynika z nieprawidłowego odkładania się suberyny w warstwach wtórnych ścian komórkowych. Wada ta występuje głównie w najświeższych warstwach rocznych, przylegających do spodu desek oraz w rejonie przylegającym do nasady pnia. Główną wadą jest nadmierny skurcz, jakiego doznaje korek w dotkniętym obszarze po wyschnięciu (czasem nawet prowadzący do zapadania się komórek), co pogarsza jego właściwości uszczelniające i stabilność wymiarową; dlatego nie nadaje się do produkcji zatyczek [60]. Przykład mokrego korka w desce korkowej można zobaczyć na rysunku 1.27.



Rysunek 1.27 Przykład deski dotkniętej mokrym korkiem (zdjęcie z [58]).

#### ***1.2.4 Klasyfikacja jakości desek korkowych***

##### ***1.2.4.1 Klasy grubości***

Grubość desek jest podstawowym aspektem decydującym o ostatecznym zastosowaniu naturalnego korka, mającym wpływ na jego przetwarzanie przemysłowe i handel. Podejście przemysłowe polega na klasyfikacji desek korkowych według ich grubości, jak określono w normach i zilustrowano w tabeli 1.2.

Tabela 1.2 Klasy grubości desek stosowanych w przemyśle korkowym (na podstawie [4]).

Comercial class	Thickness (mm)
Extra thin	9 - 22
Thin	22 - 27
Half standard	27 - 32
Standard	32 - 40
Large	40 - 54
Extra large	>54

Klasy zostały stworzone z myślą o możliwości dalszego przetwarzania. Klasy grubości najbardziej odpowiednie do produkcji korków to 27-32 mm, dlatego producenci korka dążą do produkcji desek korkowych w tym zakresie grubości. Grubość deski korkowej zależy od długości cyklu produkcyjnego korka i rocznego tempa wzrostu korka. W największych ośrodkach produkcji korka 9-letni cykl produkcji korka jest wystarczający do zaspokojenia zapotrzebowania na podstawowe surowce przemysłowe.

Całkowita grubość deski jest mierzona od brzucha do tyłu. Dlatego przy określaniu przydatności przemysłowej deski należy wziąć pod uwagę zewnętrzną warstwę tylnej części. Chociaż ceny różnią się znacznie między klasami kalibru desek korkowych, generalnie cena desek (za kilogram) w zakresie 27-32 i 32-40 milimetrów jest taka sama i służy jako wskazówka dla innych klas. Ceny desek w przedziale 22-27 milimetrów to prawie 1/2 tej wartości referencyjnej, minus 1/3 ceny desek cieńszych niż 22 milimetry i blisko 2/3 desek w przedziale grubości 40-54 mm.

#### ***1.2.4.2 Klasyfikacja jakości***

Deski korkowe są komercyjnie podzielone na wiele klas w zależności od ich jakości. Ta wizualna kontrola części poprzecznych i promieniowych deski korkowej oraz jej powierzchni dolnej służy do określenia jej jakości. Pierwszy parametr jakości jest związany z porowatością zapewnianą przez kanały soczewkowe, które różnią się liczbą, ale przede wszystkim obszarem. Wysokiej jakości deska zawiera minimalną ilość kanałów soczewkowatych. Po drugie, obecność wad i ich potencjalny wpływ na przetwarzanie. Klasyfikacja pojedynczej deski korkowej opiera się na zintegrowanym pojęciu potencjalnej wydajności w wysokiej jakości elementach z naturalnego korka, takich jak zatyczki i krążki.

Deski korkowe są klasyfikowane na podstawie ich jakości na 6 klas (od 1 do 6) oraz dodatkową klasę odpadów. Ocena jest ręczna i w dużym stopniu zależy od operatora. W grę wchodzi zatem wysoki stopień subiektywności, a klasyfikacja może się różnić w zależności od operatora. Chociaż powszechne i łatwe jest rozróżnienie między korkiem bardzo dobrym a fatalnym, nie dotyczy to korka

średniej jakości. W rezultacie istnieją znaczne różnice między klasyfikacjami ustanowionymi przez różnych ekspertów. Badanie z wykorzystaniem katalogu referencyjnego 480 próbek korka sklasyfikowanych przez pięciu niezależnych specjalistów [61] wykazało jedynie 5,3% korelacji w klasyfikacji poszczególnych próbek (ale przy 100 % zgodności pod względem jakości górnej i dolnej – 1. jakość i odpad).

Ta sześciostopniowa kategoryzacja (i odpady) tablic korkowych nie jest już stosowana w praktyce. Zamiast tego stosuje się dodatkowe zagregowane klasy jakości: obecny system klasyfikacji wykorzystuje asortyment 1–3 do reprezentowania korków wysokiej jakości, asortyment 4–5 do reprezentowania korków średniej jakości i 6. klasę do reprezentowania korków niskiej jakości. Inną możliwością, prawdopodobnie najczęściej stosowaną, jest zawężenie klasyfikacji jakościowej desek do zaledwie 2 kategorii: asortyment od 1 do 5 reprezentujący deski korkowe nadające się do produkcji zatyczek korkowych oraz 6 klasa obejmująca deski o niższej jakości i parametrach do produkcji zatyczek korkowych.

Zbadano związek między oceną jakości a ilościową oceną porowatości na podstawie obrazu, a porowatość i rozmiar porów wzrastały wraz ze wzrostem klasy. Dotyczy to zarówno przekrojów stycznych, jak i poprzecznych lub promieniowych. Jednak w obrębie każdej klasy występuje znaczne zróżnicowanie, a różnice w wartościach średnich między sąsiednimi klasami są statystycznie nieistotne. Tabela 1.3 przedstawia różne parametry porowatości w deskach korkowych o różnych klasach jakości.

Tabela 1.3 Średnie parametry związane z porowatością dla różnych klas jakości desek korkowych (obserwacje w przekroju stycznym). Średnia z 40 próbek na klasę (na podstawie [4]).

	Quality class				
	1st	1st - 3rd	3rd	4th - 5th	6th
Porosity coefficient (%)	3.3	4.5	6.0	6.7	12.4
No. of pores/ 100 cm <sup>2</sup>	568	584	785	860	815
No. of pores > 0.8 mm <sup>2</sup> /100 cm <sup>2</sup>	47	84	111	121	176
Average pore area (mm <sup>2</sup> )	0.58	0.83	0.81	0.79	1.57
Maximum pore area (mm <sup>2</sup> )	19.7	23.1	21.1	26.3	82.0

Podział tylko na trzy klasy umożliwia większe zróżnicowanie i spójność ocen. Na przykład współczynnik porowatości można wykorzystać do kategoryzacji desek poprzez ustalenie następujących granic klas: deski wysokiej jakości mają porowatość niższą niż 6%, a deski średniej

jakości muszą mieć porowatość mniejszą niż 10%. Wymiary lub kształty obiektów widoczne na obrazie powierzchni korka mogą posłużyć do odróżnienia kanalików soczewkowatych od innych defektów, takich jak galerie owadów [62].

#### 1.2.4.3 Zintegrowany wskaźnik wartości korka

Biorąc pod uwagę, że wartość desek jest określana przez połączenie jakości związanej z grubością i porowatością, zaleca się zmienną złożoną w celu wskazania wartości korka w oparciu o względną wartość handlową różnych kombinacji zakresu grubości i klas jakości. Można to wykorzystać do oceny wartości produkcji dla określonego stojaka korkowego, biorąc pod uwagę grubość desek i rozkład jakości [4]. Zaproponowano następujący wskaźnik jakości (Równanie 1.2):

$$Q = \sum_{k=1}^{n_k} Q_k P_k = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} Q_i}{n_t} \quad (1.2)$$

gdzie  $Q_k$  oznacza cenę indeksową korka klasy  $k$ ,  $p_k$  oznacza udział jednostek próbkowania korka w korku klasy  $k$ ,  $n_k$  oznacza liczbę klas jakości,  $Q_i$  oznacza cenę indeksową jednostki próbnej pobranej z drzewa  $i$ , a  $n_t$  oznacza całkowitą liczbę drzew, z których pobrano próbki.

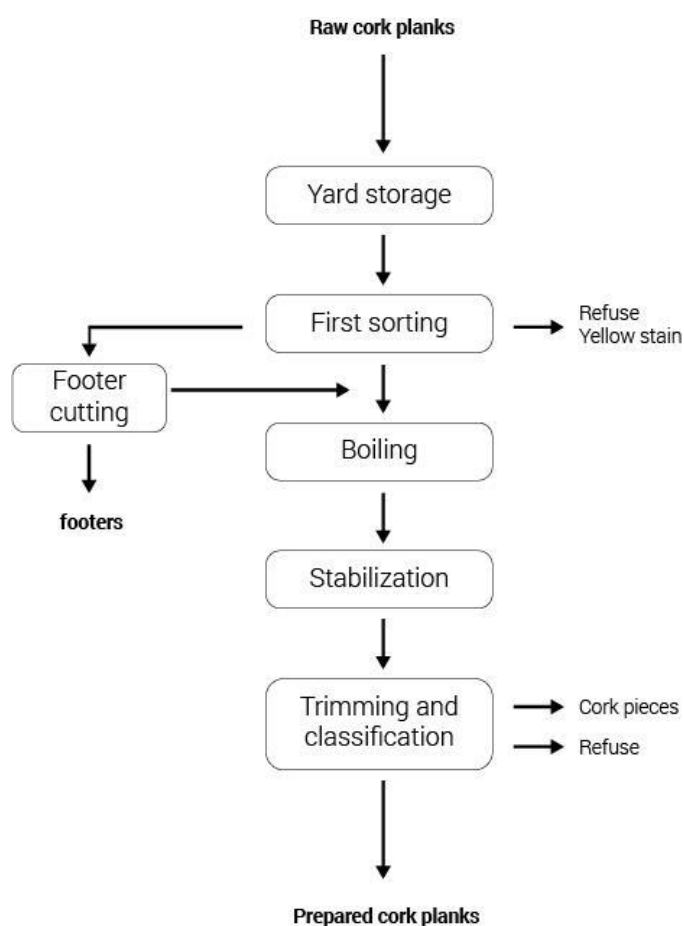
Ceny indeksów są powiązane z najbardziej cenioną klasą jakości korka, jak pokazano w Tabeli 1.4, na przykładzie ustalonym przez panel ekspertów. Oczywiście liczby mogą wymagać aktualizacji, aby odzwierciedlić zmiany na rynku korka lub wyjątkowe warunki handlu i przetwarzania.

Tabela 1.4 Ceny indeksowe korków przemysłowych o różnej grubości i jakości (na podstawie [4]).

Thickness (mm)	Quality class			
	1st - 3rd	4th - 5th	6th	Refuse
14 - 18	22	10	8	8
18 - 22	31	13	8	8
22 - 27	50	30	13	8
27 - 32	100	60	28	8
32 - 40	100	60	28	8
>40	66	33	17	8

### 1.3 Zabiegi po zbiorach

Po otrzymaniu surowych desek korkowych w młynie są one przetrzymywane w warunkach otoczenia, a następnie przechodzą procedurę zwaną przygotowaniem, która obejmuje gotowanie w wodzie, przycinanie i klasyfikację desek. Pełny schemat procesu przygotowania przedstawiono na rysunku 1.28.

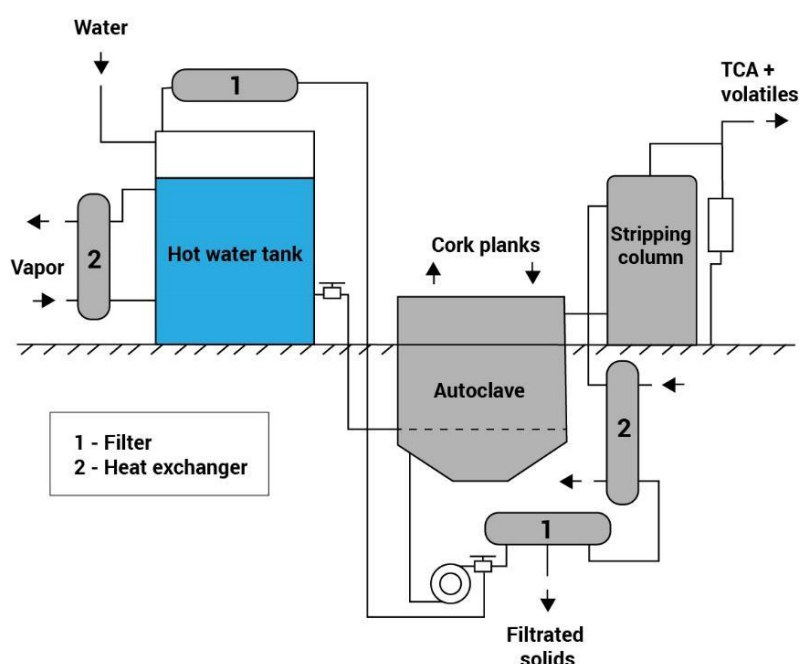


Rysunek 1.28 Schemat przygotowania surowych desek korkowych w młynie (na podstawie [4]).

#### 1.3.1 Gotowanie w wodzie

Gotowanie korka w wodzie to godzinny proces stosowany do wszystkich desek z korka reprodukcyjnego używanych do tworzenia korków i krążków. W ostatnich latach metoda ta uległa znacznej modernizacji. Stosy desek układano w zbiornikach o dużej pojemności, gotując wodę za pomocą pieca opalanego zwykle drewnem. Proces powtarzano dla kolejnych porcji z użyciem tej samej wody, a dla uzupełnienia ilości wchłoniętej do korka lub odparowanej wprowadzano również czystą wodę. Co cztery do pięciu dni zbiornik był opróżniany, czyszczony i uzupełniany wodą. W tych warunkach woda szybko stawała się bardzo ciemnobrązowa z nadmierną pianą, a stężenia zawieszonych i rozpuszczonych cząstek w ściekach odpływowych były podwyższone. Na przykład po jednym dniu pracy rozpuszczone substancje stałe stanowią 0,24%, a rozpuszczone związki fenolowe 0,04% masy deski korkowej [63].

Obecna technika i sprzęt do gotowania korka przeszły znaczną ewolucję. Deski są teraz układane na paletach ze stali nierdzewnej, a uzdatnianie wody odbywa się w zamkniętym autoklawie ze stali nierdzewnej. Uproszczony schemat przedstawiony na rysunku 1.29 przedstawia operację wrzenia. Woda jest podgrzewana do 95°C i krąży w autoklawie za pomocą wymienników ciepła. Filtry w przewodach wodnych usuwają zawieszone ciała stałe. Pusty autoklaw jest ładowany paletami korkowymi, a po zamknięciu dodaje się wodę i cyrkuluje podczas 1-godzinnej procedury. Na koniec autoklaw jest opróżniany, otwierane są drzwi i wyjmowane są palety. Ścięte piramidalne dno autoklawu zapobiega osadzaniu się ciał stałych. Autoklaw jest głównie zautomatyzowany i sterowany komputerowo, w tym załadunek i rozładunek. W niektórych sytuacjach para o temperaturze 110–120°C może być używana do rozszerzania cienkich desek w celu wytworzenia krążków do korków do szampana.



Rysunek 1.29 Schemat przedstawiający autoklaw do gotowania korka z cyrkulacją wody i usuwaniem substancji lotnych (na podstawie [4]).

Aby uniknąć przedostania się chlorowanych substancji do korka, co mogłoby spowodować zanieczyszczenie i skażenie wina, używana woda nie jest chlorowana. W innych okolicznościach, jak w systemie przedstawionym na schemacie s na rysunku 1.29, kolumna odpędowa służy do ekstrakcji i zateżnienia substancji lotnych z gorącej wody. Wrzące ekstrakty wodne i koncentraty 2,4,6-trichloroanizolu (TCA) i chlorofenoli, które zanieczyszczają wino.

Wody ściekowe stanowią problem odpadowy ze względu na ich średnie chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT) i biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (BZT) wynoszące 7,4 i 1,3 g/l, wartości pH 4,8–5,1 oraz wysoką toksyczność spowodowaną obecnością związków fenolowych i związku polifenolowe w stężeniu odpowiednio 9 g/l (fenol) i 0,5 g/l (w przeliczeniu na kwas kawowy) [64,65]. Zaproponowano kilka procesów, w tym ultrafiltrację [66], połączoną flokulację, flotację i ultrafiltrację [67], degradację grzybów i detoksykację [64], flokulację chlorkiem żelazowym [65], chemiczne

utlenianie odczynnikiem Fentona [68]. Kilka znaczących zanieczyszczeń fenolowych występujących w ściekach korkowych, takich jak esculetin (6,7-dihydroksykumaryna) [69], kwas galusowy [70], kwas elagowy [71] i acetovanillon, zostało zbadanych jako związki modelowe do oczyszczania [72].

### ***1.3.1 Jak gotowanie wpływa na korek***

Głównym celem procedury gotowania wody jest zmiana właściwości mechanicznych desek, aby można je było spłaszczyć, ułatwiając przyszłe procesy cięcia. Połączenie ogrzewania i wody powoduje znaczne osłabienie korka wkrótce po zagotowaniu. Łagodzi to stresy wzrostu, zmniejszając pofałdowania w ścianach komórkowych i zwiększając jednorodność struktury komórkowej.

Korek rozszerza się wymiarowo w wyniku prostowania ścian komórkowych: grubość desek korkowych wzrasta o około 15% w stosunku do promieniowego rozszerzania się komórek, podczas gdy rozszerzanie wynosi około 6% zarówno w kierunku stycznym, jak i osiowym [73]. Rozsądnie jest przewidywać, że rozszerzanie się różnych korków podczas gotowania znacznie się różni, ponieważ wartość ta zależy od pofałdowań komórkowych w wyniku naprężeń wewnętrznych, które są niezwykle zmiennymi właściwościami. Mimo że typowe wartości rozszerzalności promieniowej desek korkowych wynoszą zwykle od 11 do 15%, uzyskuje się również indywidualne wartości od prawie zera do ponad 40%. Mierzony współczynnikiem porowatości, porowatość korka maleje wraz ze wzrostem temperatury wody [74]. Tak więc gotowanie korka w wodzie poprawia w praktyce jakość desek poprzez zwiększenie ich rozmiaru i zmniejszenie średnicy kanalików soczewkowatych. Dodatkowo krzywizna surowych desek korkowych jest praktycznie usunięta, stając się praktycznie płaska, jak pokazano na rysunku 1.30, co ułatwia produkcję zatyczek i wprowadzenie zautomatyzowanego sprzętu w procesie produkcyjnym.



Rysunek 1.30 Deski korkowe po ugotowaniu.

W temperaturach poniżej 100°C zmiana wymiarów korka spowodowana gotowaniem jest nieodwracalna. Oznacza to, że wielokrotne moczenie i suszenie korka, jak to ma miejsce podczas mycia i wybielania korka, nie ma wpływu na jego wymiary.

Ponieważ czas ekstrakcji i powierzchnia korek-woda jest zbyt ograniczony, gotujący się korek ekstrahuje niewielką ilość związków rozpuszczalnych w wodzie, odpowiadającą mniej niż 2% ekstraktów wodnych korka. Dlatego wbrew częstym twierdzeniom ekstrakcja związków chemicznych z korka nie jest celem procesu gotowania w warunkach stosowanych w przemyśle. To samo dotyczy tak zwanej sterylizacji mikrobiologicznej deski.

Częstotliwość wymiany wody i usuwania substancji lotnych nie ma na celu maksymalizacji wydobycia materiału, ale raczej unikania zanieczyszczenia desek wrzącą wodą, stopniowo koncentrując się na potencjalnie szkodliwych substancjach.

### ***1.3.2 Proces po wrzeniu***

Po zagotowaniu wody deski korkowe odpoczywają - suszone powietrzem przez kilka dni (dwa/trzy dni), proces zwany stabilizacją. Palety są układane jedna na drugiej, aby ułatwić spłaszczanie desek. Zwykle budowano ogromne stosy gotowanych desek, a suszenie trwało kilka tygodni. Zostało to zmienione w ostatnich latach i zastosowano krótsze czasy stabilizacji, aby uniknąć wzrostu drobnoustrojów, który mógłby zagrozić nieszkodliwości zatyczki korkowej w odniesieniu do wina. Bezpośrednio po ugotowaniu zawartość wilgoci w desce spada z około 40% do 70%. Po dwóch dniach wilgotność powinna spaść do około 14-18%, co jest uważane za wystarczającą wilgotność roboczą w przemyśle.

Po wysuszeniu każda wrząca deska korkowa jest indywidualnie badana przez doświadczonego pracownika odpowiedzialnego za przycinanie i cięcie deski na bardziej jednolite kawałki w celu dalszej obróbki. Pierwszym krokiem jest usunięcie wadliwych sekcji (lub całej deski) w celu przetworzenia ich na stopery lub krążki:

- wilgotne deski korkowe są oddzielane w celu suszenia w piecu lub długotrwałego suszenia powietrzem;
- deski barwione na żółto lub z różnymi miejscami spleśniałymi są wyłączane z produkcji i wysyłane do rozcierania;
- części zawierające chodniki owadzie są odrzucane i usuwane w celu roztrarcia;
- deski lub ich części, które mają wysoki procent defektów, takich jak między innymi pęknięcia, są odrzucane i wycofywane do rozcierania;
- deski lub ich części zbyt cienkie do produkcji (cieńsze niż 13 mm) są odrzucane i wycofywane do rozcierania.



Trymer/klasyfikator tnie deski ręcznie nożem. Celem jest sortowanie odrzuconych desek i oddzielenie od surowych desek elementów nienadających się do dalszej obróbki jako lity korek. Dodatkowo, jeśli deska jest niejednorodna pod względem grubości i jakości, zostanie podzielona na mniejsze, jednorodne deski, co umożliwi wykrawanie zatyczek lub produkcję krążków. Dodatkowo duże deski są dzielone, co pozwala pracownikom łatwiej przenosić je ręcznie. Pomiar surowych desek korkowych wykazały średnią powierzchnię 3745 cm<sup>2</sup>, o wymiarach około 47 cm w kierunku poziomym i 119 cm w kierunku pionowym. Natomiast pomiary później przygotowanych desek wykazują przeciętne wymiary odpowiednio 34 i 70 centymetrów w kierunku poziomym i pionowym (średnia powierzchnia deski 1674 cm<sup>2</sup>) [75]. Ta procedura powoduje utratę 5% początkowego surowca w postaci małych kawałków korka.

Eksperymentalnie zmierzono ubytek surowca korkowego podczas cięcia desek do dalszej obróbki w porównaniu z cienkimi deskami do produkcji krążków korkowych [56]. Zmarnowany materiał stanowi około 19,5% jego początkowej masy, podczas gdy wydajność między deskami waha się od 0 do 50%, w zależności od kształtu poszczególnych desek i cech jakościowych.

Przycinanie desek prostuje krawędzie i tworzy bardziej atrakcyjne przekroje, jednocześnie klasyfikując deski według kalibru i klasy jakości. Operacje takie jak przycinanie są minimalizowane podczas produkcji zatyczek i krążków, aby zapobiec stratom surowców. Specyficzne wymagania walcowni determinują podział na klasy grubości i jakości: powszechnie dzieli się ją tylko na trzy klasy kalibrów, od 14 do 22, od 22 do 27 i powyżej 27 milimetrów oraz 2 klasy jakości, od 1 do 5 klasy jako podstawowy asortyment surowców do produkcji korków i krążków oraz szósty gatunek o niższej wartości. Gdy deska korkowa jest końcowym produktem walcowanym, zwraca się większą uwagę na to, aby krawędzie i grubość były jednolite, a kategoryzacja jakości była bardziej wyraźna, np. jako 1–3, 4–5 i 6 lub według żądania klienta.

### ***1.3.3 Obróbka korka na mokro***

Deski z mokrymi sekcjami korka są oddzielane i suszone do wilgotności 14% lub mniejszej, co jest standardem dla korka. Można to osiągnąć poprzez naturalne suszenie powietrzem przez okres 1–2 lat lub poprzez wymuszone suszenie gorącym powietrzem w komorach pieca. Zaadaptowane z suszarni do drewna, wdrożono je w nowocześniejszych jednostkach, stosując cykle suszenia ze wzrostem temperatury powietrza. Warunki różnią się w zależności od młyna: jednym z przykładów jest 96-godzinny okres suszenia w temperaturze końcowej 90°C; innym jest dwutygodniowy okres suszenia w temperaturze końcowej 80°C.

Po wysuszeniu deski są wprowadzane na linię technologiczną i przechodzą przez standardowy obwód roboczy do produkcji stoperów lub krążków.

### **1.3.4 Drugie gotowanie**

Kiedy korek jest wystarczająco wysuszony do zawartości wilgoci w zakresie od 5 do 8% (co oznacza równowagę) między gotowaniem desek korkowych a przetwarzaniem ich na korki lub krążki, korzyści wynikające z większej ilości wilgoci dla wytrzymałości materiału i możliwości obróbki są zagubione. Jest to typowa sytuacja, gdy wrzące deski nie są przetwarzane w młynie lub są przechowywane przez ponad dwa do trzech tygodni.

W tej sytuacji deski poddaje się drugiej operacji gotowania zgodnie z tą samą techniką, jak podano poprzednio, ale przez krótszy czas 30 minut. Ze względu na fakt, że wewnętrzne naprężenia korka zostały złagodzone już podczas wstępnego gotowania, jak wspomniano powyżej, nie następuje dalsze rozszerzanie się korka.

### **Bibliografia**

- [1] Associação Portuguesa da Cortiça, Available: <https://www.apcor.pt/>
- [2] Amorim Cork Composites.  
Available: <https://amorimcorkcomposites.com/en/why-cork/environmental-and-social-benefits/>
- [3] Ghouil, H., Montpied, P., Epron, D., Ksontini, M., Hanchi, B., Dreyer, E. (2003). Thermal optima of photosynthetic functions and thermostability of photochemistry in cork oak seedlings, *Tree Physiol.* 23:1031–1039.
- [4] Pereira, H. (2007). *Cork: Biology, Production and Uses*, Amsterdam: Elsevier Publications.
- [5] Caudullo, G., Welk, E., San-Miguel-Ayanz J. (2017). Chorological maps for the main European woody species, 12:662–666.
- [6] Moricca, S., Linaldeddu, B.T., Ginetti, B., Scanu, B., Franceschini, A., Ragazzi, A. (2016). Endemic and emerging pathogens threatening cork oak trees: Management options for conserving a unique forest ecosystem, *Plant Dis.* 100:2184–2193.
- [7] Natividade, J.V. (1950). *Subericultura*, Direcção Geral dos Serviços Florestais e Aquícolas, Lisboa,
- [8] Pereira, H. (2015). Cortiça chinesa: como se compara com a cortiça do *Quercus suber*?
- [9] Natividade, J.V. (1950). *Subericultura*, Ministério da Economia Direcção Geral dos Serviços Florestais e Aquícolas, Lisboa.
- [10] Elena-Rossello, J.A., Lumaret, R., Cabrera, E., Michaud, H. (1992). Evidence for hybridization between sympatric holm-oak and cork-oak in Spain based on diagnostic enzyme markers, *Veg.* 99:115–118.

- [11] Boavida, L.C., Silva, J.P., Feijó, J.A. (2001). Sexual reproduction in the cork oak (*Quercus suber* L). II. Crossing intra- and interspecific barriers, *Sex. Plant Reprod.* 143(14):143–152.
- [12] Nardini, A., Lo Gullo, M.A., Salleo, S. (1999). Competitive strategies for water availability in two Mediterranean *Quercus* species, *Plant. Cell Environ.* 22:109–116.
- [13] Molinas, M.L. (1991). The stomata of the cork-oak, *Quercus suber*. An ultrastructural approach, *Nord. J. Bot.* 11:205–212.
- [14] Fialho, C., Lopes, F., Pereira, H. (2001). The effect of cork removal on the radial growth and phenology of young cork oak trees, *For. Ecol. Manage.* 141:251–258.
- [15] Oliveira, G., Correia, O., Martins-Loução, M.A., Catarino, F.M. (1994). Phenological and growth patterns of the Mediterranean oak *Quercus suber* L., *Trees* 9, 9:41–46.
- [16] Díaz-Fernández, P.M., Climent, J., Gil, L. (2004). Biennial acorn maturation and its relationship with flowering phenology in Iberian populations of *Quercus suber*, *Trees - Struct. Funct.* 18:615–621.
- [17] Merouani, H., Apolinário, L.M., Almeida, M.H., Pereira, J.S. (2003). Morphological and physiological maturation of acorns of cork oak (*Quercus suber* L.), *Seed Sci. Technol.* 31:111–124.
- [18] García-MOZO, H., Hidalgo, P.J., Galán, C., GÓMEZ-CASERO, M.T., Domínguez, E. (2001). Catkin frost damage in Mediterranean cork-oak (*Quercus suber* L.), *Isr. J. Plant Sci.* 49:41–47.
- [19] Miguel, A., de Vega-Bartol, J., Marum, L., Chaves, I., Santo, T., Leitão, J., Varela, M.C., Miguel, C.M. (2015). Characterization of the cork oak transcriptome dynamics during acorn development, *BMC Plant Biol.* 15:1–22.
- [20] Cardillo, E., Bernal, C.J. (2006). Morphological response and growth of cork oak (*Quercus suber* L.) seedlings at different shade levels, *For. Ecol. Manage.* 222:296–301.
- [21] Pardos, M., Jiménez, M.D., Aranda, I., Puértolas, J., Pardos, J.A. (2005). Water relations of cork oak (*Quercus suber* L.) seedlings in response to shading and moderate drought, *Ann. For. Sci.* 62:377–384.
- [22] Herrera, J. (1995). Acorn predation and seedling production in a low-density population of cork oak (*Quercus suber* L.), *For. Ecol. Manage.* 76:197–201.
- [23] Montero González, G., Cañellas, I.M. (1999). Manual de reforestación y cultivo de alcornoque (*Quercus suber* L.), 102.
- [24] Quilhó, T., Lopes, F., Pereira, H. (2003). THE EFFECT OF TREE SHELTER ON THE STEM ANATOMY OF CORK OAK (*QUERCUS SUBER*) PLANTS, *IAWA J.* 24:385–395.
- [25] Pulido, F., Díaz, M. (2002). Dinámica de la regeneración natural del arbolado de encina y alcornoque.

- [26] Luque, J., Parlade, J., Pera, J. (2000). Pathogenicity of fungi isolated from *Quercus suber* in Catalonia (NE Spain), *Undefined*. 30:247–263.
- [27] Moricca, S., Ginetti, B., Ragazzi, A. (2012). Species- and organ-specificity in endophytes colonizing healthy and declining Mediterranean oaks, *Phytopathol. Mediterr.* 51:587–598.
- [28] Schulz, B., Boyle, C. (2005). The endophytic continuum, *Mycol. Res.* 109:661–686.
- [29] Moricca, S., Ragazzi, A. (2008). Fungal endophytes in Mediterranean oak forests: a lesson from *Discula quercina*, *Phytopathology*. 98:380–386.
- [30] Picco, A.M., Angelini, P., Ciccarone, C., Franceschini, A., Ragazzi, A., Rodolfi, M., Varese, G.C., Zotti, M. (2011). Biodiversity of emerging pathogenic and invasive fungi in plants, animals and humans in Italy, 145:988–996.
- [31] Moreira, A.C., Martins, J.M.S (2005). Influence of site factors on the impact of *Phytophthora cinnamomi* in cork oak stands in Portugal, *For. Pathol.* 35:145–162.
- [32] Linaldeddu, B.T., Sirca, C., Spano, D., Franceschini, A. (2011). Variation of endophytic cork oak-associated fungal communities in relation to plant health and water stress, *For. Pathol.* 41:193–201.
- [33] Linaldeddu, B.T., Scanu, B., Maddau, L., Franceschini, A. (2014). *Diplodia corticola* and *Phytophthora cinnamomi*: the main pathogens involved in holm oak decline on Caprera Island (Italy), *For. Pathol.* 44:191–200.
- [34] Pérez-Sierra, A., López-García, C., León, M., García-Jiménez, J., Abad-Campos, P., Jung, T. (2013). Previously unrecorded low-temperature *Phytophthora* species associated with *Quercus* decline in a Mediterranean forest in eastern Spain, *For. Pathol.* 43:331–339.
- [35] Allen, C.D, Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., (Ted) Hogg, E.H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A., Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests, *For. Ecol. Manage.* 259: 660–684.
- [36] Giorgi, F., Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region, *Glob. Planet. Change.* 63:90–104.
- [37] Carnicer, J., Coll, M., Ninyerola, M., Pons, X., Sánchez, G., Peñuelas, J. (2011). Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 108:1474–1478.
- [38] Besson, C.K., Lobo-do-Vale, R., Rodrigues, M.L., Almeida, P., Herd, A., Grant, O.M., David, T.S., Schmidt, M., Otieno, D., Keenan, T.F., Gouveia, C., Mériaux, C., Chaves, M.M., Pereira, J.S.

- (2014). Cork oak physiological responses to manipulated water availability in a Mediterranean woodland, *Agric. For. Meteorol.* 184:230–242.
- [39] Caritat, A., Gutiérrez, E., Molinas, M. (2000). Influence of weather on cork-ring width, *Tree Physiol.* 20:893–900.
- [40] Palma, J.H.N., Paulo, J.A., Faias, S.P., Garcia-Gonzalo, J., Borges, J.G., Tomé, M. (2015). Adaptive management and debarking schedule optimization of *Quercus suber* L. stands under climate change: case study in Chamusca, Portugal, *Reg. Environ. Chang.* 15:1569–1580.
- [41] Hidalgo, P.J., Marín, J.M., Quijada, J., Moreira, J.M. (2008). A spatial distribution model of cork oak (*Quercus suber*) in southwestern Spain: A suitable tool for reforestation, *For. Ecol. Manage.* 255:25–34.
- [42] Desprez-Loustau, M.L., Robin, C., Reynaud, G., Déqué, M., Badeau, V., Piou, D., Husson, C., Marçais B. (2010). Simulating the effects of a climate-change scenario on the geographical range and activity of forest-pathogenic fungi, 29:101–120.
- [43] Braisier, C.M. (1996). *Phytophthora cinnamomi* and oak decline in southern Europe. Environmental constraints including climate change, *Ann. Des Sci. For.* 53:347–358.
- [44] Corticeira Amorim S. G. P. S. (2005). The art of cork, 35, [2] .
- [45] Beira, J., Prades, C., Santiago, R. (2014). New tools for extracting cork from *Quercus suber* L.: increasing productivity and reducing damage, *For. Syst.* 23:22–35.
- [46] Brito dos Santos, S. (1995). ABC Do Podador de Sobreiros, Instituto Florestal .
- [47] Costa, A., Pereira, H., Oliveira, A. (2004). The effect of cork-stripping damage on diameter growth of *Quercus suber* L., *For. An Int. J. For. Res.* 77:1–8.
- [48] Martín, J., Cabezas, J., Buyolo, T., Patón, D. (2005). The relationship between *Cerambyx* spp. damage and subsequent *Biscogniauxia mediterranea* infection on *Quercus suber* forests, *For. Ecol. Manage.* 216:166–174.
- [49] Knapic, S., Louzada, J.L., Leal, S., Pereira, H. (2008). Within-tree and between-tree variation of wood density components in cork oak trees in two sites in Portugal, *For. An Int. J. For. Res.* 81:465–473.
- [50] Código Internacional das Práticas Rolheiras (2011), CELIEGE - European cork federation.
- [51] Gonzalez Adrados, J., Calvo Haro, R. (1994). Variación de la humedad de equilibrio del corcho en plancha con la humedad relativa. Modelos de regresión no lineal para las isotermas de adsorción, *Investig. Agrar. Sist. y Recur. For.* 3:199–209.
- [52] Fernandes, P. (2004). Influência do período de estabilização da cortiça e da cozedura na largura dos anéis de crescimento, no coeficiente de porosidade da cortiça e em algumas características tecnológicas das rolhas de cortiça natural, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.

- [53] C.B.-S. 4. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Portugal-Norte-176-Korkeiche-2011-gje.jpg>
- [54] Pissarra, J. (2017). Cortiça e descortiçamentos - Banco de Imagens da Casa das Ciências.
- [55] Crouvisier-Urien, K., Chanut, J., Lagorce, A., Winckler, P., Wang, Z., Verboven, P., Nicolai, B., Lherminier, J., Ferret, E., Gougeon, R.D., Bellat, J.P., Karbowiak, T. (2019) . Four hundred years of cork imaging: New advances in the characterization of the cork structure, *Sci. Reports* 2019 91. 9:1–10.
- [56] Fernandes, R.M.O. (2005). Estudo da influência do calibre e da qualidade das pranchas de cortiça delgada no rendimento do processo fabril de produção de discos de cortiça natural, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- [57] Liese, W., Günzerodt, H., Parameswaran, N. (1983). Alterações biológicas da qualidade da cortiça que afectam a sua utilização, Lisboa.
- [58] UNAC, Guia de comercialização de cortiça no campo (2013). EDRV, Lda, Lisboa.
- [59] Pérez-Terrazas, D., González-Adrados, J.R., Sánchez-González, M. (2018). Feasibility study of near infrared spectroscopy to detect yellow stain on cork granulate, *IForest - Biogeosciences For.* 11:111.
- [60] Fortes, M.A., Rosa, M.E., Pereira, H. (2004). *A Cortiça*, IST Press, Lisboa.
- [61] Corkassess (2001), Field assessment and modelling of cork production and quality. Final report. Contract FAIR.CT97.1438.
- [62] Gonzalez-Adrados, J.R., Pereira, H. (1996). Classification of defects in cork planks using image analysis, *Wood Sci. Technol.* 303. 30:207–215.
- [63] Pereira, H., Melo, B., Pinto, R. (1994). Yield and quality in the production of cork stoppers, *Holz Als Roh- Und Werkst.* 5:211–214.
- [64] Mendonça, E., Pereira, P., Martins, A., Anselmo, A.M. (2004). Fungal biodegradation and detoxification of cork boiling wastewaters, *Eng. Life Sci.* 4:144–149.
- [65] Domínguez, J.R., De Heredia, J.B., González, T., Sanchez-Lavado, F. (2005). Evaluation of Ferric Chloride as a Coagulant for Cork Processing Wastewaters. Influence of the Operating Conditions on the Removal of Organic Matter and Settleability Parameters, *Ind. Eng. Chem. Res.* 44:6539–6548.
- [66] Acero, J.L., Benítez, F.J., Leal, A.I., Real, F.J. (2005). Removal of phenolic compounds in water by ultrafiltration membrane treatments, *J. Environ. Sci. Health. A. Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng.* 40:1585–1603.
- [67] Minhalma, M., De Pinho, M.N. (2001). Flocculation/flotation/ultrafiltration integrated process for the treatment of cork processing wastewaters, *Environ. Sci. Technol.* 35:4916–4921.

- [68] Silva, C.A., Madeira, L.M., Boaventura, R.A., Costa, C.A. (2004). Photo-oxidation of cork manufacturing wastewater, *Chemosphere*. 55:19–26.
- [69] Acero, J.L., Benitez, F.J., Real, F.J., Leal, A.I., Sordo, A. (2007). Oxidation of Esculetin, a Model Pollutant Present in Cork Processing Wastewaters, by Chemical Methods, *27:317–326*.
- [70] Benitez, F.J., Acero, J.L., Garcia, J., Leal, A.I. (2003). Purification of cork processing wastewaters by ozone, by activated sludge, and by their two sequential applications, *Water Res.* 37:4081–4090.
- [71] Benítez, F.J., Acero, J.L., Leal, A.I., Real, F.J. (2005). Purification of ellagic acid by UF membranes, *Chem. Eng. Technol.* 28:1035–1040.
- [72] Benitez, F.J., Real, F.J., Acero, J.L., Leal, A.I., Cotilla, S. (2005). Oxidation of acetovanillone by photochemical processes and hydroxyl radicals, *J. Environ. Sci. Health. A. Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng.* 40:2153–2169.
- [73] Rosa, M.E., Pereira, H., Fortes, M.A. (1990). Effects of Hot Water Treatment on the Structure and Properties of Cork, *Wood Fiber Sci.* 149–164.
- [74] Cumbre, F., Lopes, F., Pereira, H. (2000). The effect of water boiling on annual ring width and porosity of cork., *Wood Fiber Sci.* 32:125–133.
- [75] Costa, A., Pereira, H. (2004). Caracterização e Análise de Rendimento da Operação de Traçamento na Preparação de Pranchas de Cortiça para a Produção de Rolhas, in: *Silva Lustiana*, 51–66.

## ROZDZIAŁ 2

### Zrównoważony rozwój, ślad węglowy i potencjalne produkty korka

*Maria Verdum\*, Albert Hereu, Patricia Jové*

Catalan Cork Institute Foundation, Palafrugell, Spain

\*Korespondencja: mverdum@icsuro.com

#### Abstrakt

W tym rozdziale omówiono znaczenie materiału korkowego w odniesieniu do zrównoważonego rozwoju i zielonej gospodarki, a także jego obecne i przyszłe wykorzystanie poza dobrze znaną zatyczką korkową. Zbadany zostanie również związek między konsumpcją korka a Celami Zrównoważonego Rozwoju (SDGS) Organizacji Narodów Zjednoczonych, a także wyzwaniami związanymi ze zmianami klimatycznymi. Rozdział składa się z trzech części: (i) Korek i zrównoważony rozwój, (ii) ślad węglowy wyrobów z korka oraz (iii) możliwe zastosowania korka. Pierwsza część koncentruje się na zrównoważonym rozwoju i korku oraz opisuje usługi ekologiczne świadczone przez las korkowy. Druga część będzie koncentrować się na śladzie węglowym (koncepcja, obliczenia i wartości dla różnych produktów z korka). W trzeciej części przedstawiony zostanie przegląd wielu zastosowań i zastosowań korka. Na zakończenie rozdziału, zrozumienie korka jako materiału zrównoważonego, koncepcja śladu węglowego korka i różne etapy jego obliczania, wprowadzenie do różnych zastosowań materiału korkowego oraz właściwości, które sprawiają, że korek nadaje się do przemysłu lotniczego przemysłu są wyjaśnione.

**Słowa kluczowe:** korek, zrównoważony rozwój, ekosystem korka, usługi środowiskowe, zmiana klimatu, ślad węglowy, cykl życia.

#### Nomenklatura

CO<sub>2</sub> eq Ekwiwalent dwutlenku węgla

GHG Gaz cieplarniany

LCA Ocena cyklu życia

SDGS Cele Zrównoważonego Rozwoju Organizacji Narodów Zjednoczonych



## 2.1 Korek i zrównoważony rozwój

### 2.1.1 Ekosystem korka

#### Ekologia

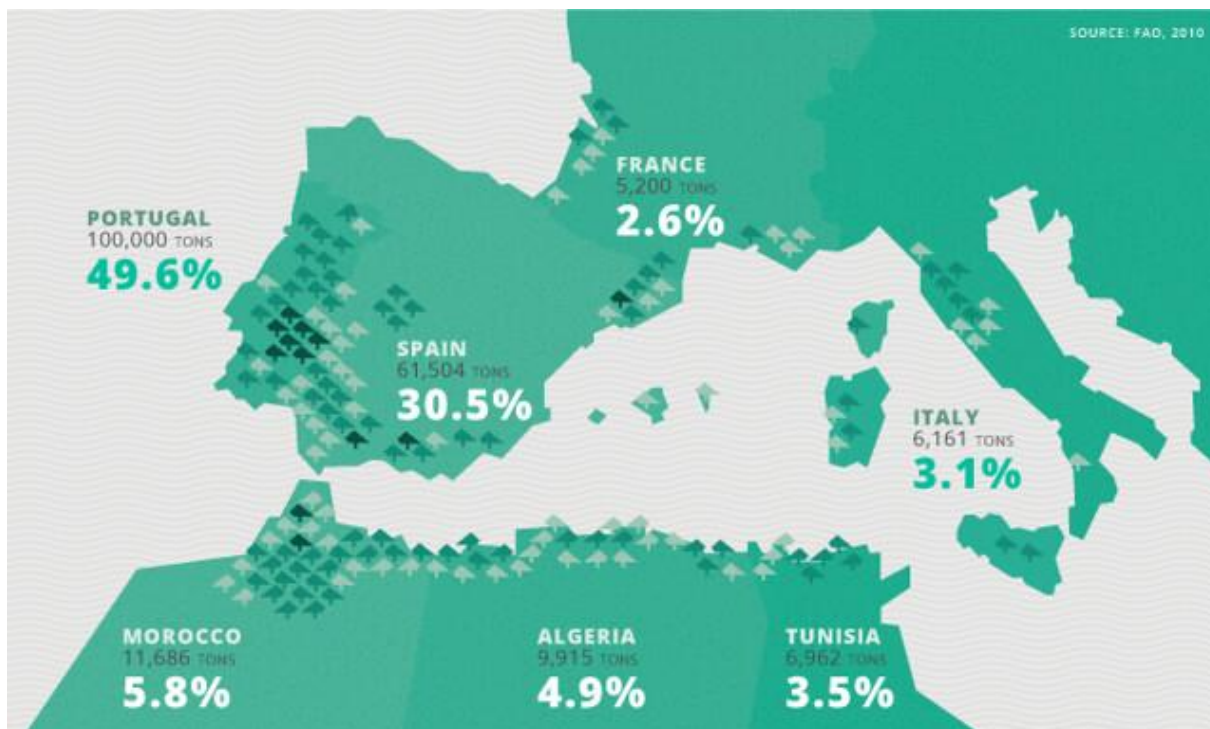
Pod względem ekologicznym dąb korkowy lub *Quercus suber* L. pochodzi z południowo-zachodniej Europy i północno-zachodniej Afryki. Nadaje się do klimatu:

- krótkie lato
- obfite i równomiernie rozłożone opady
- bardzo łagodne zimy
- suche okresy łagodzone przez wilgotność powietrza
- bardzo przepuszczalne, wilgotne i głębokie gleby krzemionkowe

Dąb korkowy rośnie w ciepłych, wilgotnych i półwilgotnych warunkach od poziomu morza do 2000 m. Ten optymalny wzrost osiąga wysokość 600 m [1]. Tak jest w przypadku stref klimatu śródziemnomorskiego ze średnią roczną temperaturą 13-18°C, wilgotnymi zimami, upalnymi latami i średnimi rocznymi opadami nieprzekraczającymi 900 mm. Drzewo jest bardzo wrażliwe na podlewanie. Opady atmosferyczne w strefach śródziemnomorskich koncentrują się późną jesienią i zimą, co poprawia zdolności adaptacyjne dębu korkowego. Gatunek ten jest również dobrze przystosowany do łagodnych zim oraz gorących i suchych lat. Najlepsze warunki glebowe do wzrostu dębu korkowego to gleby krzemionkowe i/lub piaszczyste oraz gleby dobrze napowietrzone i zdrenowane [1]. Gatunek ten jest więc tolerancyjny również na ubogich i płytkich glebach.

Kilka lat temu dęby korkowe zostały wprowadzone w Stanach Zjednoczonych i kilku krajach, od Australii po Bułgarię i Amerykę Południową, bez powodzenia. Niektóre aspekty, takie jak ochrona nasion lub problemy we wzroście młodych roślin, są odpowiedzialne za nieuzyskanie dorosłych drzew. Długi cykl życia drzewa też nie pomaga. Można go jednak znaleźć w wielu parkach na całym świecie ze względu na jego wysokie walory ozdobne.

Lasy dębu korkowego zajmują na całym świecie powierzchnię ponad 2,1 miliona hektarów. Obejmuje duży obszar w Europie, głównie Portugalie i Hiszpanie, ale także Francję, Włochy i kraje Afryki Północnej Maroko, Algierię i Tunezję. Według inwentaryzacji lasów dla obszarów dębu korkowego: 713 000 ha w Portugalii, 475 000 ha w Hiszpanii, 68 000 ha we Francji, 65 000 ha we Włoszech, 348 000 ha w Maroku i 90 000 ha w Tunezji. Mapę rozmieszczenia dębów korkowych i produkcji korka przedstawiono na rysunku 2.1.



Rysunek 2.1 Rozmieszczenie dębu korkowego i tony produkcji korka.

(<https://www.amorimcork.com/en/cork-and-wine/raw-material-and-production-process/>).

### Różnorodność biologiczna

Krajobrazy dębu korkowego stanowią ważny ekosystem ze względu na ich bogatą różnorodność biologiczną, chroniąc szeroką gamę siedlisk dla flory i fauny [2, 3]. Jest to powód, dla którego Morze Śródziemne jest znane jako jeden z 35 globalnych „gorących punktów”. Różnorodność biologiczna to różnorodność życia we wszystkich jego formach, poziomach i kombinacjach: ekosystem, różnorodność gatunkowa i genetyczna [4].

W skrócie, ekosystemy dębu korkowego są opisywane jako wielofunkcyjne ekosystemy z warstwą pokrywającą drzewa zdominowaną przez dąb korkowy (*Quercus suber* L.) często związany z dębem bezszypułkowym (*Quercus ilex* i *Q. rotundifolia*), dzikimi drzewami oliwnymi i sosnami [1, 5] oraz z gatunkami roślin zielnych [6]. Dynamika czasowa tych układów została opisana przez kilku autorów [7-9].

Krajobrazy dębu korkowego są rezerwuarem różnorodności biologicznej i domem dla wielu gatunków, z których niektóre są zagrożone, takie jak orzeł cesarski (*Aquila adalberti*). Jest to również siedlisko wielkiej naturalnej bioróżnorodności dzikiej fauny (ok. 24 gatunków gadów i płazów, ponad 160 gatunków ptaków i 37 gatunków ssaków). Ponadto basen Morza Śródziemnego jest regionem świata o trzeciej największej liczbie endemicznych gatunków roślin. W szczególności w lasach dębu

korkowego bioróżnorodność roślin może osiągnąć poziom 135 gatunków na metr kwadratowy. Należą do nich różne rodzaje roślin aromatycznych, leczniczych i kulinarnych. Poszycie obejmuje krzewy i krzewy, takie jak lawenda lub drzewa truskawkowe.

### Skutki społeczne i gospodarcze

Krajobraz dębów korkowych jest jednym z najlepszych przykładów równowagi między ochroną a rozwojem z korzyścią zarówno dla ludzi, jak i dla środowiska. Ten nienaturalny ekosystem jest konsekwencją stuleci ciągłego zarządzania i ukierunkowanych działań związanych z hodowlą lasu, które ukształtowały drzewa i środowisko dębu korkowego. W wyniku niektórych praktyk, takich jak wypas, karczowanie czy orka dla celów rolniczych, lasy dębu korkowego stopniowo przekształcały się w otwarte lasy.

Obecnie ekosystemy dębu korkowego obejmują mozaikę czterech rodzajów płatów: lasy, sawanny dębowe (lub montados w Portugalii i dehesas w Hiszpanii), zarośla i murawy (rys. 2.2 i 2.3). „Montado” to portugalski termin używany do opisu krajobrazów, w których rolnictwo mieszane koncentrowało się wokół rozległych lasów dębowych przeplatanych obszarami krzewów i/lub łąk. Jak wspomniano powyżej, sawanny dębowe i murawy utrzymują się w wyniku wieloletniej obecności człowieka i związanej z tym działalności na tym obszarze [10, 11].



Rysunek 2.2 Dębowe sawanny lub montados w Portugalii i dehesas w Hiszpanii (<https://gosuber.es/>).



Rycina 2.3 Lasy w Katalonii.

Ekosystem korkowy jest jednym z przykładów zrównoważonej eksploatacji lasów i stanowi ważne źródło dochodu pochodzącego głównie z produkcji zatyczek korkowych. Pomimo wysokiej wartości rynkowej zatyczek korkowych (stanowiących prawie 70% wartości rynkowej korka), równolegle ze zbiorem korka prowadzono inne praktyki rolnicze i leśne. Hodowla bydła, zbieranie ziół, grzybów i roślin leczniczych, produkcja miodu i ekoturystyka to niektóre z działań, które mają miejsce również w krajobrazach dębu korkowego [12,13]. Istnieją tysiące bezpośrednich (miejsca pracy w dziedzinie leśnictwa) i pośrednich miejsc pracy związanych z tym ekosystemem.

### **Wpływ środowiska**

Krajobrazy dębu korkowego jako naturalna bariera przed pustynnieniem i jego rola w odporności ogniowej to inne aspekty, które należy wziąć pod uwagę. Z uwagi na to, że zbierają około 26,7% opadów ogółem, dęby korkowe chronią przed erozją i zwiększają szybkość infiltracji wód opadowych. Dęby korkowe przenoszą znaczną ilość składników odżywczych z gleby z niższych do górnych poziomów gleby, dzięki czemu są dostępne dla innych roślin. Wreszcie, jego porowatość i skład organiczny zapewniają wysoką zdolność do zatrzymywania wody.

Krótko mówiąc, dąb korkowy jest gatunkiem, który należy chronić, biorąc pod uwagę jego znaczenie ekologiczne i gospodarcze. Z jednej strony lasy dębu korkowego zapewniają jeden z najwyższych na świecie poziomów różnorodności biologicznej lasów, ustępujący jedynie amazońskim lasom deszczowym. W tym sensie lasy dębu korkowego są gorącymi punktami różnorodności biologicznej i tworzą unikalne ekosystemy, które są uznawane za ekologiczne [14]. Dobrze zarządzane krajobrazy dębu korkowego unikają szybkiego zarastania przez śródziemnomorskie gatunki matorral, co zwiększa ryzyko pożarów oraz utraty siedlisk i różnorodności biologicznej [15]. Z drugiej strony wydobycie korka i wysoka wartość dodana zatyczek korkowych odpowiada za tysiące przedsiębiorstw na różnych poziomach jego produkcji (leśnictwo, przemysł i/lub laboratorium). Przemysł korkowy przyczynia się do unikania porzucania lasów dębu korkowego, ponieważ zapewnia miejsca pracy na różnych obszarach leśnych.

#### **2.1. 2 Usługi środowiskowe \_**

Jako strategia zarządzania zasobami naturalnymi koncepcja usług środowiskowych zyskała w ciągu ostatniej dekady duże zainteresowanie. Ponadto zostało to stopniowo włączone do polityk środowiskowych [16]. Jednocześnie opłaty za usługi środowiskowe nadal cieszą się dużym zainteresowaniem zarówno ze strony naukowców, jak i praktyków ochrony przyrody [17].

Pierwszym krokiem w realizacji usług środowiskowych jest ilościowe określenie i analiza ekonomiczna bezpośrednich i pośrednich korzyści usług środowiskowych związanych z obszarem

lasów dębu korkowego. Różne usługi środowiskowe oferowane przez ekosystem są klasyfikowane zgodnie z innymi badaniami [18] w czterech kategoriach: (a) dostarczanie towarów i usług, (b) regulacja, (c) wsparcie oraz (d) usługi kulturalne. Tak więc ekosystemy oferują wiele funkcji, takich jak dostarczanie żywności, wody, paliwa, materiałów, ochrona przed słońcem, regulacja wody, zapobieganie pożarom, użytkowanie rekreacyjne i obieg składników odżywczych wśród wielu innych.

W niniejszym dokumencie przedstawiono przykład badania przeprowadzonego przez Dr. Jesúa Rivesa i jego współpracowników, przedstawiono metodologię wykonywania tego typu usług: „Wartość usług środowiskowych lasów dębu korkowego w Katalonii oraz ocena usług środowiskowych ekosystemu” [18]. Zgodnie z tym opracowaniem przykład metodologii zastosowanej do określenia usług środowiskowych przedstawiono na rysunku 2.4.

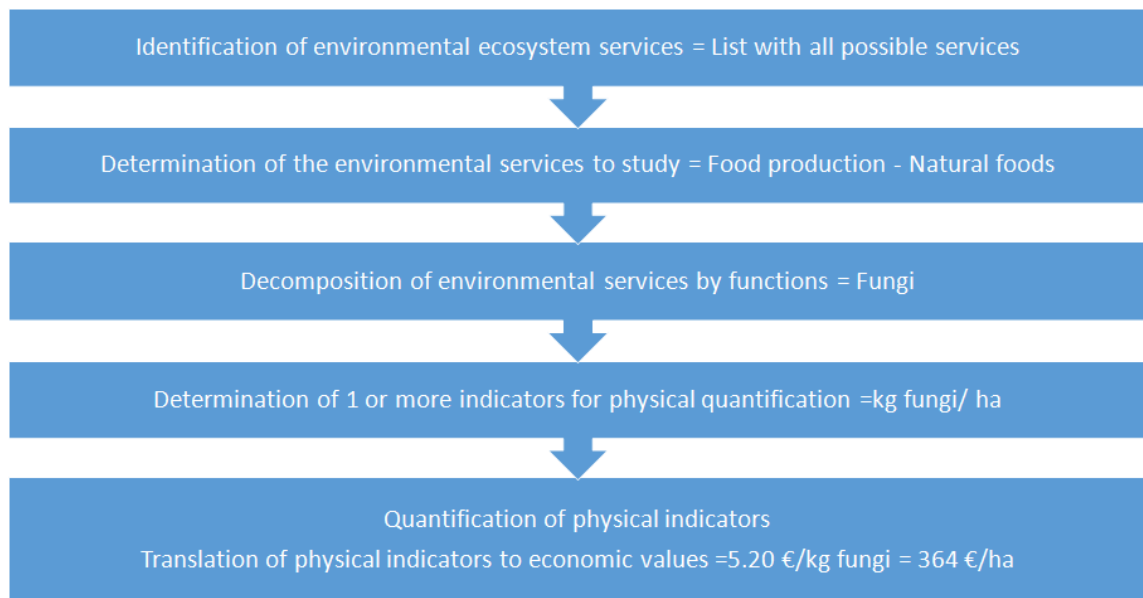
W przypadku kwantyfikacji i analizy ekonomicznej bezpośrednich i pośrednich korzyści środowiskowych związanych z dębami korkowymi w Katalonii, pierwszym krokiem jest wybranie jak najbardziej reprezentatywnej próbki lasu, a następnie wybór kryteriów. Na tym etapie ważne jest rozważenie niektórych aspektów, takich jak:

- Główna działalność wydobycie korka i możliwość innej działalności uzupełniającej
- Pole w eksploatacji
- Reprezentatywne wymiary pól na poziomie katalońskim (od 200 do 1000 ha)
- Dojrzała struktura lasu - reprezentatywna dla klas średnicowych
- Brak istotnych zakłóceń w ostatnim czasie
- Dystrybuowane w różnych obszarach
- Dostępne w zaktualizowanym PTMGF i mapowaniem cyfrowym.

Informacje o wybranych polach przedstawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1 Charakterystyka wybranych dziedzin [18].

Area	Albera- Salines	Gavarres	Selva-Gironès	Montseny	Montnegre
Total surface (ha)	201,7	937,9	269,9	479,2	481,0
Altitude min and max (m)	155-395	75-325	325-704	475-980	91-357
Average slope(%)	40%	30%	20-80%	25%	20%
Average temperature (°C)	2,3-28,2	2,5-30,7	1,6- 28,3	-2,0-25,0	2,7-29,0
Rainfall(mm)	580,8	819,0	900,0	850,0	750,0



Rysunek 2.4 Metodyka wyznaczania usług środowiskowych [18].

<b>PROVISION SERVICES</b>	<b>Food supply</b>		
	Natural foods	Fungi	Kg / ha
		Wild fruits	
		Chestnut	
		Pine nuts	
		Honey	
	Aromatic and medicinal plants	%	
	<b>Forest resources</b>		
	Wood	Fungi	t / ha
		Quercus suber	
Pinus pinaster			
Pinus insignis/radiata			
Eucaliptus			
Other woods			
Cork	Cork (virgin cork, reproduction cork)	t/ha	
Pineapples and resins	pineapples and resins	Kg/ha	
Other forestry products	Biomass	m3/ha	
	Firewood	t/ha	
	Decorative bushes	units/ha	
<b>REGULATION SERVICES</b>	<b>Cycles</b>		
	Soil training and protection	Amount of soil eroded	T eroded soil/year
		Soil erosion rate	T eroded soil/year/ha
	Pollination	Amount of ropaloceros through the BMS	Number of individual/ha
		Number of species of ropaloceros through the BMS	Species/ha
		Number of swarms	number swarms/ha
		Bee population	Bees/ha
	Climate regulation	Amount of carbon accumulated	Totals t CO2/ha
	<b>Prevention</b>		
	Fire prevention/control	number of fires in the last 100 years	Ha burned
number of fires in the last 20 years		Number fires	
Road density, property management and fire protection		m/ha	
Amount of water for the fire		m3/ha	
number of traps		number of traps	Num tra,ps/year
<b>CULTURAL SERVICES</b>	Recreational activities	Number of visitors	n° visitors/year
			n° concerted visits/year
	Turism and ecoturism	number of annual overnight stays	days with occupation
		total rural tourism places	n° places
	Scenery	N° of visits	n° visits/year
	Education/interpretation	environmental education activities	n° students/year

Rysunek 2.5 Przykłady różnych usług środowiskowych oferowanych przez ekosystem są podzielone na cztery kategorie: (a) dostarczanie towarów i usług, (b) regulacja, (c) wsparcie oraz (d) usługi kulturalne [18].

Drugim krokiem jest identyfikacja środowiskowych usług ekosystemowych do zbadania i rozkład tych usług według funkcji. Tak więc różne usługi środowiskowe oferowane przez ekosystem są podzielone na cztery kategorie, jak wspomniano wcześniej. Przykłady poszczególnych usług i niektóre funkcje każdej z nich przedstawiono na poniższym rysunku 2.5.

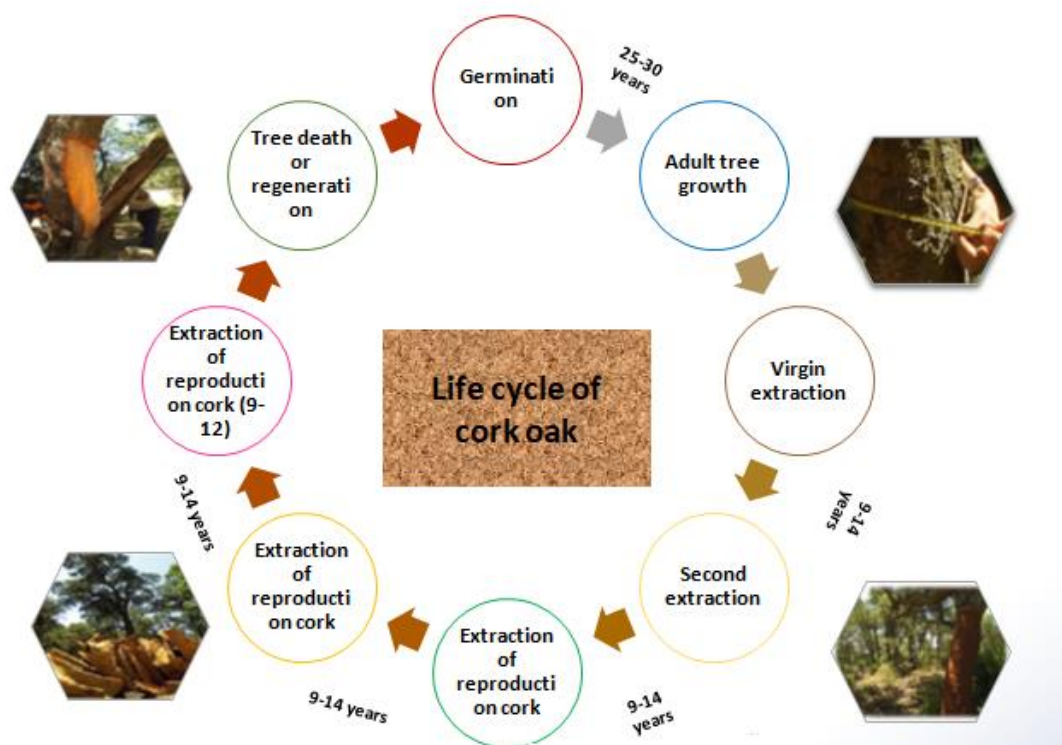
Następnym krokiem jest określenie jednego lub więcej wskaźników do fizycznej kwantyfikacji oraz kwantyfikacja każdego z nich.

### 2.1. 3 Zrównoważone zarządzanie

Korek zapewnia ekonomiczną, społeczną i ekologiczną równowagę lasów dębowych [11]. Tę trwałość należy scharakteryzować w trzech aspektach: przyrodniczym, społecznym i ekonomicznym, zgodnie ze zróżnicowaniem funkcji lasu [19] i zastosowaniami korka.

Zrównoważone zarządzanie produkcją korka opiera się na fakcie, że kora korkowa może być obierana z pary bez narażania żywotności drzewa, ponieważ regeneruje nową warstwę korka. Wydobywanie

korka do produkcji zatyczek korkowych wymaga okresowego usuwania korka z kory w stopniu uznanym za zgodny z zachowaniem doskonałego stanu fizjologicznego drzewa i produkcją tego produktu końcowego. To zrównoważone zarządzanie korkiem ze względu na cykl życia dębu korkowego przedstawiono na rysunku 2.6.



Rysunek 2.6 Cykl życia korka, który pokazuje, w jaki sposób uzyskuje się korę korkową od kiełkowania nasion do martwego drzewa (ICSuro).

Jak widać na rysunku 2.6, pierwsze usuwanie korka ma miejsce, gdy drzewo ma od 30 do 40 lat lub gdy drzewo jest dorosłe (zależy to od regionu). Ta pierwsza uzyskana kora nosi nazwę dziewiczego korka. Następnie, po 9 do 14 latach, w zależności od regionu, drzewo jest ponownie odzieraćane, uzyskując drugą korę lub drugi korek. Te pierwsze deski korkowe nie nadają się do produkcji zatyczek korkowych ze względu na swoje właściwości mechaniczne i wizualne. A następnie dąb korkowy jest okresowo usuwany w odstępach 9 - 14 lat, otrzymując inny materiał o nazwie: korek reprodukcyjny. Te ostatnie korki są przydatne do produkcji zatyczek korkowych. Proces ten jest ciągły, dopóki drzewo nie osiągnie wieku 150 do 250 lat. Warunki te pozwalają na uzyskanie korka klasy handlowej.

Usuwanie korka odbywa się ręcznie, a proces ten pokazano na rysunku 2.7. Dlatego usuwanie korka jest procesem, który wymaga pewnej wiedzy, aby uniknąć zranienia drzewa: bez dotarcia i uszkodzenia kambium naczyniowego poniżej fellogenu. Ta kompetencja osób zajmujących się usuwaniem korka jest wymagana do prawidłowego wykonania operacji i dokonania prawidłowej selekcji dotyczącej rozpoczęcia usuwania korka z dębu korkowego.

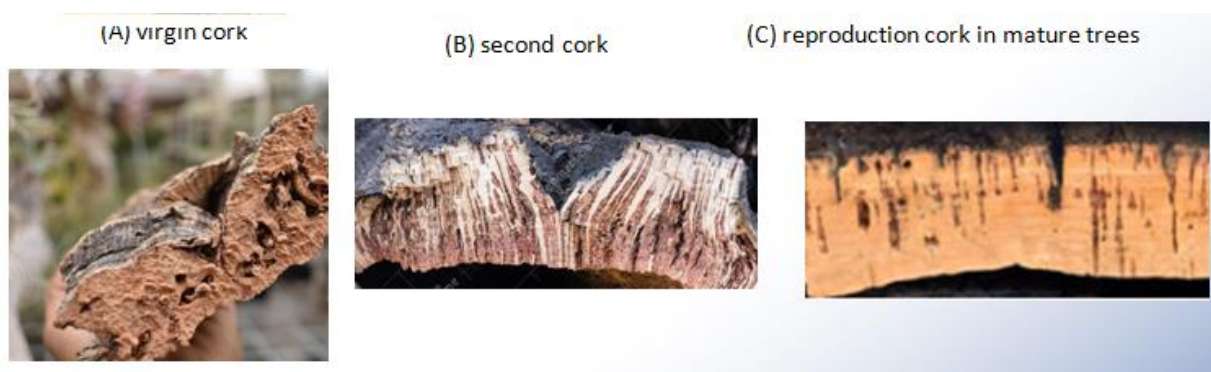




Rysunek 2.7 Proces usuwania korka (ICSuro).

Wykorzystując siekiere z zakrzywionym ostrzem tnącym i stosunkowo długim drewnianym ramieniem jako dźwignię do oddzielania desek korkowych, przeprowadza się proces zdzierania. Najpierw zdzieracz wykonuje długie nacięcia na korku: poziomo wokół obwodu drzewa i kilka nacięć pionowych. Następnie rozdziela się deski lub warstwy korka, wkładając ramię siekiery w wycięcie, aż do wyjęcia deski korkowej [1]. Zazwyczaj zespół korkowy składa się z dwóch zdzieraczy korka, a proces przebiega dość szybko i ze średnią wydajnością około 900 kg korka w ciągu dnia roboczego [20]. Obecnie istnieje alternatywny zmechanizowany proces pozyskiwania korka.

Rysunek 2.8 przedstawia wygląd korka pierwotnego, drugiego korka i korka reprodukcyjnego po zbiorach. Deski z korka pierwotnego i wtórnego wykazują pewne różnice w aspekcie wizualnym w porównaniu z korkami reprodukcyjnymi. Różnice te wynikają z rozwoju tkanki zwanej perydermą i jej regularności. Powierzchnia obu pierwszych korków korkowych jest nieregularna i zawiera struktury lignocelulozowe. Z tego powodu obie kory nie nadają się do produkcji korków naturalnych.

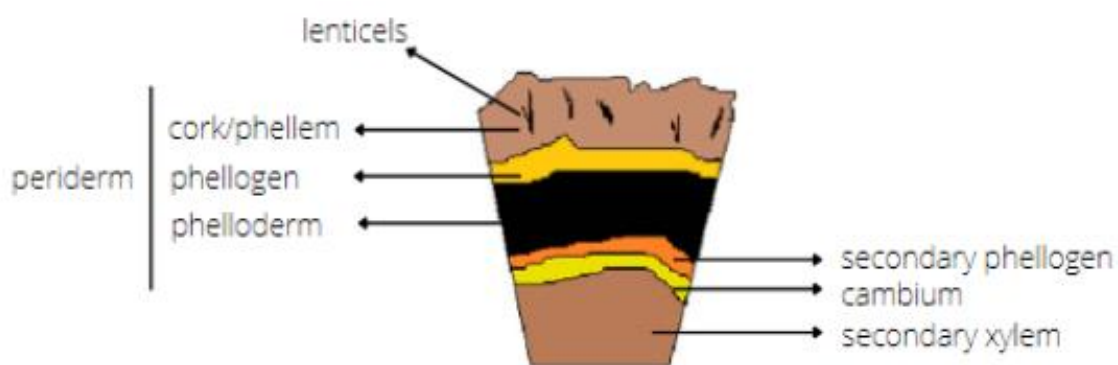


Rysunek 2.8 *Quercus suber*: (A) korek pierwotny; (B) drugi korek; oraz (C) korek reprodukcyjny w dojrzałych drzewach (ICSuro).

Proces ekstrakcji korka przeprowadza się tylko wtedy, gdy dąb korkowy jest fizjologicznie aktywny lub w okresie aktywności perydermy: kiedy komórka macierzysta fallogenu i niedawno utworzona komórka fellemu są nabrzmięte, a ściany komórkowe cienkie i kruche. Przy użyciu umiarkowanej siły warstwa korka na poziomie strefy aktywnej felogenicznej może być łatwo oddzielona [1] w tym stanie. Ten etap przypada na późną wiosnę i wczesne lato. Po usunięciu korka felogen obumiera i powstaje nowy.

Wymienione powyżej warunki są niezbędne, aby zagwarantować, że drzewo nie zostanie uszkodzone, ponieważ podczas okrzesywania możliwe jest generowanie punktów infekcji. W takim przypadku atak biologiczny może spowodować śmierć drzewa.

Ale jak możliwa jest regeneracja kory korkowej? Patrząc na przekrój poprzeczny pnia drzewa (rys. 2.9), możemy wyróżnić dwa merystemy lub grupę nieróżnicowanych komórek zdolnych do podziału komórkowego (kambium i felogen). Oba merystemy są zdolne do wytwarzania tkanek po obu stronach. W przypadku kambium odpowiada za tworzenie ksylemu lub drewna (w części wewnętrznej) oraz łyka lub głównej tkanki przewodzącej pokarm w roślinach naczyniowych (w części zewnętrznej). Jest to typowa struktura roślin drzewiastych. A w przypadku felogenu odpowiada za formowanie się korka i korka odpowiednio w części wewnętrznej i drugiej. Peryderma jest sumą phellogenu, fellemu i felogenu. Łyko i peryderma tworzą korę [1].



Rycina 2.9 Przekrój poprzeczny pnia dębu korkowego (ICSuro).

Peryderma jest tkanką ochronną i u niektórych gatunków funkcjonuje tylko przez pewien czas. W przypadku *Quercus suber* za produkcję korka odpowiedzialne są kolejne obumierania i kolejne regeneracje perydermy. Ponadto peryderma dębu korkowego ma pewne szczególne cechy związane z

jej rozwojem, regularnością, intensywnością wzrostu i długowiecznością, a jak wspomniano powyżej, jej zdolność do regeneracji po usunięciu uczyniła ten gatunek wyjątkowym.

Po ekstrakcji korek może być używany w wielu zastosowaniach. Obecnie zatyczki z korka naturalnego są najcenniejszym i najbardziej produkowanym produktem w branży korkowej. Zatyczki korkowe stanowią 70% całkowitych przychodów generowanych przez przemysł korkowy. Według rejestracji APCOR zatyczki z naturalnego korka lub zatyczki do win niemusujących stanowiły 60% rynku, podczas gdy inne rodzaje korków stanowiły 21%, takie jak zatyczki do win musujących, które stanowiły 19%.

Korek, który nie nadaje się do produkcji zatyczek korkowych: korek pierwotny lub korek niskiej jakości jest używany do produkcji granulatu korkowego, który jest klasyfikowany według gęstości i wielkości ziarna [21]. Brak wad, takich jak nadmierne nieciągłości, tj. głębokie pęknięcia, nie nadają się do produkcji zatyczek korkowych, z tego powodu nie stosuje się do tej czynności korka pierwotnego i wtórnego. Te granulki korkowe mogą być używane jako produkt końcowy w wielu zastosowaniach, wykorzystując ich właściwości, które charakteryzują się lekkością, elastycznością i nieprzepuszczalnością dla gazów i cieczy.

Jakość desek korkowych jest ważnym czynnikiem decydującym o końcowym zastosowaniu tego surowca. Jakość ta jest oceniana przez kontrolę wzrokową desek korkowych. Jak wspomniano powyżej, klasyfikacji desek korkowych dokonuje wyspecjalizowany operator, biorąc pod uwagę subiektywne kryteria, które różnią się w zależności od ich końcowego zastosowania. W przypadku jakości korka do produkcji zatyczek korkowych, głównymi cechami branymi pod uwagę są głównie porowatość, grubość surowego korka oraz niektóre wady, takie jak dziury po owadach lub pęknięcia styczne.

#### ***2.1.4 Wpływ zmian klimatu na ekosystem korka***

Gatunek dębu korkowego zapewnia korzyści ekologiczne, ekonomiczne i społeczne. Jednak od lat 50. XX wieku rozpoznawano zjawisko zanikania niektórych lasów dębu korkowego. Ponadto wcześniejsze badania wskazują, że spadek ten przyspieszył w ciągu trzydziestu lat od lat 80. XX wieku [22]. Zdolność lasów śródziemnomorskich do reagowania na systematyczne zmiany, takie jak trwałe intensywne wpływy człowieka lub zmiana klimatu, jest ograniczona. Jednak przyczyny tej sytuacji nie są jeszcze jasne.

Czynniki biotyczne i abiotyczne, takie jak zmiana klimatu lub niektóre działania człowieka, mogą prowadzić do trwałej utraty lasów dębowych, szczególnie w basenie Morza Śródziemnego. Na przykład w wyniku niektórych praktyk, takich jak karczowanie, wypas czy orka dla celów rolniczych, lasy dębu korkowego stopniowo przekształcały się w otwarte lasy [15].

Kim i zesp. [5] zasugerował kilka hipotez dotyczących upadku *Quercus suber*. Według tego badania niektóre czynniki naturalne, takie jak wzrost średniej rocznej temperatury, okresy suszy, ekstremalne opady lub spadek średnich rocznych opadów o 57 mm w ciągu ostatnich dwóch dekad, zostały uznane za przyczyny degradacji lasów. Te zmiany środowiskowe mogą prowadzić do zwiększenia podatności drzew na owady i patogeny i/lub fizjologicznego upadku drzew [23], ponieważ przeżywalność i rozwój patogenów wzrasta wraz ze wzrostem temperatury w zimie.

W przypadku wzrostu temperatury średnia roczna temperatura w rejonie Morza Śródziemnego ma wzrosnąć o 2 do 4,5°C, wynika z raportu IPCC. Podczas upalnego lata wzrost temperatury powietrza może hamować wzrost drzew ze względu na wzrost szybkości oddychania i stres suszy narzucony przez rosnące zapotrzebowanie na ewapotranspirację [5]. Ponadto zjawiska środowiskowe, takie jak okresy dotkliwej suszy, gwałtowne wahania poziomu wody w glebie, zalewanie i/lub długotrwałe powodzie, mogą mieć wpływ na spadek liczby dębów korkowych. Zjawiska te mogą mieć szczególne znaczenie w inicjowaniu syndromów schyłkowych [24].

Zjawisko zamierania wiąże się ze wzrostem liczby drzew z objawami „nagłej śmierci”, które są związane z porażeniem przez grzyba *Phytophthora cinnamomi* [25, 26]. Innymi przyczynami, które prowadzą do zamierania korka, są obecność chrząszczy w korze lub inwazja oportunistycznej łodygi, a innymi przyczynami są grzyby chorobotwórcze [26].

Kolejnym czynnikiem, który należy wziąć pod uwagę, jest wpływ człowieka. Niektóre działania człowieka, takie jak industrializacja, urbanizacja, nadmierna eksploatacja lub pożary, mogą powodować pogorszenie stanu środowiska w niektórych krajach śródziemnomorskich. Ich konsekwencjami są zmiany klimatu lub poważne problemy środowiskowe, takie jak ubytek gleby, sedymentacja, utrata różnorodności biologicznej lub zanieczyszczenie wody i powietrza. Pod koniec XIX i na początku XX wieku nadmierna ekstrakcja garbników po okorowaniu była jedną z głównych przyczyn długotrwałego zmniejszania się powierzchni lasów dębu korkowego [27].

Śródziemnomorskie lasy mają długą historię wypasu. Niektóre dowody naukowe wykazały, że wypas zwierząt gospodarskich jest czynnikiem ekologicznym, który może służyć ochronie lasów śródziemnomorskich, jeśli jest właściwie wykorzystywany. Masson i zesp. stwierdzili, że wypas we francuskim lesie dębu korkowego może skutkować kontrolą łatwopalnych krzewów. W przeszłości inne badania obwinały zwierzęta domowe za ich zniszczenie. Sugerują one, że nadmierne użytkowanie i eksploatacja lasów dębu korkowego może zmniejszyć tempo jego regeneracji poniżej zrównoważonego poziomu w basenie Morza Śródziemnego [28, 29]. Według Costy i zesp. [20] porzucenie tradycyjnych praktyk gospodarowania gruntami doprowadziło do znacznych przekształceń użytkowania gruntów, takich jak zastąpienie użytkowania gruntów rolnych i rodzimych lasów dębowych krzewami oraz szybko rosnącymi plantacjami eukaliptusa i sosny (*Pinus pinea L.*).

## 2.2 Ślad węglowy produktów z korka

### 2.2.1 Wprowadzenie do śladu węglowego

Zmiana klimatu jest głównym problemem dla przyszłości przyrody i ludzkości. Potrzebujemy znacznych redukcji emisji netto gazów cieplarnianych (GHG), aby złagodzić przyszłe problemy i skierować świat na zrównoważoną ścieżkę ku przyszłości. Całkowite antropogeniczne emisje gazów cieplarnianych netto nadal rosły w ciągu ostatniej dekady, podobnie jak skumulowane emisje netto CO<sub>2</sub> od 1850 r. Sektor leśny oferuje znaczne możliwości łagodzenia skutków, zapewniając jednocześnie żywność, drewno i inne zasoby odnawialne, a także chroniąc różnorodność biologiczną. Zasoby naturalne mogą być odnawialne lub nieodnawialne, w zależności od tego, czy można je wydobywać więcej niż raz i zastępować się w sposób naturalny, i mają potencjał, aby zwiększyć wydajność przemysłu lotniczego.

Life cycle Assessment (LCA) oraz Carbon Footprint to coraz popularniejsze narzędzia oceny środowiskowej produktów, które uwzględniają cały ich cykl życia. Różnica między LCA a śladem węglowym dotyczy badanych kategorii wpływu. Ślad węglowy koncentruje się na jednej kategorii wpływu na środowisko: emisji gazów cieplarnianych (CO<sub>2eq</sub><sup>1</sup>). Analiza śladu węglowego jest podzbiorem oceny całego cyklu życia produktu, czynności lub procesu. LCA identyfikuje wejścia i wyjścia materii i energii przez cały okres użytkowania procesu, produktu, usługi, osoby lub organizacji, w zależności od zakresu badania. Analiza ta wraz ze Śladem Węglowym pozwala na standaryzację danych, wykonywanie analiz i porównań oraz określenie wpływu na środowisko obiektu badań w tej samej jednostce (CO<sub>2eq</sub>) niezależnie od kontekstu.

Aby ocenić efektywność środowiskową różnych produktów, możemy użyć LCA i przełożyć wyniki na CO<sub>2eq</sub> (ekwiwalent dwutlenku węgla) jako ślad węglowy. Metodologię oceny cyklu życia możemy zdefiniować jako ocenę wpływu na środowisko związanego z produktem, procesem lub usługą w całym okresie ich życia poprzez inwentaryzację zasobów materiałowych, nakładów energii i kwestii środowiskowych poprzez pozyskiwanie surowców, wytwarzanie, użytkowanie i utylizację produktu lub usługi (podejście od kołyski do grobu) (rysunek 2.10).

---

<sup>1</sup> Ekwiwalent CO<sub>2</sub>, w skrócie CO<sub>2 eq</sub>, to miara metryczna stosowana do oceny emisji innych gazów cieplarnianych w oparciu o ich współczynnik ocieplenia globalnego (GWP) poprzez przeliczenie poziomów innych gazów na równoważną ilość dwutlenku węgla o takim samym GWP.



Rysunek 2.10 Ocena cyklu życia (LCA) (ICSuro).

Materiał z korka jest ściśle powiązany z zachowaniem różnorodności biologicznej, kamieniem węgielnym zrównoważonego rozwoju, a także redukcją emisji gazów cieplarnianych i sekwestracją CO<sub>2</sub>. Korek regeneruje się po każdym zdzieraniu, dzięki czemu drzewo korkowe może wytrzymać utratę znacznej ilości kory, zazwyczaj ponad 50 procent całkowitej powierzchni pnia i gałęzi. Fakt, że korki są tworzone z kory żywych drzew, skłonił decydentów do faworyzowania ich stosowania zamiast mniej naturalnych alternatyw. Istnieje kilka badań oceniających cykl życia, które koncentrują się na zarządzaniu lasami dębu korkowego i ich związku ze środowiskiem [30-33].

Ślad węglowy sektora korka należy rozpatrywać na wszystkich jego etapach, począwszy od gospodarki leśnej (nie tylko pozyskiwania korka), poprzez procesy produkcyjne i dystrybucję produktów, aż po wycofanie produktu z eksploatacji (czyli unieszkodliwianie, spalanie, recykling, itp.). Zwykle nie uwzględnia się również biogenicznego węgla sekwestrowanego w produktach leśnych (korek, drewno itp.), ponieważ są one uwalniane do atmosfery na etapach przetwarzania i wycofania z eksploatacji w wyniku rozkładu, spalania lub degradacji biologicznej. Biogeny pochłaniacz dwutlenku węgla i emisja opóźniona w lesie (drewno, kora korkowa, korzenie i liście) są utrzymywane w produkcie z korka podczas jego użytkowania aż do końca cyklu życia (biorąc pod uwagę, że spalanie z wykorzystaniem energii lub bez, składowanie z beztlenową degradacją korka i kompostowanie to etapy wycofania z eksploatacji, zależne od możliwości każdego terytorium i usług publicznych w zakresie zbierania i gospodarowania odpadami i produktami ubocznymi).

### **2.2.2 Wiązanie węgla w lasach**

Według najnowszego raportu IPCC (Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu) Organizacji Narodów Zjednoczonych z 2022 r. „Nie ma wątpliwości, że wpływ człowieka ocieplił atmosferę, ocean i ląd”. W XXI wieku globalne ocieplenie osiągnie 1,5°C i 2°C, chyba że emisje dwutlenku

węgla (CO<sub>2</sub>) i innych gazów cieplarnianych zostaną drastycznie ograniczone w następnych dziesięcioleciach. Z fizycznego punktu widzenia ograniczenie globalnego ocieplenia spowodowanego przez człowieka do wcześniej określonego poziomu oznacza ograniczenie skumulowanych emisji CO<sub>2</sub> i osiągnięcie zerowej emisji CO<sub>2</sub> netto, oprócz znacznej redukcji innych emisji gazów cieplarnianych. Chociaż ludzie są odpowiedzialni za spalanie paliw kopalnych, asymilacja i średniookresowe składowanie węgla w lasach może pomóc w redukcji emisji gazów węgłowych z paliw kopalnych.

*Quercus suber* to wyjątkowe ekosystemy, ponieważ są konsekwencją długotrwałych, tradycyjnych praktyk zarządzania przez człowieka i symbiotycznej relacji między ludźmi a środowiskiem. Lasy dębu korkowego, podobnie jak wszystkie lasy, przyczyniają się do łagodzenia zmian klimatu poprzez usuwanie (CO<sub>2</sub>) z atmosfery w procesie fotosyntezy i magazynowanie go w swoich tkankach wieloletnich podczas naturalnego procesu wzrostu oraz w glebie jako materia organiczna. Dęby korkowe to drzewa długowieczne; są w stanie magazynować węgiel przez bardzo długi czas, a ich wyjątkowo twarda kora może przetrwać długo po obumarciu dębu korkowego. To samo dotyczy produktów z korka, które są niezwykle trwałe i mogą być używane przez długi czas, a także na wysypisku śmieci (materiał z korka nie ulega łatwej degradacji), magazynując większość węgla zawartego w korze korkowej (węgiel biogeny) pozyskiwany z lasu dębu korkowego, przyczyniając się w ten sposób do zmniejszenia efektu cieplarnianego powodowanego przez gaz CO<sub>2</sub>.

Sekwestracja węgla w ekosystemach leśnych jest oceniana na podstawie równowagi między pochłanianiem węgla w procesie fotosyntezy a dwutlenkiem węgla emitowanym przez oddychanie ekosystemów (w tym rozkładem materii organicznej w glebie, która dostarcza niezbędnych składników odżywczych do życia). Stąd znaczenie pomiaru równowagi ekosystemu lub produkcji netto.

Ekosystem lasu korkowego pochłania od 2 do 14 ton CO<sub>2</sub>/ha/rok [34-38], a ilość ta zależy od rodzaju ekosystemu (łąki lub las) oraz warunków klimatycznych.

ICOS (Integrated Carbon Observation System) został opracowany przez Unię Europejską, aby wspomóc globalne wysiłki na rzecz ilościowego określenia bilansu węgla. Roczna zdolność retencji dwutlenku węgla przez lasy montado lub portugalskich lasów dębu korkowego została oceniona na podstawie badań przeprowadzonych w Portugalii. Na przykład w środkowej Portugalii (Herdade da Machoqueira) 50-letni dąb korkowy (*Quercus suber*) otwarty las z podszytem pół-liściastych gatunków krzewów i rodzimych użytków zielonych może zatrzymać do -388 g C m<sup>-2</sup> rok<sup>-1</sup> [37] (tj. 14,2 ton CO<sub>2</sub> na hektar rocznie). Jednak wystąpienie niekorzystnych warunków, takich jak suchy rok, może spowodować znaczne spadki (około 45%) sekwestracji węgla.

Zasoby węgla w lasach dębu korkowego zależą głównie od lokalizacji lasu dębu korkowego, ponieważ wpływa to na zagęszczenie drzew na hektar, okres wydobywania korka i tempo wzrostu.

Roczna zmienność sekwestracji węgla zależy również od warunków klimatycznych panujących w danym roku.

Poniższa tabela przedstawia wyniki sekwestracji węgla netto (wiązaną minus emisją lub kurs wymiany netto ekosystemu) lasu dębu korkowego według różnych badań, a także przedstawia zmienność wymiany netto CO<sub>2</sub> w zależności od warunków klimatycznych jako również końcową średnią. Wyniki wiązania węgla w badaniach często podaje się w jednostkach gCm<sup>-2</sup> rok<sup>-1</sup>, przeliczono je na wartości standardowe ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> rok<sup>-1</sup>; Ponadto, gdy badania podają zakresy wartości, zostały one przekształcone w wartość średnią w tabeli 2.2.

Tabela 2.2 Kurs netto ekosystemów (ton CO<sub>2</sub>/ha·rok).

Autor		Tona CO <sub>2</sub> /ha·rok	ekosystem	Okres	Lokalizacja
1	Pereira [34]	-3.1	dąb bezszypułkowy i dąb korkowy lesisty teren	2003-2006	Alentejo, Portugalia
2	Garcia [82]	-2,9	dąb korkowy las	2005	Katalonia, Hiszpania
3	Costa-e-Silva i in. glin. [37]	-14,2	dąb korkowy lesisty teren	2011	Środkowa Portugalia
4	Spampinato i in. [38]	-5,0	dąb korkowy lesisty teren	2017	Kalabria, Włochy
5	Montero i in. [35]	-1,9*	dąb korkowy las i las	2004	Hiszpania

\*Wynik ilorazu całkowitego rocznego przyrostu biomasy (1.031.232 ton ekwiwalentu CO<sub>2</sub>) podzielonego przez obszar występowania dębu korkowego w Hiszpanii (541,179 ha według danych INIA-CSIC).



Pomiar biomasy, podawany jako sucha masa, określa ilościowo ilość węgla związanego w ekosystemach leśnych, jak również porównywalną ilość dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>) usuniętego z atmosfery. Węgiel związany w tkankach roślin (drewno, liście itp.) stanowi około połowy biomasy, podczas gdy ekwiwalent dwutlenku węgla oblicza się, mnożąc zawartość węgla w biomacie przez stosunek mas cząsteczkowych węgla bezwodnikowego do węgla elementarnego.

Stosowanie korka jest ściśle związane z sekwestracją CO<sub>2</sub>. Okresowa ekstrakcja korka powoduje, że dęby korkowe produkują od 250% do 400% więcej korka [39], niż gdyby korek nie był usuwany (po usunięciu korka drzewo szybko zaczyna wytwarzać nową korę, aby się chronić), zwiększając w ten sposób fiksację CO<sub>2</sub>. Zrównoważone zarządzanie i eksploatacja lasu dębu korkowego, dzięki komercyjnej eksploatacji tego materiału, sprzyja powstawaniu większej ilości korka, a tym samym większej sekwestracji CO<sub>2</sub> [40]. Ponadto te produkty z korka mogą mieć okres użytkowania wynoszący lata (takie jak zatyczki korkowe) lub dziesiątki lat (takie jak podłogi i inne materiały budowlane). W rzeczywistości nadal nie ma dogłębnych badań nad wpływem recyklingu zatyczek korkowych na wydłużenie okresu użytkowania korka, na przykład inicjatywy dotyczące stosowania zatyczek z korka z recyklingu i granulatu w zastosowaniach miejskich, takie jak te promowane przez katalońską organizację Catalan Cork Institute Foundation. W fazie wycofania z eksploatacji uwzględniono również biogenne emisje węgla. W szczególności uznano, że w przypadku spalania cały węgiel biogeny zawarty w produktach z korka jest emitowany z powrotem do atmosfery (po okresie użytkowania produktów z korka). W przypadku składowania uważa się, że tylko 2% węgla biogenego zawartego w przedmiotach zostaje uwolnione, a pozostała część pozostaje trwale zatrzymana na składowisku [41]. Wydłużenie jego okresu użytkowania pozwala na wydłużenie jego charakterystyki neutralności węglowej do momentu jego rozkładu lub wykorzystania energetycznego.

Zbiór korka odbywa się latem (od maja do sierpnia) po osiągnięciu przez drzewo 0,7 m (Portugalia), 0,65 m (Katalonia i Andaluzja) lub 0,60 m (Estremadura) w obwodzie na 1,3 m z ziemi. Na tym samym drzewie dwa kolejne korowania są oddzielone od siebie odstępem co najmniej 9 lub 14 lat (w zależności od terytorium). Pierwszy zbiór korka (ekstrakcja kory korkowej) może mieć miejsce, gdy średnica pnia jest wystarczająco duża. Pierwsza wydobyta kora nazywana jest pierwotnym korkiem i ze względu na nieregularności na zewnętrznej powierzchni jest zwykle rozdrabniana i wykorzystywana do celów budowlanych. Obecnie ten pierwszy korek przeznaczony jest dla przemysłu granulacji korka do produkcji granulatu, który będzie aglomerowany do produkcji wyrobów z czarnego korka wykorzystywanych jako izolacja w budownictwie.

Po pierwszym usunięciu korka, między 9 a 14 rokiem życia, ma miejsce drugi zbiór korka. Ten korek drugiej ekstrakcji nazywany jest korkiem wtórnym (*matxot* po katalońsku, *segundero* po hiszpańsku, *secundeira* po portugalsku), a ponieważ jego właściwości nie są optymalne do produkcji zatyczek

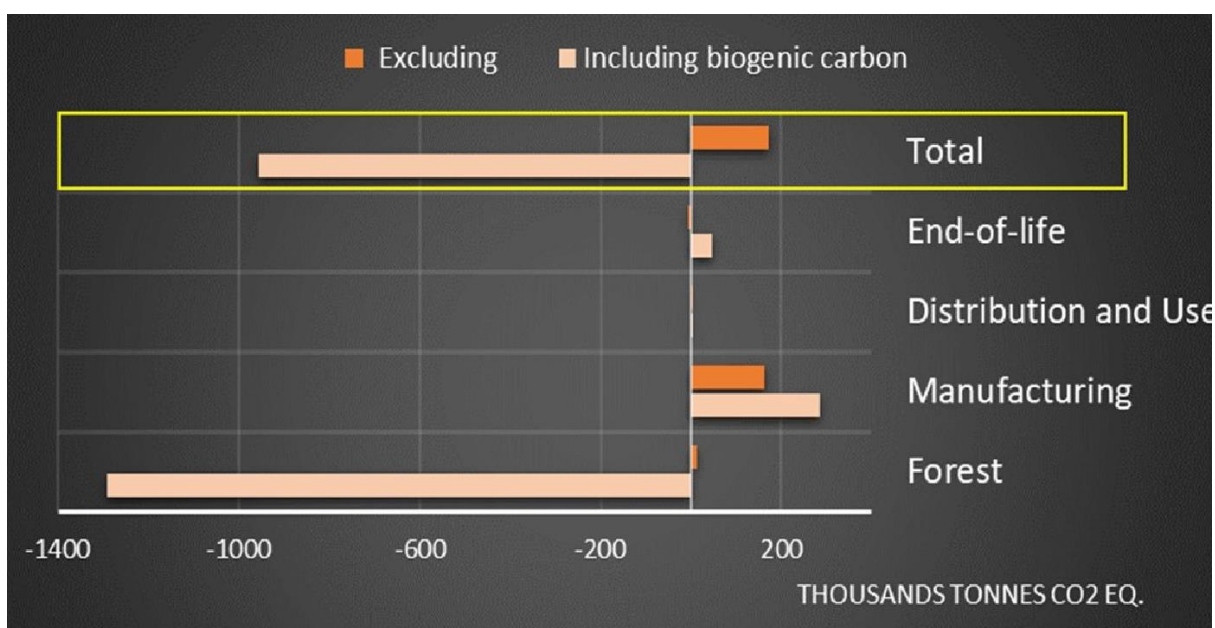
korkowych (wykorzystanie najwyższej wartości dodanej), jest on wysyłany do przemysł granulacji do produkcji białego korka granulowanego do izolacji i innych wyrobów z korka aglomerowanego.

Trzecie usuwanie korka i kolejne usuwanie korka dają bardziej jednolite deski korkowe. Korek reprodukcyjny jest używany do produkcji zatyczek z korka naturalnego dla przemysłu winiarskiego do zamykania butelek wina oraz krążków z korka naturalnego do montażu zatyczek z korka aglomerowanego (tzw. korków technicznych) do win musujących. Butelki do wina musującego mają wewnętrzne ciśnienie i techniczne korki, które skuteczniej uszczelniają butelki. Korek uzyskany w wyniku przycinania gałęzi i nierównych pni drzewa korkowego daje produkt uboczny korka znany jako korek martwego drewna (*suro pelut* po katalońsku lub *falca* po portugalsku), który jest mieszanką kilku odmian korka, kory wewnętrznej i drewna. Po oddzieleniu korka od drewna uznaje się go za gorszej jakości (korek pierwotny i drugi) i jest rozdrabniany i aglomerowany w celu wykorzystania do tworzenia materiałów budowlanych.

Uważa się, że 150-200 lat to maksymalny wiek eksploatacyjny dębu korkowego [37]. Gęstość drzew w lesie korkowym różni się znacznie w zależności od regionu (50–150 drzew na hektar), a dla analiz LCA w fazie produkcji korka można przyjąć średnią gęstość 100 drzew na hektar. Produkcja korka leśnego może się znacznie różnić w zależności od terytorium, co wskazuje na różne warunki klimatyczne i ekologiczne, które z kolei wpływają na zagęszczenie drzew, tempo rozwoju drzew korkowych i intensywność usuwania korka. Na przykład możemy obliczyć produkcję 1,49-3,48 ton surowego korka ogółem na hektar w katalońskim lesie [42].

Istnieją dwa główne modele zarządzania lub ekosystemy drzewostanów dębu korkowego: systemy rolno-pastwiskowe (głównie w Portugalii i południowej Hiszpanii) oraz systemy leśne (tj. Katalonia i południowa Francja). Pochodzą one z różnych poziomów oddziaływania, które w systemach leśnych są zwykle znacznie niższe [41]. Gorące punkty środowiskowe w obu modelach są różne. W systemie leśnym są one związane ze sprzężaniem, utrzymaniem dróg oraz transportem pracowników i korków. W systemach rolno-leśno-pasterskich są to nawożenie, przycinanie i czyszczenie. Dwa kryteria alokacji oddziaływań na środowisko znacząco wpływają na wyniki uzyskiwane dla korka pierwotnego w systemach rolno-leśno-pastwiskowych oraz dla korka pierwotnego i wtórnego w systemach leśnych. Porównanie skutków stwierdzonych dla pierwotnego i wtórnego korka w Portugalii i Katalonii pokazuje, że wpływy w Katalonii są znacznie mniejsze ze względu na mniej intensywne procedury zarządzania opisane powyżej. Zarówno Portugalia (region Alentejo), jak i Katalonia w różny sposób dbają o swoje lasy dębu korkowego. W Portugalii drzewostany dębu korkowego to intensywnie utrzymywane systemy rolno-leśno-pastwiskowe charakteryzujące się niskim zagęszczeniem drzew. Systemy leśne w Katalonii charakteryzują się większym zagęszczeniem drzew, mniejszą liczbą operacji zautomatyzowanych i brakiem nawożenia. Ze względu na te różnice korek produkowany w Portugalii ma zwykle większy wpływ na środowisko niż korek produkowany w Katalonii [41].

Model śladu węglowego Cork (CCFM), opracowany dla portugalskiego sektora korkowego [33], można ekstrapolować na inne terytoria korkowe, takie jak Hiszpania. Dowodzi to, że sektor korka jest pochłaniaczem dwutlenku węgla; oznacza to, że sektor korkowy jako całość zatrzymuje więcej CO<sub>2</sub> niż emituje do atmosfery podczas produkcji wyrobów z korka. Rysunek 2.11 pokazuje, że dwutlenek węgla pobierany przez las do celów biologicznych jest większy niż emisja gazów cieplarnianych (GHG) całego sektora, w tym węgla biogenicznego. Rysunek pokazuje również, że procesami emitującymi najwięcej gazów cieplarnianych jest wytwarzanie produktów aglomerowanych, głównie ze względu na żywice, które są mieszane z granulatem korka podczas produkcji korka aglomerowanego. Na podstawie tej liczby staje się jasne, że lasy dębu korkowego i produkty korkowe uzyskane w wyniku pozyskiwania korka mogą potencjalnie złagodzić efekt cieplarniany poprzez zmniejszenie emisji dwutlenku węgla do atmosfery.



Rysunek 2.11 Ślad węglowy Cork według sektorów obliczony za pomocą Cork Carbon Footprint Model [43].

### 2.2.3 Cykl życia produktów z korka

Opracowanie i wdrożenie zasad dotyczących kategorii produktów (PCR) mogłoby być korzystne w przypadku produktów z korka, ponieważ umożliwiłoby porównanie różnych badań i pomogłoby uniknąć błędnych obliczeń dzięki zapewnieniu znormalizowanej metodologii. W rzeczywistości, w momencie pisania tego dokumentu, Hiszpański Komitet Techniczny ds. Standaryzacji (CTN 56 SC5), odpowiedzialny za standaryzację produktów z korka i kierowany przez Fundację Katalońskiego Instytutu Korka, opracowuje metodę PCR w celu ujednoczenia metodologii obliczania śladu środowiskowego różnych rodzajów zatyczek korkowych. W literaturze możemy znaleźć kilka badań

LCA dotyczących wpływu na środowisko głównych produktów z korka. Na przykład zatyczki z naturalnego korka, zatyczki z korka szampańskiego i korkowe podłogi pływające. Obecnie w Katalonii aktualizowana jest zintegrowana analiza środowiskowa niektórych produktów z korka [44].

Dzięki zastosowaniu LCA możliwa jest ocena wszystkich użytych materiałów, zużytych paliw kopalnych i odnawialnych oraz wszystkich wynikających z nich emisji w celu znalezienia najbardziej wpływowych faz, które można zmodyfikować w celu zmniejszenia całkowitego wpływu produkcji wyrobów z korka na środowisko. Dane dotyczące głównych punktów zapalnych procesu produkcyjnego (kocioł i gospodarka leśna) mogą być analizowane przez przemysł w celu wdrożenia działań usprawniających i zmniejszenia ostatecznego wpływu na środowisko, a także strategii wycofania z eksploatacji. Ponieważ te dwa procesy mają największy wpływ na wszystkie oceniane kategorie efektów, przemysł korkowy mógłby osiągnąć lepsze wyniki w zakresie ochrony środowiska, koncentrując się na tych dwóch aspektach. Na przykład w przypadku gospodarki leśnej można zastosować podejście alternatywne, zmieniając częstotliwość działań, takich jak wycinanie spontanicznej roślinności lub nawożenie; należy to jednak dokładnie zbadać, aby nie zmniejszać produktywności lasów, co byłoby szkodliwe dla śladu węglowego.

Jak wskazano wcześniej, zamaskowany węgiel pozostaje w biomase dębu korkowego, a następnie w produktach z korka, dopóki nie zostanie uwolniony do atmosfery w wyniku spalania lub rozkładu. Weźmy pod uwagę etap leśny (w tym działania związane z zarządzaniem dębem korkowym), etap produkcyjny (w tym różne procesy produkcji wyrobów z korka), etap użytkowania (w tym transport zużytych produktów z korka do miejsc dystrybucji) oraz koniec etap życia (w tym strategie zarządzania recyklingiem, kompostowaniem, spalaniem lub wytwarzaniem energii i składowaniem). Opisano również sekwestrację CO<sub>2</sub> na etapie lasu (podczas wzrostu dębu korkowego). Biorąc pod uwagę biogenne emisje i magazynowanie CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> magazynowane w samym materiale korka), należy zauważyć, że miejsce wycofania z eksploatacji ma znaczny wpływ na wyniki, ponieważ może je znacznie zmienić. Nie można założyć, że cały węgiel biogeny obecny w pętli systemowej przetrwa. Biorąc pod uwagę, że zatyczki z korka pochodzące z recyklingu mogą być wykorzystywane do tworzenia innych wyrobów z korka aglomerowanego (np. budowlanych), Demertzi [33] oblicza, że 30% surowca jest zawarte w gotowym produkcie. Uważa się, że w przypadku recyklingu 30% węgla zawartego w zatyczkach z korka naturalnego pozostaje w systemie bez uwalniania do atmosfery, natomiast 70% węgla biogenego zawartego w korkach z korka naturalnego jest uwalniane do atmosfery (w wyniku spalanie pyłu korkowego). W przypadku uwzględnienia w obliczeniach węgla biogenego, sekwestracja CO<sub>2</sub> w fazie leśnej jest uważana za emisję ujemną, ponieważ zmniejsza ilość CO<sub>2</sub> w atmosferze.

Zgodnie z normą ISO 14067:2018 *Gazy cieplarniane — Ślad węglowy produktów — Wymagania i wytyczne dotyczące oznaczania ilościowego*, gdy węgiel biogeny jest przechowywany w produkcie

przez ponad 10 lat, należy go udokumentować i waloryzować, ale nie należy go uwzględniać w bilansie węglowym ślad stopy.

Wartości procentowe stosowane dla ostatecznych miejsc przeznaczenia różnych produktów z korka powinny opierać się na głównych ostatecznych miejscach przeznaczenia stałych odpadów komunalnych i strategiach recyklingu. Recykling znacznie wydłużyłby okres użytkowania w całym sektorze korka. Należy wziąć pod uwagę, że według ECOVIDRIO (podmiot non-profit odpowiedzialny za zarządzanie recyklingiem wszystkich szklanych odpadów opakowaniowych w Hiszpanii) w 2020 r. Według ECOEMBES (organizacji non-profit, która nadzoruje recykling odpadów umieszczanych w żółtych i niebieskich pojemnikach), w całej Hiszpanii winiarnie stosujące się do Zintegrowanego Systemu Gospodarki Odpadami zadeklarowały 3700 ton zatyczek korkowych. W związku z tym sektory korka i wina mają duży potencjał w zakresie recyklingu zatyczek korkowych i wydłużania ich żywotności dzięki innym zastosowaniom, a tym samym wydłużaniu czasu, zanim węgiel biogeny ostatecznie przedostanie się do atmosfery.

W zależności od ocenianej kategorii skutków można wybrać wiele rozwiązań w zakresie zarządzania końcowym zastosowaniem, takich jak składowanie, spalanie, produkcja energii, kompostowanie i recykling. Niektóre alternatywy mogą przynieść najlepsze efekty środowiskowe w zakresie zmian klimatu, zubożenia warstwy ozonowej i zakwaszenia, podczas gdy inne mogą zapewnić najlepsze wyniki środowiskowe w zakresie fotochemicznego wytwarzania ozonu oraz wyczerpywania zasobów mineralnych i kopalnych. W większości kategorii wpływu na środowisko opcja składowania nie zapewnia optymalnej wydajności.

Jednak gdy emisja biogenego dwutlenku węgla jest oceniana pod kątem kategorii związanej ze zmianą klimatu, okazuje się, że opcja recyklingu jest najbardziej wydajna, ponieważ większość biogenego węgla zostałaby prawie trwale zatrzymana w produktach z korka i nie zostałaby uwolniona do atmosfery. Sekwestracja CO<sub>2</sub> w produktach korkowych do różnych zastosowań opiera się na wcześniejszych oznaczeniach zawartości węgla w różnych materiałach korkowych. Znajomość ilości węgla biogenicznego w różnych typach materiałów pozwala inżynierom, architektom, projektantom i innym technikom oszacować w łatwy sposób ilość CO<sub>2</sub> sekwestrowanego w produktach z korka podczas ich używania w bardzo różnych zastosowaniach. Z drugiej strony, patrząc z szerszej perspektywy, można uznać, że wyroby z korka, ze względu na swoje właściwości fizyko-mechaniczne, są substytutem tworzyw sztucznych, których produkcja jest znacznie bardziej energochłonna i pochodzą ze źródeł energii i innych niż -materia odnawialna. Obliczenia te są aktualnym problemem i mają coraz większe znaczenie przy porównywaniu materiałów, mając na uwadze potrzebę osiągnięcia neutralności pod względem emisji dwutlenku węgla. Przykład takich obliczeń można znaleźć w pracy Gila [31] (Tabela 2.3).

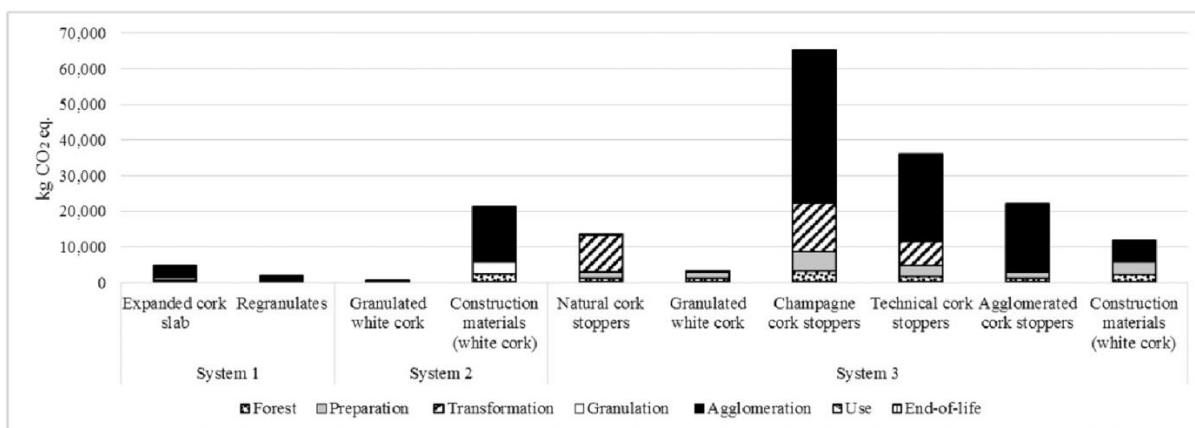
Tabela 2.3 Zawartość CO<sub>2</sub> w różnych produktach z korka [31].

Produkt	g CO <sub>2</sub> /produkt	g CO <sub>2</sub> / g produktu
Korek musujący (aglomerowany 2 krążkami korka)	16,5	1,90
Korek do wina niegazowanego (korek naturalny)	10.6	1,89
Agglomerowany korek do wina niemusującego	9.3	1,90
Korek mikroaglomerowany do wina niemusującego	7.9	1,47
Płyta z korka ekspandowanego (szerokość 40 mm)	-	2.27
Złącze rozszerzone (szerokość 12 mm)	-	1,93

Korki naturalne mają 100% korka; w rzeczywistości, aby zatyczka została uznana za „zatyczkę korkową”, musi zawierać co najmniej 65% masy korka w swoim składzie [45]. Inne materiały na bazie korka również mają znaczną zawartość węgla, od około 55% do około 65% (wag./wag.), co odpowiada wysokiej sekwestracji węgla w tych materiałach. Biorąc pod uwagę ten aspekt oraz fakt, że materiały korkowe mają dość długą żywotność, którą można wydłużyć po pierwszym użyciu poprzez recykling, są to materiały z wyboru do tak zwanych „zielonych” i zrównoważonych zastosowań.

#### **2.2.4 Wartości śladu węglowego**

Branża korkowa wyróżnia się szeroką gamą wyrobów z korka. Rysunek 2.12 przedstawia najbardziej reprezentatywne produkty z korka wytwarzane z różnych rodzajów korka: produkty budowlane z czarnego aglomerowanego korka i granulki (z korka martwego drewna i korka pierwotnego), produkty budowlane z białego aglomerowanego korka i granulki (z martwego drewna i wtórnego korka reprodukcyjnego), zatyczki z naturalnego korka i krążki oraz zatyczki z korka aglomerowanego i materiały budowlane (z korka reprodukcyjnego). Produkty te stanowią 97,6% wszystkich produktów z korka sprzedawanych w Portugalii [46], w Hiszpanii prawie 100% wytwarzanych produktów z korka to zatyczki korkowe. Pozostała część materiału korkowego to głównie surowce i wyroby dekoracyjne, kompozyty oraz arkusze korka stosowane w wyrobach modowych, a obecnie brak jest danych dotyczących emisji gazów cieplarnianych podczas ich wytwarzania.



Rysunek 2.12 Wyjście śladu węglowego modelu dla najbardziej reprezentatywnych produktów końcowych przemysłu korkowego, z wyłączeniem biogenicznego węgla i sekwestracji lasów [48].

Całkowity ślad węglowy sektora korkowego można znacznie zmniejszyć, jeśli weźmiemy pod uwagę sekwestrację dwutlenku węgla na etapie leśnym. Wiadomo, że 79% węgla sekwestrowanego w fazie leśnej jest zmagazynowanym drewnem, korzeniami i liśćmi drzewa korkowego, podczas gdy pozostałe 21% jest zachowane w surowym korku [48]. Jeśli weźmiemy pod uwagę najlepsze warunki do sekwestracji węgla w lesie ( $14,2 \text{ tony CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$ ) i średnią produktywność 1,5 tony z hektara, to mamy, że na każdy kilogram korka pochłania się  $-9,5 \text{ kg CO}_2$ . To obliczenie wiązania węgla w lasach można wycenić razem z wynikiem obliczenia śladu węglowego, aby lepiej zrozumieć pozytywny wpływ zastosowania materiału korkowego.

Uzyskanie jak najbardziej zbliżonej do rzeczywistości wartości sekwestracji dwutlenku węgla jest ważne z punktu widzenia rolnictwa węglowego. Rolnictwo węglowe można zdefiniować jako ekologiczny model biznesowy, który nagradza zarządców gruntów za przyjmowanie ulepszonych praktyk gospodarowania gruntami, które zwiększają sekwestrację dwutlenku węgla w żywej biomase, martwej materii organicznej i glebie poprzez zwiększanie wychwytywania dwutlenku węgla i/lub zmniejszanie jego uwalniania do atmosfery, przy jednoczesnym przestrzeganiu zasad ekologicznych, które są korzystne dla różnorodności biologicznej i kapitału naturalnego jako całości. Zachęty finansowe mogą pochodzić ze źródeł publicznych lub prywatnych i mogą wynagradzać zarządców gruntów albo za ich techniki gospodarowania, które zwiększają sekwestrację dwutlenku węgla w atmosferze, albo za ilość sekwestrowanego dwutlenku węgla. Uprawa węgla byłaby nowym źródłem dochodów dla zarządców gruntów, którzy w wielu przypadkach mogliby również czerpać korzyści z ogólnie bardziej żyznych i odpornych gruntów. Ponadto metody uprawy węgla często generują dodatkowe korzyści dla różnorodności biologicznej, poprawiają usługi ekosystemowe i pomagają zarządcom gruntów w zwiększaniu odporności na zmianę klimatu

## 2.3 Potencjalne zastosowania korka

### 2.3.1 Główne właściwości korka

Korek to naturalna substancja pozyskiwana z zewnętrznej kory dębu korkowego. Dąb korkowy (*Quercus suber* L.) jest rodzimym gatunkiem lasów zachodniego regionu Morza Śródziemnego. Korek to specyficzna substancja. Jest lekki i wodoodporny, dzięki czemu nadaje się na splawiki. Służy do zatykania butelek, ponieważ jest ściśliwy i nieprzepuszczalny dla płynów. [34]. Jego wyjątkowo niska przewodność cieplna sprawia, że jest doskonałym izolatorem izolatorów ablacyjnych używanych do ochrony statków kosmicznych przed wysokimi temperaturami, a jego zdolność pochłaniania energii jest również wykorzystywana w innych zastosowaniach lotniczych. Ale dlaczego materiał z korka ma takie właściwości?

W XVII wieku Robert Hooke pokroił mały kawałek korka, umieścił go pod mikroskopem, skupił na nim światło słoneczne za pomocą grubej soczewki i oglądał okaz przez okular. Hooke porównał to, co zaobserwował, do plastra miodu. Struktura korka składała się z wielu małych, pustych komórek, oddzielonych cienkimi ścianami. Przedziały określano jako „pory lub komórki”. Oceniał, że na całym powierzchni korka przypada około tysiąca dwustu milionów tych komórek. Hooke odkrył mikroskopijną strukturę korka. Uważał, że mikroskopijna struktura korka jest odpowiedzialna za jego makroskopowe właściwości. I to, co przewidział, było prawdą, ale nie zdawał sobie sprawy, że istnieje jeszcze jeden czynnik wyjaśniający wielorakie właściwości korka [49].

Właściwości materiału są określane przez właściwości chemiczne jego składników, a także ich względne ilości i rozkłady (rysunek 2.13). Podobnie jak w przypadku innych materiałów komórkowych, składniki chemiczne korka znajdują się na powierzchniach komórek i krawędziach komórek, tworząc trójwymiarową sieć stałej matrycy, która otacza wypełnione powietrzem puste komórki. Wiele unikalnych cech korka jest bezpośrednio związanych z jego składem chemicznym, podczas gdy inne, takie jak zachowanie mechaniczne i interakcja z płynami, są wynikiem zarówno cech strukturalnych na poziomie komórkowym, jak i struktury chemicznej ściany komórkowej. Tak więc fizyczne i mechaniczne właściwości korka wynikają z budowy komórkowej i składu chemicznego ściany rośliny (suberyna, lignina, polisacharydy).

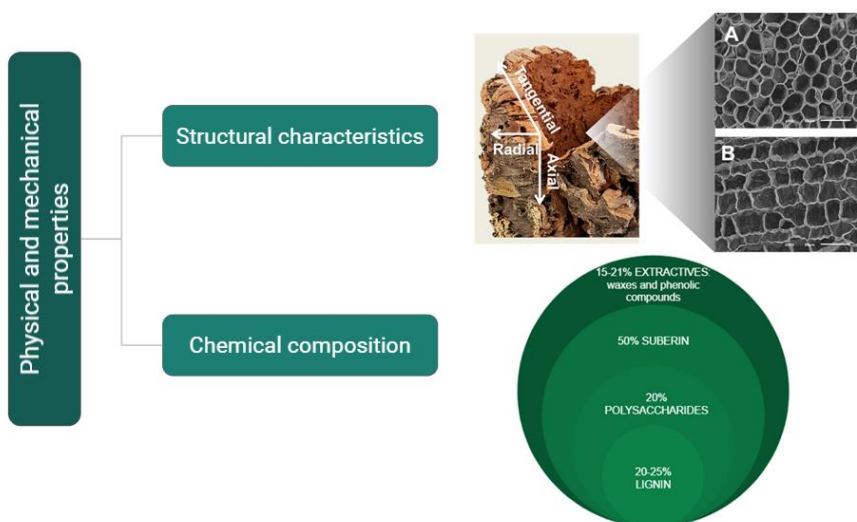
W tym podrozdziale podsumowano wiedzę na temat głównych właściwości korka, a także odniesiono się do jego składu chemicznego i struktury.

#### Charakterystyka strukturalna

Makroskopowa struktura komórkowa korka jest szeroko ustalona i dobrze znana, ale jej mikroskopowa struktura pozostaje słabo poznana. Po wzroście komórki korka są pozbawione cytoplazmy i stają się puste. Powszechnie uznaje się, że ściana komórkowa jest zwiniętą strukturą zbudowaną ze ściany pierwotnej, która jest głównie utworzona z celulozy, ściany wtórnej, która jest



złożona z blaszkowatych osadów suberyny i, do pewnego stopnia, ligniny, oraz ściany trzeciorzędowej, który składa się z polisacharydów. Powstała struktura składa się ze zbioru pustych komórek. Korek jest substancją anizotropową. Przekrój w kierunku promieniowym (powierzchnia prostopadła do kierunku wzrostu kory) przypomina plaster miodu z wielokątnymi komórkami o czterech do dziewięciu bokach [1]. Przekroje styczne i osiowe są porównywalne morfologicznie, a budowa przypomina ścianę z cegły (komórki graniastosłupowe) [2].



Rysunek 2.13 Schematyczne przedstawienie właściwości fizycznych i mechanicznych korka: charakterystyka strukturalna i skład chemiczny. Mikrofotografie SEM pobrane z małej kostki korkowej (a) przekrój styczny i (b) przekrój promieniowy [50].

Korek ma godną uwagi liczbę właściwości, które są unikalne w naturalnie występujących materiałach. Szacuje się, że w 1 cm<sup>3</sup> korka znajduje się od 15 do 40 milionów komórek. Każda komórka ma średnio około 40 μm, z czego 10 μm odpowiada ścianie komórkowej.

#### Skład chemiczny

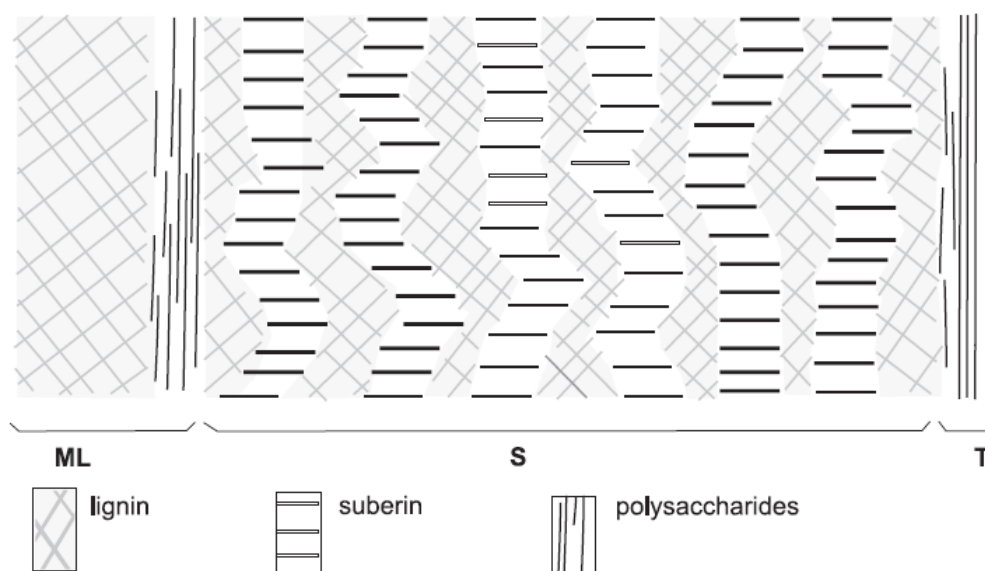
Skład korka zaczął badać Brugnatelli w 1787 r. Suberin jest głównym związkem korka i został zidentyfikowany przez Cheureula w 1807 r. Od tego czasu do dziś nadal bada się skład korka i jego strukturę makromolarną, nadal nie ma wyraźnych modeli.

Skład chemiczny korka jest zdominowany przez obecność suberyny jako głównego składnika strukturalnej ściany komórkowej oraz przez jej ścisły związek z innymi składnikami, głównie ligniną i nieligninowymi aromatami. Skład chemiczny korka znacznie różni się od składu chemicznego pozostałych części tkanki drzewa. Jego specyfika powoduje pewne luki w znajomości struktury składu chemicznego korka. Oprócz składu i właściwości chemicznych jego składników, pełniejsze zrozumienie chemiczne korka wymaga znajomości jego rozmieszczenia w ścianie komórkowej, znanej jako topochemia ściany komórkowej, oraz ich ewentualnej interakcji.

Metodologia zastosowana przy określaniu składu chemicznego, a także inne aspekty, takie jak pochodzenie, stan fizjologiczny czy liczba próbek, mogą warunkować wyniki. Z tego powodu, jeśli mówi się o składzie chemicznym korka, podaje się rangę każdej rodziny związków. Składniki strukturalne ściany komórkowej to suberyna (około 50%), lignina (20-25%) i polisacharydy (około 20%), celuloza i hemicelulozy; ekstrakcyjne (14-18%), w skład których wchodzi substancje lipidowe i fenolowe oraz składniki nieorganiczne (1-2%) [1] (Rysunek 2.13).

- Suberyna jest polimerem złożonym z kwasów tłuszczowych, alkoholi i glicerolu, a mianowicie długołańcuchowych łańcuchów alifatycznych połączonych wiązaniami estrowymi i głównie glicerydowymi miejscami kotwiczenia. Suberyna jest głównym składnikiem strukturalnym ściany komórkowej korka (stanowi ponad pięćdziesiąt procent jego stałej masy) [34,51]
- Lignina jest usieciowanym polimerem aromatycznym, który przyczynia się do sztywności strukturalnej i odporności komórek na ściskanie. Lignina składa się z trzech monomerów fenylopropanu: p-hydroksyfenylu (H), gwajakolu (G) i syringylu (S) [34,52].
- W rozwoju ściany komórkowej korka polisacharydy odgrywają niewielką rolę. Strukturalne polisacharydy ścian komórkowych roślin składają się z celulozy i hemiceluloz [34].
- Ekstrakty to cząsteczki o małej lub średniej masie cząsteczkowej, które można wyekstrahować z komórek bez zmiany struktury komórkowej materiału lub jego właściwości mechanicznych [14].
- Składnikami nieorganicznymi materiałów lignocelulozowych są zazwyczaj zawartość popiołu, który stanowi stałą pozostałość po całkowitym spalaniu.

W ścianie komórkowej suberyna, lignina i frakcje hemicelulozowe tworzą przestrzennie stabilny i odporny chemicznie zespół, co sprawia, że ich frakcjonowanie jest bardzo trudne, niezależnie od zastosowanej techniki. Pereira [34] schematycznie przedstawił budowę ściany komórkowej korka (rys. 2.14). Macierz ligninowa blaszki środkowej wiąże ze sobą komórki i wzmacnia strukturę jako całość. Warstwy ligninowe i aromatyczne między blaszkami suberyny nadają również strukturalną solidność ścianom komórkowym, służąc jako rodzaj rusztowania dla elastycznego składnika alifatycznego. Strona światła komórki jest wyłożona celulozową ścianą trzeciorzędową.



Rycina 2.14 Schematyczne przedstawienie ścian komórkowych korka w *Quercus suber*, pokazujące rozmieszczenie elementów strukturalnych [34].

### Właściwości korka

Korek ma niezwykłą kombinację właściwości, w tym niską gęstość, bardzo niską przepuszczalność cieczy i gazów, niskie przewodnictwo, stabilność chemiczną, trwałość, wysoką ściśliwość z dobrym odzyskiem i niską przewodność. Jak wspomniano wcześniej, cechy struktury komórkowej korka (rozmieszczenie komórek, wielkość komórek i pofałdowania ścian komórkowych) oraz skład chemiczny ścian komórkowych wyjaśniają te właściwości. Zawartość wody wpływa na wiele właściwości korka, a obróbka cieplna zmienia rozmiar komórek i skład chemiczny. Sama masa korka wydaje się być jednolita i pozbawiona rozróżnienia typu komórek. Jedyną wyróżniającą cechą makroskopową korka jest naturalna obecność przetchlinek. Kanały soczewkowate przechodzą przez warstwy korka z zewnątrz do wnętrza tkanki fellogenu i są wypełnione materiałem niesuberyfikowanym o głębszym odcieniu [34].

Duża ilość gazu, niska zdolność adsorpcji wody i pomiar komórkowy, między innymi, sprawiają, że korek ma dużą wszechstronność i może być używany do wielu celów. Fizyczne, mechaniczne i termiczne właściwości korka można streścić w dziesięciu punktach czyli w dekalogu korka [89].

1. Niska gęstość i lekkość [1].

Korek to lekki materiał, który unosi się na wodzie. Wynika to z jego struktury komórkowej utworzonej z pustych i zamkniętych komórek z niewielką frakcją stałą, która jest skoncentrowana w cienkich ścianach komórkowych, bez żadnych kanałów komunikacji międzykomórkowej. Gęstość wysuszonej na powietrzu tkanki korkowej jest niska, średnio w zakresie 150-160 kg/m<sup>3</sup>, ale przy

wartościach, które mogą wahać się od poniżej 120 do ponad 200 kg/m<sup>3</sup>. Gęstość korka będzie się różnić w zależności od następujących cech strukturalnych: wielkość komórek, proporcja korka wczesnego (komórki utworzone w pierwszym okresie wzrostu) i korka późnego (komórki utworzone pod koniec sezonu wegetacyjnego), pofałdowanie komórek, stopień porowatości pochodzącej z kanalików soczewkowatych oraz obecność wtrąceń drzewiastych. Ta jedna cecha była szeroko stosowana we wszystkich elementach pływających.

## 2. Nieprzepuszczalność i wodoodporność [1].

Ponieważ komórki korka są w około 90% zajęte przez powietrze, można by pomyśleć, że ciecz może wypełnić tę pustą przestrzeń. Hydrofobowe zachowanie korka w kontakcie z parą wodną i ciekłą wodą wynika z jego struktury z pustymi komórkami bez komunikacji międzykomórkowej i ścianą komórkową zawierającą suberynę jako główny składnik chemiczny. Obecność suberyny, ligniny i wosków w ścianie komórkowej sprawia, że korek jest materiałem nieprzepuszczalnym dla płynów, co zapobiega jego psuciu się. Jednak jego nieprzepuszczalność dla gazów nie jest absolutna, ponieważ umożliwia powolną dyfuzję gazów. Korki korkowe są wodoszczelne i mają szybkość przenoszenia tlenu od 0,004 do 0,14 mg/dzień po roku butelkowania [54-56]. Wysoka zawartość gazu ma niską przewodność, mały rozmiar komórek eliminuje konwekcję gazu, niski udział części stałych i niska zdolność adsorpcji dzięki licznym ścianom komórkowym sprawiają, że korek ma niską przewodność cieplną. Fale cieplne rozpraszają się i rozprzestrzeniają po jego powierzchni, czyniąc go dobrym izolatorem termicznym. Jednocześnie jest oddychający i niepalny, co czyni go wyjątkowym regulatorem klimatu. Przewodność cieplna ( $\lambda$ ) i dyfuzyjność cieplna ( $\alpha$ ) korka o gęstości 140-170 kg/m<sup>3</sup> wynosi 0,040-0,045 W/m·K,  $1 \times 10^{-7}$  -  $1,5 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup> · s<sup>-1</sup> odpowiednio. Podczas podgrzewania korka zachodzą zmiany chemiczne i fizyczne, które wpływają na masę ścian komórkowych, ich skład i wymiary komórkowe. Zmiany te wpływają na właściwości, czyli właściwości mechaniczne, w stopniu zależnym od temperatury i czasu obróbki. Ubytek masy korka jest stosunkowo niewielki (około 6% początkowej masy) do temperatury 200°C, ale potem wzrasta aż do całkowitego zwęglenia w temperaturze około 450°C.

## 3. Niska przepuszczalność dźwięku i izolacyjność akustyczna [57-59].

Korek wykazuje bliski zeru współczynnik Poissona (około 0,2) dla NR/NR [57], niską gęstość i wysoką porowatość. Właściwości korka pozwalają maksymalnie wykorzystać fale dźwiękowe, które są pochłaniane i przekształcane w energię cieplną. Impedancja akustyczna korka wynosi  $1,2 \times 10^5$  kg·m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> dla korka naturalnego 120-200 kg/m<sup>3</sup> [58]. Korek jest bardzo chłonny dla niskich i średnich częstotliwości. Jest to dobra właściwość izolacyjna dla perkusji akustycznej; z tego powodu może być stosowany w podłogach laminowanych [59].

#### 4. Wysoka odporność na ruch i wysoki współczynnik tarcia [34,58].

Struktura komórkowa powoduje efekty ssące. Opór ruchu stawiany przez korek na powierzchni jest właściwością interesującą zwłaszcza w dwóch przypadkach: ekstrakcji korków z butelek, w których korek porusza się po szklanej powierzchni, oraz stosowania produktów z korka jako materiałów nawierzchniowych, czasem z anty-śliskie cele [34]. Ta właściwość jest bardzo ważna w zatyczkach korkowych, aby zapewnić prawidłowe zamknięcie butelek i ich konserwację w czasie. Współczynnik tarcia dla kork-szkło wynosi 0,35-0,76 [58].

#### 5. Zdolność buforowania i zdolność pochłaniania energii uderzenia (tłumienie).

Struktura komórkowa umożliwia odkształcenie przez zginanie ścianek komórek, tak jak w poprzednich przypadkach propagacja fal mechanicznych może rozprasać się na powierzchni. Naprężenie zapadające się komórek korka jest niskie, więc szczytowe naprężenie podczas uderzenia jest ograniczone, podczas gdy możliwe są duże naprężenia ściskające, pochłaniające dużo energii w miarę stopniowego zapadania się komórek. Całkowita energia ściskania do odkształcenia 83% wynosi około  $3,4 \times 10^6 \text{ J/m}^3$  i  $2,2 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ , odpowiednio dla kierunku promieniowego i niepromieniowego. Część odpowiadająca deformacji do końca plateau zawalenia wynosi około  $1,5 \times 10^6 \text{ J/m}^3$  [34]. Właściwość ta jest bardzo ważna w niektórych zastosowaniach, takich jak zdolność amortyzacji w połączeniach „sejsmicznych”, podeszwach obuwia w przemyśle motoryzacyjnym lub matach.

#### 6. Ścisłość, sprężystość i elastyczność [1,60].

Wysoka zawartość powietrza w komórkach i bliski zeru współczynnik Poissona pozwala na ściśnięcie korka prawie do połowy bez utraty elastyczności oraz odzyskanie kształtu i objętości po zaprzestaniu prasowania. Korek nie pęka pod wpływem ściskania ani w poprzek komórek, ani w poprzek ścianek komórek. Odzyskanie wymiarów po rozładowaniu jest znaczne, a odkształcenie szczątkowe jest niewielkie, nawet od początkowych odkształceń w obszarze zapadnięcia się i obszarów zagęszczenia. Korek pęka tylko wtedy, gdy jest naprężony przy rozciąganiu (również po stronie rozciągania przy zginaniu) i pod działaniem sił ścinających. Pory mają dominujący wpływ na wytrzymałość korka na rozciąganie, a pękanie inicjuje się zawsze w pobliżu porów. Korek jest w przybliżeniu elastycznym materiałem komórkowym, który łączy w sobie ciekawy zestaw właściwości mechanicznych. W mechanicznym zachowaniu korka dwie cechy odgrywają ważną rolę: zdolność ścian komórkowych do wyginania się i silnego zapadania się bez pęknięcia ściany komórkowej oraz obecność kanałów soczewkowatych. Moduł sprężystości korka to zakres wartości od 10 MPa do 20 MPa, które są podawane w różnych badaniach dotyczących ściskania korka w różnych kierunkach. W korku odwracalność wymiarów nie jest całkowita ze względu na lepki składnik odkształcenia. Korek tylko przypomina zachowanie sprężyste, aw jego wnętrzu znajduje się materiał lepkosprężysty [60]. Cechy te są całkowicie związane ze zdolnością pochłaniania energii przez korek.

#### 7. Zużycie, stabilność i obojętność [34,50,59].

Lignina i polisacharydy w ścianie komórkowej zapewniają sztywność. A te składniki sprawiają, że korek jest odporny na upływ czasu. Korek to martwa tkanka. Ponadto korek nie jest toksyczny, nie uczula i nie wywołuje niepożądanych reakcji w kontakcie ze skórą lub innymi tkankami. Korek jest materiałem odpornym na ścieranie powierzchni, który wytrzymuje bez znacznych pęknięć lub ścierania wielokrotne tarcie o niego przedmiotami [34]. Korek wykazuje odporność na większość rozpuszczalników, w tym roztwory słabo kwaśne i zasadowe [50]. Nie rdzewieje pod wpływem powietrza ani wilgoci [59]. Z tych powodów produkty na bazie korka, głównie aglomeraty korkowe, stosowane są do posadzek w miejscach o dużym natężeniu użytkowania, takich jak szpitale, szkoły czy hale lotniskowe.

#### 8. Higroskopijne i biosorbentne [61-69].

Korek jest uwodniony w zależności od warunków środowiskowych. Korek pęcznieje, gdy wchłania wodę. Ze względu na anizotropię strukturalną zmienność wymiarów nie jest taka sama w trzech kierunkach. Pofałdowanie ściany komórkowej, jako aspekt strukturalny, musi być brane pod uwagę, aby zrozumieć zmienność wymiarową korka. Wewnątrz, prostowanie ścian komórkowych może nakładać się na pęcznienie spowodowane adsorpcją wody do ścian komórkowych. Adsorpcja wody przez korek wydaje się zachodzić dwoma mechanizmami: dyfuzją cząsteczek wody wzdłuż ścian komórkowych i penetracją do światła komórki. Pobieranie wody przez korek zależy zatem od dwóch aspektów: składu chemicznego materiału oraz obecności kanalików soczewkowatych. Równowagowa zawartość wilgoci w korku po wysuszeniu powietrzem i zrównoważeniu w warunkach wewnętrznych wynosi średnio 7%, w zakresie od około 5 do 10% odpowiednio przy bardzo niskiej wilgotności względnej powietrza lub warunkach wilgotnych. Na przykład drewno dębu korkowego ma równowagową zawartość wilgoci na poziomie około 20% przy wilgotności względnej 80%. Maksymalna zawartość wilgoci, jaka może istnieć w materiale, zależy od jego gęstości. Przykładowo maksymalna wilgotność korka o gęstości 160 kg/m<sup>3</sup> wyniosłaby 545%, a dla gęstości 190 kg/m<sup>3</sup> 446% [34]. Ponadto kilku badaczy wykazało potencjał korka do usuwania pojawiających się zanieczyszczeń, takich jak wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne [61-63], fenantren [64], oranż metylowy [65], ofloksacyna [66], bifentryna [67] ibuprofen, karbamazepina i klofibryny. kwasy [68] czy metale ciężkie [69].

#### 9. Naturalny, nadający się do recyklingu i odnawialny.

Korek jest materiałem naturalnym, ponieważ jest to zewnętrzna kora dębu. Dąb korkowy może regenerować korę korkową po każdym zbiorze. Pozwala na zachowanie równowagi między gospodarką rolno-leśną a działalnością człowieka. Można go łatwo włączyć do gospodarki o obiegu zamkniętym. Jako materiał naturalny można go poddać recyklingowi w kompostowalnym pojemniku.

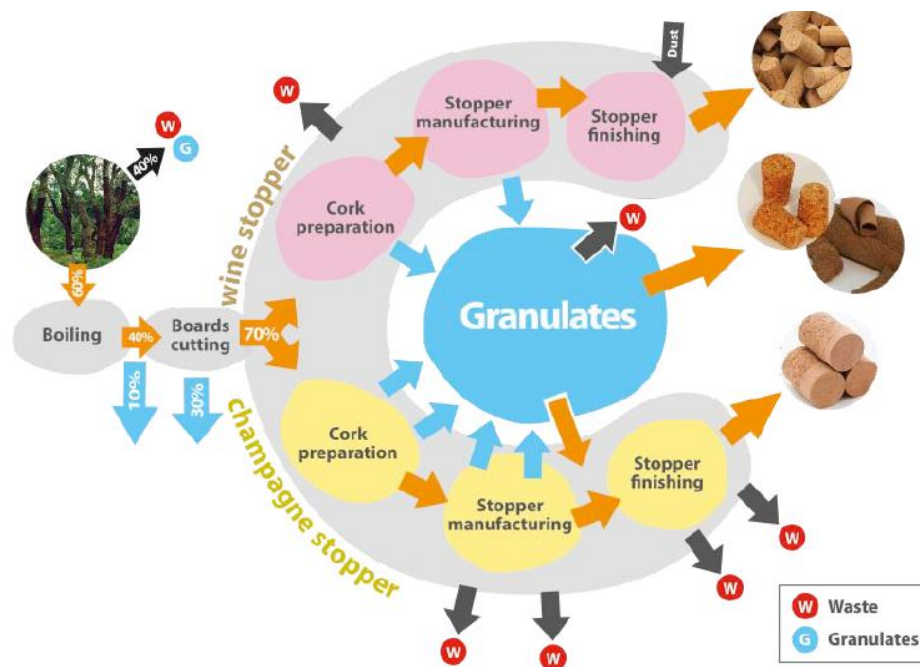
Ponadto można go ponownie wykorzystać, tj. zużyte korki można zbierać i/lub kruszyć. Korek w tych zatyczkach może tworzyć nowe produkty (ale nie nowe zatyczki).

#### 10. Izolator elektryczny [69,70].

Innym ważnym zastosowaniem korka jest izolator elektryczny, ponieważ jest to materiał dielektryczny. Korek wykazuje złożony wzór mechanizmów polaryzacji, w którym można wyróżnić trzy różne procesy relaksacji, chociaż są one połączone lub częściowo nałożone. Współczynnik stratności korka został zgłoszony na poziomie około 0,1 ze słabą zależnością od częstotliwości w zakresie  $10^{-2}$ -10 kHz, ale rosnącą do prawie 0,3 dla dużych amplitud odkształceń [69, 70]. Jest to duża strata (guma ma współczynnik stratności 0,08) i nadaje korkowi dobre właściwości tłumiące i dźwiękochłonne oraz wysoki współczynnik tarcia, jak już omówiono.

### **2.3.2 Zastosowanie korka**

Dzięki unikalnemu połączeniu cennych właściwości fizycznych korek ma szerokie spektrum tradycyjnych zastosowań. Korki mają najwyższą wartość dodaną i największy udział w rynku, przede wszystkim w przypadku win niemusujących i musujących [59]. Według rocznika APCOR 2018-2019 [46] głównym produktem przemysłu korkowego jest zatyczka korkowa (72%) przeznaczona dla przemysłu winiarskiego. Roczna produkcja korka wynosi około 201 tysięcy ton. Jednak tylko 25% rocznej produkcji korka nadaje się do produkcji zatyczek z korka naturalnego (zatyczki wykonane z jednego kawałka korka). Oznacza to, że 75% zebranego korka nie nadaje się do tego zastosowania, dlatego jest on przetwarzany na zamknięcia z korka aglomerowanego lub inne nadwyżki z tego materiału. Korki z korka naturalnego są wybijane bezpośrednio z kory najwyższej jakości, korka reprodukcyjnego. Inne korki korkowe, takie jak korki aglomerowane z krążkami lub bez, korki mikroaglomerowane lub korki techniczne do win niemusujących i musujących, są produktem ubocznym produkcji korka naturalnego. Produkcja zatyczek z korka aglomerowanego ma również pewne odpady, takie jak brzydkie zapachy, deski lub kurz. Istnieją korki, które nigdy nie były wykorzystywane w procesie produkcji zatyczek korkowych, takie jak korek pierwotny (korek z pierwszego zbioru), deski korkowe ze zmianami lub pozostałości leśne z korka. Korek używany do pozostałych zastosowań to tak zwany korek niskiej jakości: korek niepowstrzymany, produkt uboczny korka lub odpad korkowy (rysunek 2.15).



Rysunek 2.15 Schemat przepływów korka w produkcji zatyczek do win niemusujących i musujących [59].

### 2.3.3 Korek w budownictwie

Rozwiązania konstrukcyjne z korka są drugim celem pod względem ważności w sektorze. Produkty z korka stosowane są przede wszystkim w budownictwie do izolacji termicznej i pochłaniania energii, ale odgrywają również ważną rolę w dekoracji i lekkich nawierzchniach. Podłogi, szczeliny dylatacyjne, komory powietrzne i powłoki zewnętrzne to powszechne zastosowania korka w budynkach. Można go nawet stosować w mieszance z betonem na podjazdy lub chodniki zewnętrzne. Tak więc korek umożliwia szereg zastosowań opartych na właściwościach antywibracyjnych, termicznych i akustycznych (Tabela 2.4).

Jednym z głównych produktów w tej dziedzinie jest korek aglomerowany lub panele z korka aglomerowanego. Aglomeraty są wytwarzane w procesie aglutynacji granulek korka o określonej wielkości cząstek i/lub określonej gęstości poprzez określone działanie kompresji, temperatury i środka wiążącego, co prowadzi do powstania różnych rodzajów aglomeratów.

W ten sposób rodzaj korka (wielkość i gęstość cząstek), rodzaj i udział kleju oraz warunki aglutynacji (temperatura, czas i/lub ciśnienie) są czynnikami wpływającymi na wynik końcowego aglomerowanego produktu. Każda z kombinacji powyższych warunków da początek innym produktom z aglomeratu korkowego. W ten sposób każdy proces aglomeracji zapewnia aglomerowany produkt o różnych właściwościach. Każdy producent ma wystandaryzowane procesy produkcyjne określone w różnych kartach technicznych.



Tabela 2.4 Wyroby z korka stosowane w budownictwie i ich podstawowe właściwości [72].

Wykorzystanie	Produkty	Przykłady	Wymagane właściwości
Pokrycie (podłogi, ściany i sufity)	Aglomerowane kompozyty korkowe	Płytki korkowe na podłogę	Odporność na zużycie i sprężystość
	Projektowany korek w emulsji	Dachy, elewacje i podłogi	Odporność na zużycie i absorpcja wilgoci
	Kompozyty gumowo-korkowe	Podkład pod podłogę	Odporność na zużycie i absorpcja wilgoci
	Ekspandowane aglomeraty korkowe	Podkład pod sufity i ściany wewnętrzne oraz panele dachowe	Amortyzacja i absorpcja wilgoci
Izolacja termiczna i akustyczna	Aglomerowane kompozyty korkowe	Aglomeraty korkowo-epoksydowe	Niski współczynnik przewodzenia ciepła
	Projektowany korek w emulsji	Dachy, elewacje, ściany i podłogi	Odporność akustyczna i termiczna
	Ekspandowane aglomeraty korkowe	Panele dachowe i ściany wewnętrzne	Odpowiednia odporność mechaniczna i brak wchłaniania wilgoci
	Korek granulowany	Materiał wypełniający puste przestrzenie między podwójnymi ścianami a podłogami	Trwałość, amortyzacja drgań i ognioodporność
Izolacja wibracyjna	Aglomerowane kompozyty korkowe	Struktury typu kanapkowego	Amortyzacja
	Ekspandowane aglomeraty korkowe	Tablice korkowe ekspandowane o dużej gęstości	Absorpcja wibracji
	<i>Gumowy korek</i>	Połączenia konstrukcyjne	Absorpcja uderzeń
Dylatacje	Aglomerowane kompozyty korkowe	Połączenia konstrukcyjne	Wysoka ściśliwość
	<i>Gumowy korek</i>	Rozbudowane tablice korkowe	Wysoka regeneracja

Aglomerowane płyty korkowe lub deski to wiele produktów z korka używany w kontrakcie (rysunek 2.16). Aglomeraty korkowe można grupować i dzielić na wiele sposobów. Powszechnie akceptowany jest podział produktów aglomeratów (bez korków aglomerowanych) ze względu na to, czy w produkcji stosowane są spoiwa i dodatki:

- **Spieniony aglomerat lub termospieniony korek aglomerowany.** Ekspandowana aglomerowana tablica korkowa bez dodatku. Wykonany jest z aglutynowanych surowych granulek korkowych lub korka bardzo niskiej jakości. Wykorzystuje się siłę wiązania samej suberyny, która ma zdolność wiązania przy wysokich ciśnieniach i temperaturach. Proces ten zapewnia płyty o różnych grubościach i kształtach w zależności od użytej formy. Zwykle proces kończy się korektą średnicy i kształtu. Produkt ten jest naturalny i pochodzenia roślinnego, ponieważ nie stosuje się środków syntetycznych (tab. 2.5).

Tabela 2.5 Właściwości płyty korkowej z aglomeratu ekspandowanego [59].

Właściwości	Wartości
Gęstość	105 do 130 kg m <sup>-3</sup>
Przewodność cieplna	0,040 W·m <sup>-1</sup> ·k <sup>-1</sup>
Pochłanianie dźwięku (500, 1000 i 4000 Hz)	0,33, 0,49, 0,98
Wytrzymałość na ściskanie (MOR)	0,14 do 0,20 MPa
Temperatury użytkowania	-180 do +140°C
Kategoria odporności ogniowej	Euroklasa E

- **Kompozyty:** Kompozyt korkowy to płyta korkowa z dodatkami. Wykonany jest ze sklejonych granulek korkowych z żywicami naturalnymi lub syntetycznymi. Ten produkt może być wytwarzany z różnymi właściwościami i kształtami. Powstały materiał jest mieszanką korka i innych materiałów, z których powstaje inny nowy związek o właściwościach i charakterystyce obu produktów. W zależności od pełnionej funkcji można wyróżnić różne kompozyty: antywibracyjne, akustyczne, amortyzujące itp. (tab. 2.6).

Tabela 2.6 Właściwości pewnego rodzaju kompozytu korkowego (guma-korek) [72].

Właściwości	Hydroizolacja	Akustyka
Gęstość ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	>900	550-650
Przewodność cieplna ( $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	0,018	0,075
Opór cieplny ( $\text{m}^2\text{KW}^{-1}$ )	0,019	0,027
Wytrzymałość na ściskanie (MPa)	>1,3	>0,6



Rysunek 2.16 Aglomerowane płyty korkowe. Druga tablica zaczynając od góry to płyta korkowa termospieniona. Pozostałe to przykłady kompozytów korkowych.

Obecnie korek zaczyna być również wykorzystywany w urbanistyce. Kompozyty korkowe wykorzystywane są do produkcji małej architektury (uliczne ekrany akustyczne i okładziny budynków) oraz nawierzchni torów i placów zabaw. Jednocześnie innowacje w branży zbliżają użycie korka do produkcji podłóg, gdzie waga jest decydującym czynnikiem, na przykład w wagonach kolejowych lub w lotnictwie.

### 2.3.4 Tekstylia i mobilność

Korek jest używany od wieków w przemyśle modowym i tekstylnym. Jednym z wzorcowych produktów w tej dziedzinie są podeszwy korkowe, zarówno naturalne, jak i aglomerowane lub typu sandwich. Obecnie korek jako rozwiązanie tekstylne występuje w postaci korka naturalnego, aglomeratów lub w połączeniu z innymi włóknami naturalnymi. Wypełnia bardzo szeroką niszę rynkową: obuwie, galanteria skórzana, meble, tapicerka, odzież, maty do uprawiania sportu, oprawa pudeł (rys. 2.17-2.18).

Można wśród nich wyróżnić różne warianty: tekstylia korkowe (sinusowe arkusze korka naturalnego lub korka aglomerowanego, korek z bawełną, poliestrem lub żelowanym poliuretanem do obuwia, okładziny ścienne, galanteria skórzana, upominki i nowości oraz papier korkowy (okładziny ścienne i lampy).

Podobnie jak skóra lub zamsz, korek zapewnia wyrafinowany wygląd i luksusowy akcent. Korek jest łatwy do czyszczenia (wystarczy przetrzeć wilgotną szmatką) i jest wysoce odporny na wodę i plamy. Może być ekologicznym rozwiązaniem dla tkanin. Jako szczegół Lady Gaga (piosenkarka) założyła korkową sukienkę w 2014 roku po koncercie w Lizbonie, a Cristiano Ronaldo (piłkarz) pojawił się przed prasą w tenisówkach Nike wykonanych z korka w 2018 roku.



Rysunek 2.17 Przykład produktów z korka używanych w różnych zastosowaniach tekstylnych (<http://www.articor.com/es/>).



Rysunek 2.18 Peugeot 208 Natural z kompozytem korkowym w dachu [81].

Ze względu na swój potencjał pochłaniania energii uderzenia materiał ten był używany w wielu różnych zastosowaniach, w tym w kaskach drogowych [73-75], biernych mechanizmach bezpieczeństwa [76-78] i innych typach panczerzy poddawanych dynamicznym obciążeniom ściskającym. Korek i jego aglomerowane odmiany są postrzegane jako wyrazista alternatywa dla pianek polimerowych [73-75,79,80] ze względu na ich wyżej wymienione właściwości.

Istnieje kilka przykładów korka w mobilności na rynku motoryzacyjnym, takich jak Peugeot „208 Natural”. W tym samochodzie na dach zastosowano kompozyt korkowy.

Korek był używany w eksploracji kosmosu. Ponadto korek był używany przez NASA w statkach kosmicznych. Rola korka w przemyśle lotniczym może polegać na roli izolatora ablacyjnego w pokrywaniu pojazdów kosmicznych. Te systemy izolacji termicznej są niezbędne do wystrzelenia i eksploatacji wszystkich statków kosmicznych, zarówno załogowych, jak i bezzałogowych.

Istnieje kilka przykładów zastosowania ablatorów zawierających korek. Sonda Jupiter C zademonstrowała skuteczność ablacji jako metody ochrony termicznej w 1957 roku. Scout, pierwsza rakieta nośna na paliwo stałe, użyła osłon termicznych z korka/włókna szklanego i izolowanych korkiem płetw do wystrzelenia pierwszego amerykańskiego satelity Discover I. Pathfinder wykorzystał osłonę termiczną z fenolowy plaster miodu wypełniony żywicą epoksydową wypełnioną korkiem i kulkami krzemionki na potrzeby wejścia na Marsa w 1997 roku. Wahadłowiec kosmiczny zawiera korek w wielu swoich elementach, w tym w stałych dopalaczach raketowych i izolacji zbiornika zewnętrznego. Wypadki z udziałem promu kosmicznego wymagały ponownego zbadania jego komponentów, w tym złożonego systemu izolacji termicznej; zachowano jeden z elementów, ablator wykonany z żywicy silikonowych i korka. W jednym opisie patentowym taki ablator jest opisany jako mający skład masowy 7,22-7,98% zmielonego korka. Rakieta Atlas V, która

wystrzeliwuje sondę New Horizons dla misji NASA na Plutona, jest zamknięta w korkowej owiewce. Stożkowa powierzchnia europejskiego ARD (Atmospheric Reentry Demonstrator) pokryta jest proszkiem korkowym i kompozytem żywicy fenolowej [34].

Według Reculusa [83] zbadano ablator z korka/żywicy fenolowej sprzedawany pod marką Norcoat\*-liège w temperaturach sięgających 2500°C. Norcoat\*-liège HPK F1 Space Grade zawiera około pięćdziesiąt procent cząstek korka, trzydzieści procent żywicy fenolowej i dwadzieścia procent fungicydów i mineralnych środków ognioodpornych. Podstawową kwestią jest zachowanie pierwotnej struktury komórkowej kompozytu po obróbce termicznej.

### **2.3.5 Farmacja i kosmetyki**

Korek i jego produkty uboczne mogą być ważnym źródłem wielu związków bioaktywnych, takich jak kwas fenolowy, terpenoidy i garbniki [84]. Te bioaktywne mają wiele istotnych właściwości: przeciwutleniające, przeciwzapalne, przeciwstarzeniowe, oczyszczające lub wychwytyjące wolne rodniki. W ten sposób korek może być stosowany jako obiecujący składnik w przemyśle kosmetycznym. W rzeczywistości istnieje już kilka przykładów zastosowania korka jako napinacza wygładzającego (SUBERLIFT), jako aktywnego olejku (DIAM OLÉOACTIF) lub jako środka złuszczającego (ACTISCRUB). Niedawno firma Biogründel opracowała SUBERCHEM, a firma Quimivita właśnie wprowadziła na rynek nowy peeling firmy cork EXFOBREEZE we współpracy z Fundacją Catalan Cork Institute. SUBERCHEM to bogaty w polifenole ekstrakt z korka, uzyskiwany poprzez ekstrakcje Greena. Związki fenolowe to substancje, które cieszą się coraz większym zainteresowaniem ze względu na swoje właściwości przeciwutleniające, przeciwdrobnoustrojowe, przeciwbakteryjne, przeciwalergiczne, przeciwnowotworowe, przeciwzapalne, a nawet niektóre właściwości przeciwwydzielnicze i przeciwwrzdodowe [84]. W tym sensie w niektórych badaniach wykazano wysoką aktywność antybakteryjną korka, zmniejszającą aktywność bakterii takich jak *Staphylococcus aureus* i *Escherichia coli* odpowiednio o 96,93% i 36% [85], a także stwierdzono, że korek ma potencjał przeciwnowotworowy uzyskany różnymi metodami ekstrakcji w ludzkich komórkach białaczki promielocytowej [86].

Jak wspomniano w tym rozdziale, korek ma wiele właściwości i dlatego może mieć wiele różnych zastosowań. Większość zastosowań korka przetrwała wieki i jest w dużej mierze taka sama jak przed wiekami, ale każdego roku pojawiają się nowe obszary zastosowań korka.

### 2.3.6 Inne

Obecnie świadomość ekologiczna ludzi i cele zrównoważonego rozwoju sprawiły, że korek ponownie znalazł się w centrum uwagi. Korek jest materiałem naturalnym i przyjaznym dla środowiska i może być dobrym kandydatem na część nowego biomateriału w celu zmniejszenia na przykład plastiku.

W 2017 roku 3DSpider Print i Catalan Cork Institute Foundation opracowały podwójną monetę korkową. Celem badania było opracowanie nowego produktu na bazie korka, nadającego się do drukowania, wytłaczania, wtryskiwania i innych procesów produkcyjnych. Ten przedmiot jest mieszanką granulatu korkowego i biopolimeru z tworzywa sztucznego (wykorzystywanego w druku 3D). Nowy materiał, 3DCORK, jest ekologiczny, ponieważ jest oparty na PLA i zawiera ponad 20% korka [89].

Korek jest również dobrym kandydatem do oczyszczania ścieków. Jak wyjaśniono, korek jest dobrym biosorbentem pestycydów, metali ciężkich, wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) i produktów opornych. Istnieje kilka przykładów ścieków korkowych zabiegi: podmokłe (LIFE ECOCORK i [90]), mokre ściany [87], zielone ściany [88 i 91] czy oczyszczanie wody za pomocą fotobioreaktorów (LIFE SPOT).

Z korka można zrobić wiele rzeczy, a korkiem trzeba je tylko przykryć.

### Bibliografia

- [1] Pereira, H. (2011). Cork: Biology, production and uses. Elsevier.
- [2] Campos, P., Daly-Hassen, H., Oviedo, J. L., Ovando, P., & Chebil, A. (2008). Accounting for single and aggregated forest incomes: Application to public cork oak forests in Jerez [Spain] and Itimbia (Tunisia). *Ecological Economics*, 65 (1), 76–86.
- [3] Loisel, R. (1976). Place et rôle des espèces du genre Pinus dans la végétation du Sud-Est Méditerranéen Français. *Ecologia Mediterranea*, 2(1), 131–152.
- [4] WWF, 2006. WWF report. Available online [www.panda.org/mediterranean](http://www.panda.org/mediterranean)
- [5] Kim, H. N., Jin, H. Y., Kwak, M. J., Khaine, I., You, H. N., Lee, T. Y., Ahn, T. H., & Woo, S. Y. (2017). Why does *Quercus suber* species decline in Mediterranean areas? *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 10 (3), 337–341.
- [6] Joffre, R., & Rambal, S. (2001). Mediterranean ecosystems. ELS.
- [7] Plieninger, T. (2006). Habitat loss, Fragmentation, and Alteration – Quantifying the Impact of Land-use Changes on a Spanish Dehesa Landscape by Use of Aerial Photography and GIS. *Landscape Ecology*, 21 (1), 91–105.

- [8] Seixas, J. (2000). Assessing heterogeneity from remote sensing images: The case of desertification in southern Portugal. *International Journal of Remote Sensing*, 21(13–14), 2645–2663.
- [9] Urbietta, I. R., Zavala, M. A., & Marañón, T. (2008). Human and non-human determinants of forest composition in southern Spain: Evidence of shifts towards cork oak dominance as a result of management over the past century. *Journal of Biogeography*, 35(9), 1688–1700.
- [10] Blondel, J. (2006). The ‘Design’ of Mediterranean landscapes: A millennial story of humans and ecological systems during the historic period. *Human Ecology*, 34(5), 713–729.
- [11] Bugalho, M. N., Caldeira, M. C., Pereira, J. S., Aronson, J., & Pausas, J. G. (2011a). Mediterranean cork oak savannas require human use to sustain biodiversity and ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(5), 278–286.
- [12] Pinto-Correia, T., Ribeiro, N., & Sá-Sousa, P. (2011). Introducing the montado, the cork and holm oak agroforestry system of Southern Portugal. *Agroforestry Systems*, 82(2), 99–104. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9388-1>
- [13] Oliveira, G., & Costa, A. (2012). How resilient is *Quercus suber* L. to cork harvesting? A review and identification of knowledge gaps. *Forest Ecology and Management*, 270, 257–272.
- [14] Silva, J. S., & Catry, F. (2006). Forest fires in cork oak (*Quercus suber*L.) stands in Portugal. *International Journal of Environmental Studies*, 63(3), 235–257. <https://doi.org/10.1080/00207230600720829>
- [15] Acácio, V., Holmgren, M., Rego, F., Moreira, F., & Mohren, G. M. J. (2008). Are drought and wildfires turning Mediterranean cork oak forests into persistent shrublands? In *Agroforestry for Commodity Production: Ecological and Social Dimensions*. Springer Netherlands.
- [16] Gómez-Baggethun, E., de Groot, R., Lomas, P. L., & Montes, C. (2010). The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics*, 69(6), 1209–1218
- [17] Muradian, R., Arsel, M., Pellegrini, L., Adaman, F., Aguilar, B., Agarwal, B. et al. (2013). Payments for ecosystem services and the fatal attraction of win-win solutions. *Conservation letters*, 6(4), 274-279.
- [18] Rives, J., Martínez, C., Sánchez, S., Barriocanal, C. (2013). El valor de los servicios ambientales de los alcornocales en Cataluña Evaluación de los servicios ambientales del ecosistema.
- [19] Sánchez-González, M., Tomé, M., & Montero, G. (2005). Modeling height and diameter growth of dominant cork oak trees in Spain. *Annals of Forest Science*, 62(7), 633–643. <https://doi.org/10.1051/forest:2005065>



- [20] Costa, A., Nunes, L. C., Spiecker, H., & Graça, J. (2015). Insights into the Responsiveness of Cork Oak (*Quercus suber* L.) to Bark Harvesting. *Economic Botany*, 69(2), 171–184.
- [21] Gil, L. (2014). Cork. In *Materials for Construction and Civil Engineering*. Springer International Publishing. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-08236-3\\_13](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-08236-3_13)
- [22] Costa, A., Pereira, H., & Madeira, M. (2009). Landscape dynamics in endangered cork oak woodlands in Southwestern Portugal (1958–2005). *Agroforestry Systems*, 77(2), 83–96.
- [23] Rodriguez-Molina, M. C., Blanco-Santos, A., Palo-Nuñez, E. J., Torres-Vila, L. M., Torres-Alvarez, E., & Suarez-de-la-Camara, M. A. (2005). Seasonal and spatial mortality patterns of holm oak seedlings in a reforested soil infected with *Phytophthora cinnamomi*. *Forest Pathology*, 35(6), 411–422. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2005.00423.x>
- [24] Brasier, C. M., & Scott, J. K. (1994). European oak declines and global warming: A theoretical assessment with special reference to the activity of *Phytophthora cinnamomi*. *EPPO Bulletin*, 24(1), 221–232.
- [25] Moreira, A. C., & Martins, J. M. S. (2005). Influence of site factors on the impact of *Phytophthora cinnamomi* in cork oak stands in Portugal. *Forest Pathology*, 35(3), 145–162. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2005.00397.x>
- [26] Brasier, C. (1996). *Phytophthora cinnamomi* and oak decline in southern Europe. Environmental constraints including climate change. *Annales Des Sciences Forestières*, 53(2–3), 347–358. <https://doi.org/10.1051/forest:19960217>
- [27] Montoya, J. M. (1988). Los Alcornocales. Ministerio de Agricultura.
- [28] Elena-Roselló, J. A., & Cabrera, E. (1996). Isozyme variation in natural populations of cork-oak (*Quercus suber* L.). *Silvae Genetica*, 45(4), 229.
- [29] Pulido, F. J., Díaz, M., & Hidalgo de Trucios, S. J. (2001). Size structure and regeneration of Spanish holm oak *Quercus ilex* forests and dehesas: Effects of agroforestry use on their long-term sustainability. *Forest Ecology and Management*, 146(1–3), 1–13.
- [30] Gil, L. (2015) *Cork as a Building Material. Technical Manual*. APCOR.
- [31] Gil, L. (2016) *Sequestro de CO2 em produtos de cortiça para diferentes aplicações*.
- [32] Rives, J., Fernandez-Rodriguez, I., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2011). Environmental analysis of the production of natural cork stoppers in southern Europe [Catalonia–Spain]. *Journal of cleaner production*, 19(2-3), 259-271.

- [33] Demertzi, M., Dias, A. C., Matos, A., & Arroja, L. M. (2015). Evaluation of different end-of-life management alternatives for used natural cork stoppers through life cycle assessment. *Waste Management*, 46, 668-680.
- [34] Pereira, H. (2007). *Cork* (pp. 55-99). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- [35] Montero, G., Ruiz-Peinado, R., & Muñoz, M. (2005). *Producción de biomasa y fijación de CO2 por los bosques españoles* (Vol. 13, p. 270). Madrid: INIA-Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.
- [36] Gracia, C. "Biocombustibles: energia o aliment?." *Omnis Cellula* 25 (2010): 21-27.
- [37] Costa-e-Silva, F., Correia, A. C., Piayda, A., Dubbert, M., Rebmann, C., Cuntz, M. et al. (2015). Effects of an extremely dry winter on net ecosystem carbon exchange and tree phenology at a cork oak woodland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 204, 48-57.
- [38] Spampinato, G., Sciandrello, S., del Galdo, G., Puglisi, M., Tomaselli, V., Cannavò, S., & Musarella, C. M. (2019). Contribution to the knowledge of Mediterranean wetland biodiversity: Plant communities of the Aquila Lake (Calabria, Southern Italy). *Plant Sociol*, 56, 53-68.
- [39] Gil L. (1998). *Cortiça — Produção, Tecnologia e Aplicação*, Ed INETI, Lisboa
- [40] Gil, L. (2014). Cork: a strategic material. *Frontiers in chemistry*, 2, 16.
- [41] Dias, A. C., Boschmonart-Rives, J., González-García, S., Demertzi, M., Gabarrell, X., & Arroja, L. (2014). Analysis of raw cork production in Portugal and Catalonia using life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(12). 1985-2000.
- [42] Mundet, R., Baiges, T., Beltrán, M., & Torrell, A. (2018). Guia de recomanacions i mesures d'adaptació al canvi climàtic en la gestió de Quercus suber. *Life+ SUBER. CFC, CPF, CTFC, FCSA, AFSA*.
- [43] Giacomoni, J., & Andrighetto, N. Innovation Networks of Cork, Resins and Edibles in the Mediterranean basin-INCREDBLE.
- [44] Rives, J., Fernandez-Rodriguez, I., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2011). Environmental analysis of the production of natural cork stoppers in southern Europe (Catalonia–Spain). *Journal of cleaner production*, 19(2-3), 259-271.
- [45] ISO 633:2019 Cork – Vocabulary.
- [46] APCOR's Cork Yearbook 2020. Available: [https://www.apcor.pt/wp-content/uploads/2021/08/Cork\\_BoletimEstatistico\\_APCOR\\_2020.pdf](https://www.apcor.pt/wp-content/uploads/2021/08/Cork_BoletimEstatistico_APCOR_2020.pdf)

- [47] Demertzi, M., Sierra-Pérez, J., Paulo, J. A., Arroja, L., & Dias, A. C. (2017). Environmental performance of expanded cork slab and granules through life cycle assessment. *Journal of cleaner production*, 145, 294-302.
- [48] Demertzi, M., Paulo, J. A., Arroja, L., & Dias, A. C. (2016). A carbon footprint simulation model for the cork oak sector. *Science of the Total Environment*, 566, 499-511.
- [49] Quora (2016) What did Robert Hooke see in the cork cell? <https://www.quora.com/What-did-Robert-Hooke-see-in-the-cork-cell>
- [50] Aroso, I. M., Araujo, A. R., Pires, R. A., & Reis, R. L. (2017). Cork: current technological developments and future perspectives for this natural, renewable, and sustainable material. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(12), 11130-11146.
- [51] Graça, J., & Pereira, H. (2004). The periderm development in *Quercus suber*. *Iawa Journal*, 25(3), 325-335.
- [52] Marques, A. V., & Pereira, H. (2013). Lignin monomeric composition of corks from the barks of *Betula pendula*, *Quercus suber* and *Quercus cerris* determined by Py-GC-MS/FID. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 100, 88-94.
- [53] Pereira H (2013) Variability of the chemical composition of cork. *BioResources* 8(2):2246–2256
- [54] Chevalier, V., Pons, A., & Loisel, C. (2019). Impacto del cierre en el envejecimiento de los vinos en botella. *La Semana vitivinícola*, (3557), 2038-2043.
- [55] Godden, P., FRANCIS, L., FIELD, J., GISHEN, M., COULTER, A., VALENTE, P., ... & ROBINSON, E. (2001). Wine bottle closures: physical characteristics and effect on composition and sensory properties of a Semillon wine 1. Performance up to 20 months post-bottling. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 7(2), 64-105
- [56] Lopes, P., Saucier, C., & Glories, Y. (2005). Nondestructive colorimetric method to determine the oxygen diffusion rate through closures used in winemaking. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(18), 6967-6973.
- [57] Vaz, M. F., & Fortes, M. A. (1998). Friction properties of cork. *Journal of materials science*, 33(8), 2087-2093.
- [58] Jové Martín, P. (2016). *Caracterització del suro i subproductes de la indústria surera. Valoració d'aquests com a biosorbents d'hidrocarburs aromàtics policíclics en aigües d'escorrentia* (Doctoral dissertation, Universitat de Girona).
- [59] Sierra Pérez, J. (2016). *The introduction of eco-design for promoting the use of eco-materials: the cork as building material*. Universitat Autònoma de Barcelona.

- [60] Mano, J. F. (2002). The viscoelastic properties of cork. *Journal of Materials Science*, 37(2), 257-263.
- [61] Olivella, M. À., Jové, P., & Oliveras, A. (2011). The use of cork waste as a biosorbent for persistent organic pollutants—Study of adsorption/desorption of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 46(8), 824-832.
- [62] Olivella, M. À., Jové, P., Şen, A., Pereira, H., Villaescusa, I., & Fiol, N. (2011). Sorption performance of *Quercus cerris* cork with polycyclic aromatic hydrocarbons and toxicity testing. *BioResources*, 6(3), 3363-3375.
- [63] Olivella Costa, À., Fernández-Rodríguez, I., Cano, L., Jové Martín, P., & Oliveras Rovira, À. (2013). Role of Chemical Components of cork on Sorption of Aqueous Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. © *International Journal of Environmental Research*, 7(1), 225-234.
- [64] Olivella, M. À., Jové, P., Bianchi, A., Bazzicalupi, C., & Cano, L. (2013). An integrated approach to understanding the sorption mechanism of phenanthrene by cork. *Chemosphere*, 90(6), 1939-1944.
- [65] Krika, F., & Benlahbib, O. E. F. (2015). Removal of methyl orange from aqueous solution via adsorption on cork as a natural and low-cost adsorbent: equilibrium, kinetic and thermodynamic study of removal process. *Desalination and Water Treatment*, 53(13), 3711-3723.
- [66] Crespo-Alonso, M., Nurchi, V. M., Biesuz, R., Alberti, G., Spano, N., Pilo, M. I., & Sanna, G. (2013). Biomass against emerging pollution in wastewater: ability of cork for the removal of ofloxacin from aqueous solutions at different pH. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 1199-1204.
- [67] Domingues, V., Alves, A., Cabral, M., & Delerue-Matos, C. (2005). Sorption behaviour of bifenthrin on cork. *Journal of Chromatography A*, 1069(1), 127-132.
- [68] Dordio, A. V., Gonçalves, P., Teixeira, D., Candeias, A. J., Castanheiro, J. E., Pinto, A. P., & Carvalho, A. P. (2011). Pharmaceuticals sorption behaviour in granulated cork for the selection of a support matrix for a constructed wetlands system. *International Journal of Environmental and Analytical Chemistry*, 91(7-8), 615-631.
- [69] Pintor, A. M., Ferreira, C. I., Pereira, J. C., Correia, P., Silva, S. P., Vilar, V. J. et al. (2012). Use of cork powder and granules for the adsorption of pollutants: A review. *Water research*, 46(10), 3152-3166.
- [70] Fernandes, F. A. O., Pascoal, R. J. S., & De Sousa, R. A. (2014). Modelling impact response of agglomerated cork. *Materials & Design*, 58, 499-507.
- [71] Pritz, T. (1996). Analysis of four-parameter fractional derivative models of real solid materials. *Journal of Sound and Vibration*, 195(1), 103-115.

- [72] Knapic, S., Oliveira, V., Machado, J. S., & Pereira, H. (2016). Cork as a building material: a review. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(6), 775-791.
- [73] Fernandes, F. A., Alves de Sousa, R. J., Ptak, M., & Migueis, G. (2019). Helmet design based on the optimization of biocomposite energy-absorbing liners under multi-impact loading. *Applied Sciences*, 9(4), 735.
- [74] Coelho, R. M., de Sousa, R. A., Fernandes, F. A. O., & Teixeira-Dias, F. M. V. H. (2013). New composite liners for energy absorption purposes. *Materials & Design*, 43, 384-392.
- [75] Alves de Sousa, R. J., Gonçalves, D. F. S., Coelho, R. M., & Teixeira-Dias, F. M. V. H. (2012). Assessing the effectiveness of the use of a natural cellular material as safety padding in motorcycle helmet. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 88(5), 579-590.
- [76] Costas, M., Díaz, J., Romera, L. E., Hernández, S., & Tielas, A. (2013). Static and dynamic axial crushing analysis of car frontal impact hybrid absorbers. *International Journal of Impact Engineering*, 62, 166-181.
- [77] Tay, Y. Y., Lim, C. S., & Lankarani, H. M. (2014). A finite element analysis of high-energy absorption cellular materials in enhancing passive safety of road vehicles in side-impact accidents. *International Journal of Crashworthiness*, 19(3), 288-300.
- [78] Paulino, M., & Teixeira-Dias, F. (2011). An energy absorption performance index for cellular materials—development of a side-impact cork padding. *International Journal of Crashworthiness*, 16(2), 135-153.
- [79] Fernandes, F. A. O., Jardim, R. T., Pereira, A. B., & De Sousa, R. A. (2015). Comparing the mechanical performance of synthetic and natural cellular materials. *Materials & Design*, 82, 335-341.
- [80] Sánchez-Sáez, S., García-Castillo, S. K., Barbero, E., & Cirne, J. (2015). Dynamic crushing behaviour of agglomerated cork. *Materials & Design* (1980-2015), 65, 743-748.
- [81] Stone Ideas (2015) Peugeot 208 Natural“: ultra-thin natural stone for the rear spoiler. Available online: <https://www.stone-ideas.com/38728/peugeot-208-natural-ultra-thin-natural-stone-rear-spoiler/>
- [82] Gracia, C., 2010. Balanç de carboni: els embornals a Catalunya. Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya. Capítol 5: Embornals. Generalitat de Catalunya, Barcelona. Available online: [https://cads.gencat.cat/web/.content/Documents/Publicacions/segon-informe-sobre-canvi-climatic-catalunya/1part/05\\_embornals.pdf](https://cads.gencat.cat/web/.content/Documents/Publicacions/segon-informe-sobre-canvi-climatic-catalunya/1part/05_embornals.pdf)
- [83] Reculusa, S., Trinqucoste, M., Dariol, L. Delhaès P. (2006) Thermal degradation of a cork-based composite. *Carbon* 44(7):1316-1320. DOI: 10.1016/j.carbon.2005.12.051

- [84] Bejarano, I., Godoy-Cancho, B., Franco, L., Martínez-Cañas, M. A., & Tormo, M. A. (2015). *Quercus Suber L. Cork Extracts Induce Apoptosis in Human Myeloid Leukaemia HL-60 Cells. Phytotherapy Research*, 29(8), 1180-1187.
- [85] Carriço, C., Ribeiro, H. M., & Marto, J. (2018). Converting cork by-products to ecofriendly cork bioactive ingredients: Novel pharmaceutical and cosmetics applications. *Industrial Crops and Products*, 125, 72-84.
- [86] Goncalves, F., Correia, P., Silva, S. P., & Almeida-Aguiar, C. (2016). Evaluation of antimicrobial properties of cork. *FEMS Microbiology Letters*, 363(3), fnv231.
- [87] Castellar, J. A. C., Formosa, J., Fernández, A. I., Jové, P., Bosch, M. G., Morató, J. et al. (2019). Cork as a sustainable carbon source for nature-based solutions treating hydroponic wastewaters—Preliminary batch studies. *Science of the total environment*, 650, 267-276.
- [88] Verdum, M., Prades C., González adrados, J. R., Bejarano, M., Lezcano G. and Sánchez M. (2020) Miniguia de Nuevas Aplicaciones del Corcho. Grupo Operativo GO SUBER. Fundació Institut Català del Suro.
- [89] Verdum M., Sánchez C., Castro J., Lladó J., Jové P. (2017) Revaluation of Catalan Low Quality Cork as Feedstock for the Additive 3D Printing Technology, CSA2017 Materials Research Proceedings 3. 11-18.
- [90] Jové P., Fiol N., Vilaescusa I., Verdum M., Aguilar L. Bosch C., Morató J. (2017) The use of cork waste as a sorbent for pesticides and heavy metals generated during the wine manufacturing process CSA2017 Materials Research Proceedings 3. 75-83
- [91] Garcia Moreno A. M., Sánchez Cuesta R., Prades López C. Verdum Virgos M., Jové P., Bejarano M. y Abellanas B. (2020) El corcho como sustrato de cubiertas verdes (Proyecto GO SUBER). *Tecnogarden* 219 38-53

## ROZDZIAŁ 3

### Sektory produktów z korka, właściwości korka i przyszłe trendy dla korka

*Mariusz Ptak\*, Marek Sawicki, Mateusz Dymek*

Politechnika Wrocławska, Katedra Konstrukcji i Badań Maszyn, Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław, Polska

\*Korespondencja: mariusz.ptak@pwr.edu.pl

#### Abstrakt

Korek to wszechstronny i zrównoważony materiał o szerokim zakresie zastosowań w wielu gałęziach przemysłu. Jest naturalnie wodoodporny, ognioodporny i przyjazny dla środowiska. Z biegiem lat jego zastosowanie wzrosło wykładniczo, ponieważ produkty z korka stają się coraz bardziej popularne na domowych, komercyjnych i przemysłowych rynkach konsumenckich. Istnieje kilka sektorów, które wykorzystują ten materiał, w tym budownictwo, podłogi, izolacje i rozwiązania uszczelniające. Ponieważ preferencje konsumentów zmieniły się w kierunku bardziej zrównoważonych produktów, popyt na korek gwałtownie wzrósł, a w najbliższej przyszłości spodziewany jest dalszy rozwój sektora.

**Słowa kluczowe:** korek, wyroby z korka, właściwości korka, motoryzacja, lotnictwo, lotnictwo, izolacja.

#### 3.1 Wprowadzenie

Korek naturalny, główny produkt unikalnego w świecie dębu korkowego ekosystemu leśnego, to materiał o unikalnych właściwościach, który można wykorzystać ponownie w dowolnej formie, nietoksyczny, trwały i odporny na zużycie. Korek skutecznie wiąże dwutlenek węgla z atmosfery, co jest niezbędne, zwłaszcza w kontekście globalnego ocieplenia. Świat nauki i biznesu ceni korek za jego niezwykle właściwości fizyczne i mechaniczne, które można synergicznie wykorzystać dla zrównoważonego rozwoju gospodarki i przemysłu. W innym artykule [1] omówiono uprawę korka oraz jego mikro i makrostrukturę.

Korek to jeden z najbardziej wszechstronnych materiałów naturalnych. Ma szeroki zakres zastosowań, od prostych zakrętek do butelek po specjalistyczne lotnicze osłony termiczne. Jest lekki, ściśliwy, elastyczny, trwały, odporny chemicznie i biologicznie, nietoksyczny, trudnopalny, praktycznie nieprzepuszczalny dla gazów i cieczy, wykazuje dobrą izolacyjność termiczną i akustyczną, a także jest doskonałym izolatorem wibracyjnym i elektrycznym. Wyjątkowe właściwości korka wynikają z jego struktury komórkowej przypominającej plaster miodu [1]. Mała gęstość korka wynika z układu komórek i znajdujących się pomiędzy nimi kanałków soczewkowatych. Wymienione wymiary

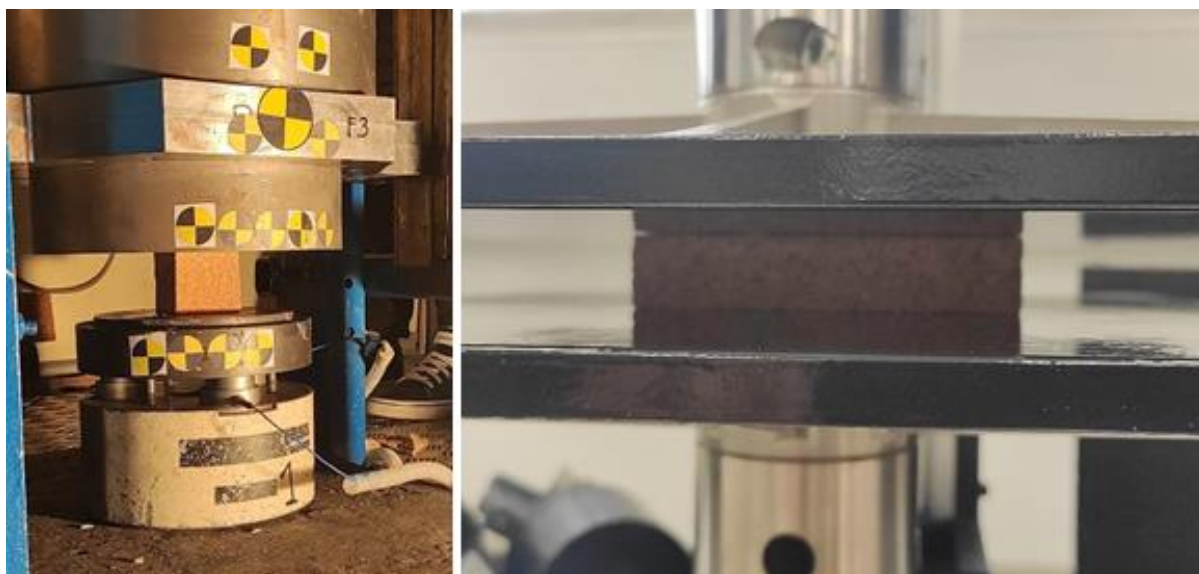
komórek różnią się nieznacznie w zależności od wieku kory dębu korkowego i okresu jej pozyskiwania [1]. Wyznaczona w ten sposób wartość gęstości korka mieści się w przedziale 120-240 kg/m<sup>3</sup>, a średnią gęstość wysuszonego korka przyjmuje się jako 150-160 kg/m<sup>3</sup> [2]. Udział korka, ze względu na małą gęstość, znacząco wpływa na obniżenie wagi konstrukcji, które go zawierają. Struktura komórkowa, zapewniająca określony rozkład naprężeń działających na komórki korka pod obciążeniem, zapobiega pękaniu materiału. Korek zachowuje swoje właściwości niezależnie od wilgotności i temperatury otoczenia. Zawsze jest miękki, ale elastyczny, przyjemny w dotyku i odporny na zużycie [3].

Korek wyróżnia się wieloma interesującymi właściwościami, takimi jak elastyczność, wysoka stabilność fizyczna, ściśliwość, odporność na długotrwałe cykle obciążeń oraz izolacyjność termiczna, elektryczna i akustyczna [2]. O wysokiej izolacyjności termicznej decyduje niewielka wartość współczynnika przewodzenia ciepła naturalnego korka  $\lambda = 0,040-0,045 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$  [2], a izolacyjność akustyczna – izolacyjność akustyczna  $1,2 \cdot 10^5 \text{ kg/(m}^2 \text{ s)}$  [2], umożliwiające zmniejszenie natężenia dźwięku o 31–36 dB w zależności od grubości materiału [4]. Z drugiej strony, izolacja elektryczna wtyczki silnie zależy zarówno od wilgotności materiału, jak i od temperatury. Współczynnik ten w temperaturze 25°C przy zawartości wody 3,5% wynosi  $1,2 \times 10^{-14} \text{ S/m}$ , natomiast dla całkowicie wysuszonego korka w tej samej temperaturze  $2,9 \times 10^{-10} \text{ S/m}$ . Jednak radykalne zmniejszenie zdolności izolacyjnych tego dielektryka spowodowane jest głównie wzrostem temperatury – przewodność elektryczna wtyku np. w zakresie 25-100°C wzrasta o trzy rzędy wielkości. Zawartość spoiwa w aglomeracie korka zwiększa przewodnictwo nawet o cztery rzędy wielkości [2]. Należy podkreślić, że zastosowanie materiałów pochodzenia naturalnego (np. korek, wełna) w miejsce wysoko przetworzonych materiałów izolacyjnych, takich jak styropian czy poliuretan, unieszkodliwianych poprzez spalanie, znacznie zmniejsza (o 98%) negatywny wpływ na środowisko. Korek nie jest podatny na zmiany objętości, nawet pod wpływem nagłych zmian temperatury. Jest również trudnopalny - nie pali się płomieniem, a węglem drzewnym. Wykazuje właściwości antypoślizgowe i dużą odporność na ścieranie powierzchni [2], [5] (nie psuje się pod wpływem wielokrotnego ocierania o szyjkę butelki, pomimo stosunkowo wysokiego współczynnika tarcia wynoszącego 0,5) [6], [7]. Korek naturalny jest chemicznie obojętny, stanowi barierę dla cieczy i gazów, a w kontakcie z nimi nie pochłania zapachów [2], [3], [8].

Dzięki dużej zawartości suberyny korek wykazuje właściwości antybakteryjne i przeciwgrzybicze, zapobiegając w ten sposób przenikaniu tych mikroorganizmów np. do zablokowanej nim butelki [9]-[12]. Korek jest materiałem hydrofobowym o energii powierzchniowej 18 mN/m i charakteryzuje się małą siłą adhezji w stosunku do innych materiałów [2], [4]. Hydrofobowy charakter korka można zmienić w wyniku plazmowej modyfikacji powierzchni pod ciśnieniem atmosferycznym (Atmospheric Pressure Plasma Torch – APPT) lub w warunkach niskiego ciśnienia (Low-Pressure Plasma Chamber – LPPC) [13]. Obróbka plazmowa może oddziaływać jedynie na zewnętrzną



powierzchnię korka bez zmiany jego właściwości. Grupy reaktywne utworzone w wyniku tych zabiegów na powierzchni korka pozwalają na jego trwalsze połączenie z innymi materiałami [14], [15]. Właściwości adhezyjne powierzchni korka poprawia również proces silanizacji [16]. Jedną z najważniejszych cech wyróżniających korek spośród innych materiałów naturalnych i umożliwiających jego szerokie zastosowanie jest wysoka zdolność pochłaniania energii, nawet przy stosunkowo niewielkich obciążeniach. Średnia wartość energii pochłanianej podczas ściskania korka do poziomu 83% początkowej objętości w kierunku promieniowym lub niepromieniowym wynosi  $3,4 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$  i  $2,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$  [2]. Wspomniana już trudnopalność i zdolność do spowolnienia rozprzestrzeniania się ognia to istotne cechy korka. Korek pali się bez płomieni i co bardzo ważne nie wydzielają toksycznych gazów [2]. Korek jest elastycznym, anizotropowym materiałem komórkowym o specyficznych właściwościach mechanicznych, głównie ze względu na jego podatność na stopniowe wyginanie, odkształcanie i pogrubianie ścianek komórek pod obciążeniem [3].



Rysunek 3.1 Próbki korka w teście ściskania.

Zachowanie się korka podczas ściskania quasi-statycznego ilustruje wykres liniowy naprężenie-odkształcenie z rozległym plateau kończącym się, gdy struktura komórkowa korka jest całkowicie ściśnięta i zagęszczona (Rysunek 3.1) [2]. Nachylenie krzywej w obszarze plateau wyznacza wartości modułu sprężystości (przygotowanego w określony sposób) korka w zakresie 6–20 MPa, w zależności od kierunku obciążenia. W przypadku obciążeń w kierunku promieniowym wartości te są większe niż w przypadku obciążeń w kierunku osiowym i stycznym [2], [17]. Ogrzewanie korka w temperaturze 100-150°C przez 24 godziny pozbawia go wilgoci i znacznie zwiększa jego wytrzymałość na ściskanie. Jednak dłuższe ogrzewanie, dłuższe niż 24 godziny, zmniejsza jego wytrzymałość na skutek termicznej degradacji struktury [17]. O niezwyklej elastyczności korka świadczy jego zachowanie w teście ściskania. Po sprasowaniu korka NL10 (gęstość  $135 \text{ kg/m}^3$ ) do 80% pierwotnej grubości, w

ciągu 0,5 min, po odciążeniu, bez objawów wyboczenia, powraca on do około 80% pierwotnej wielkości. Własności mechaniczne korka nie można scharakteryzować jedną wartością współczynnika Poissona [18], [19] czy modułu Younga [30], ponieważ jego stopnie różnią się między sobą, zwłaszcza gęstością, wymiarami komórek i porowatością [2].

### 3.2 Sektory produkcji korka

W ostatnich latach przemysł korkowy zyskał nowe gałęzie rozwoju. Korek jako materiał ma fascynujące właściwości, które mogą znacznie ulepszyć obecne projekty. Obszary zastosowań materiałów korkowych są tak szerokie, jak m.in.

- Korki do win niemusujących i musujących oraz napojów spirytusowych
- Motoryzacja i kolejnictwo
- Mikromobilność
- Energia
- Lotnictwo
- Sporty
- Zastosowania architektoniczne i projektowe, w tym podłogi i okładziny ścienne
- Budownictwo i infrastruktura, takie jak podkłady korkowe
- Dylatacje i izolacyjne tablice korkowe
- Moda

W tym miejscu należy zauważyć, że pomyślnie wprowadzenie materiału korkowego do istniejących produktów można było rozpatrywać jedynie poprzez jego obecność na rynku. Prototypowe lub niestandardowe rozwiązania, które nie są produkowane masowo, nie mogą być uważane za ważne zastosowania materiałów korkowych, ponieważ są one publicznymi lub prywatnymi programami badawczymi lub przepłacanymi, wysoce spersonalizowanymi produktami. Dlatego omówienie obecnie wprowadzanych materiałów korkowych ogranicza się do produktów oferowanych na rynku. W niniejszym ustępie materiał korkowy jest uważany za surowy korek i materiały pochodne korka, takie jak konglomerat korkowy na bazie poliuretanu itp.

W większości przypadków zastosowanie materiału korkowego jest silnie związane z jego specyficznymi, wyjątkowymi właściwościami. Korek jako materiał sypki jest stosunkowo drogi. To jest główny powód, dla którego projektanci wybierali te materiały tylko z dbałością o specjalne wymagania, które muszą być spełnione. Dlatego aplikacje z korka są wyjątkowe i nieoczywiste. Nierzadko zdarza się, że materiał z korka jest podstawowym materiałem na sprzęt inżynierski.

Użycie korka jest materiałem wtórnym, którego inne materiały nie mogą zastąpić w określonych zastosowaniach.

Właściwości izolacyjne korka są na tyle gorsze lub lepsze, że można je porównać kosztowo z powszechnie stosowanymi piankami polimerowymi, takimi jak polistyren, pianki polimerowe ABS czy XPS. Ognioodporność paneli z surowego korka nie spełnia żadnych norm ochrony przeciwpożarowej. Za materiał ognioodporny można uznać jedynie konglomeraty z dodatkami samogasnącymi. Właściwości tłumienia hałasu są stosunkowo wysokie w porównaniu z innymi materiałami. W przypadku niektórych właściwości, takich jak właściwości mechaniczne, trudno jest porównać materiały z korka z różnymi materiałami. Diagramy Ashby'ego charakteryzują materiały korkowe na tle innych. Dlatego trudno jest napisać ogólną wiedzę o dziedzinach związanych z materiałami korkowymi. W tym miejscu należy wspomnieć, że korek ma pewne unikalne właściwości, które są bardzo ważne przy jego wyborze w różnych wzorach. Większość użytkowników materiałów naturalnych ma dobre odczucia, gdy urządzenia dotykowe są pokryte korkiem. Co więcej, pochłanianie wilgoci i potu przez materiały korkowe jest wysoce zalecane w przypadku długotrwałej obsługi urządzeń. Znakomite właściwości w tłumieniu fal elektromagnetycznych czy dobra ablacja powrotna do atmosfery dowodzą, że materiał korkowy nie ma w inżynierii żadnej przewagi nad kompozytem polimerowym materiałów na bazie metali. Jednak kilka bardzo specyficznych właściwości pozwala na zastosowanie w specyficznych i wymagających zastosowaniach.

W przemyśle lotniczym wprowadzenie materiału korkowego do obecnych zastosowań, zajętego przez inne zwykle materiały na bazie polimerów, jest trudne do osiągnięcia. Jednym z najbardziej trywialnych skutków zmian w przemyśle lotniczym jest koszt certyfikacji i ponownej certyfikacji każdego nowego projektu. Wymiana obecnie stosowanych materiałów nie jest w tym momencie priorytetem dla producentów i operatorów samolotów. Ponadto stabilność łańcucha dostaw w produkcji lotniczej jest jednym z najważniejszych czynników podczas produkcji pojazdu latającego. Korek, jako materiał naturalny, jest zbierany w lesie korkowym. Każdego roku produkcja korka i jego cena mogą się znacznie różnić.

Jak wspomniano wcześniej, materiały korkowe wykazują doskonałe tłumienie fal elektromagnetycznych. Ta właściwość służy do redukcji sygnałów radiowych obiektów latających, głównie samolotów, w celu uniknięcia wykrycia przez systemy obrony powietrznej wroga. Ta właściwość jest silnie związana z mikrostrukturą korka. Lignina i suberyna to wydłużone kanały, które wychwytyują magnetyczne fale radiowe, które nie odbijają fal radiowych do źródła promieniowania (systemy radarowe).

Jeden z przyszłych trendów w materiałach korkowych w przemyśle lotniczym jest związany z systemami tłumienia dźwięku w napędzie. Obecne układy napędowe generują nieprzyjemne dźwięki, które wymagają dodatkowych układów tłumiących. W przypadku silników odrzutowych gondole silników mają kształt zmniejszający hałas. Przeprojektowanie gondoli silników odrzutowych z

towarzyszącym im materiałem tłumiącym dźwięki, gdzie korek może być rozważany może się stać kolejnym zastosowaniem korka.

Jedną z nietrywialnych właściwości materiału korkowego jest niewielki wpływ erozji panelu korkowego na środowisko. Wszelkie wyloty niepalnych, gorących lub zimnych gazów z cząstkami, które mogłyby powodować erozję materiału, mogą być pokryte materiałem korkowym. Ma dobre właściwości termoizolacyjne, zdolne do erozji przy niewielkich ilościach materiału. Oczywiście po określonym czasie osłony te należy wymienić.

Korek jest zakładany jako materiał chroniący przed ciepłem podczas misji testowej, podczas której statek kosmiczny ponownie wejdzie w ziemską atmosferę. Podczas ponownego wejścia każdy statek kosmiczny doświadcza dużych obciążeń termicznych z powodu tarcia powietrza o konstrukcję statku kosmicznego. W erze promów kosmicznych promy kosmiczne były pokryte ceramicznymi panelami. Jedną z hipotez mówi, że materiał z korka może być użyty do ekranowania przed ponownym wejściem. Niska regresja spalania i wysokie właściwości termoizolacyjne w wysokich temperaturach mają ogromny potencjał dla taniej i nieskomplikowanej produkcji osłon termicznych do ponownego wejścia.

Korek, uznawany za materiał ekologiczny i zrównoważony, jest szeroko stosowany w branży modowej. W tej dziedzinie dużą rolę odgrywają trendy, dlatego też liczba wniosków będzie się zmieniać w kolejnych latach. Dziedziny zastosowania w branży modowej to dekoracyjne tkaniny korkowe, wkładki, materiał do produkcji obuwia. W tym sektorze gospodarki, w którym firmy produkcyjne składają zdecydowane deklaracje na temat ekologii i zrównoważonego wykorzystania materiałów, oczekuje się, że materiał korkowy z innymi materiałami pochodzenia naturalnego będzie bardziej obecny.

Zastosowanie korka w architekturze jest powszechne. Ze względu na atrakcyjną strukturę i pozytywne wrażenia dla ludzkich rąk, korek jest bardzo powszechny w każdym typie architektury, od akcesoriów domowych po główne role dekoracyjne w dużych budynkach i instalacjach artystycznych.

W zastosowaniach architektonicznych do produkcji paneli podłogowych i ściennych stosuje się duże ilości materiałów korkowych. Te dwa produkty zużywają najwyższej jakości materiał korkowy w architekturze. W tym zastosowaniu korek jest drogi i ma właściwości o wysokim standardzie.

Jednym z potencjalnych zastosowań korka jest absorpcja substancji chemicznych z powietrza. Korek dzięki swojej wewnętrznej mikrostrukturze może wchłaniać substancje chemiczne. Wiele substancji organicznych jest bardzo toksycznych dla ludzi. Źródłem szkodliwych substancji na bazie węgla jest spalanie węgla w prywatnych kominkach, spaliny silników benzynowych i wysokoprężnych, w tym pojazdów, oraz innego rodzaju urządzeń, takich jak agregaty prądotwórcze, kosiarki i inne domowe narzędzia ogrodnicze z silnikami spalinowymi. Dodatkowym źródłem szkodliwych substancji

organicznych jest intensywne rolnictwo, składowiska odpadów oraz duże ilości kompostowników odpadów organicznych z procesami rozkładu.

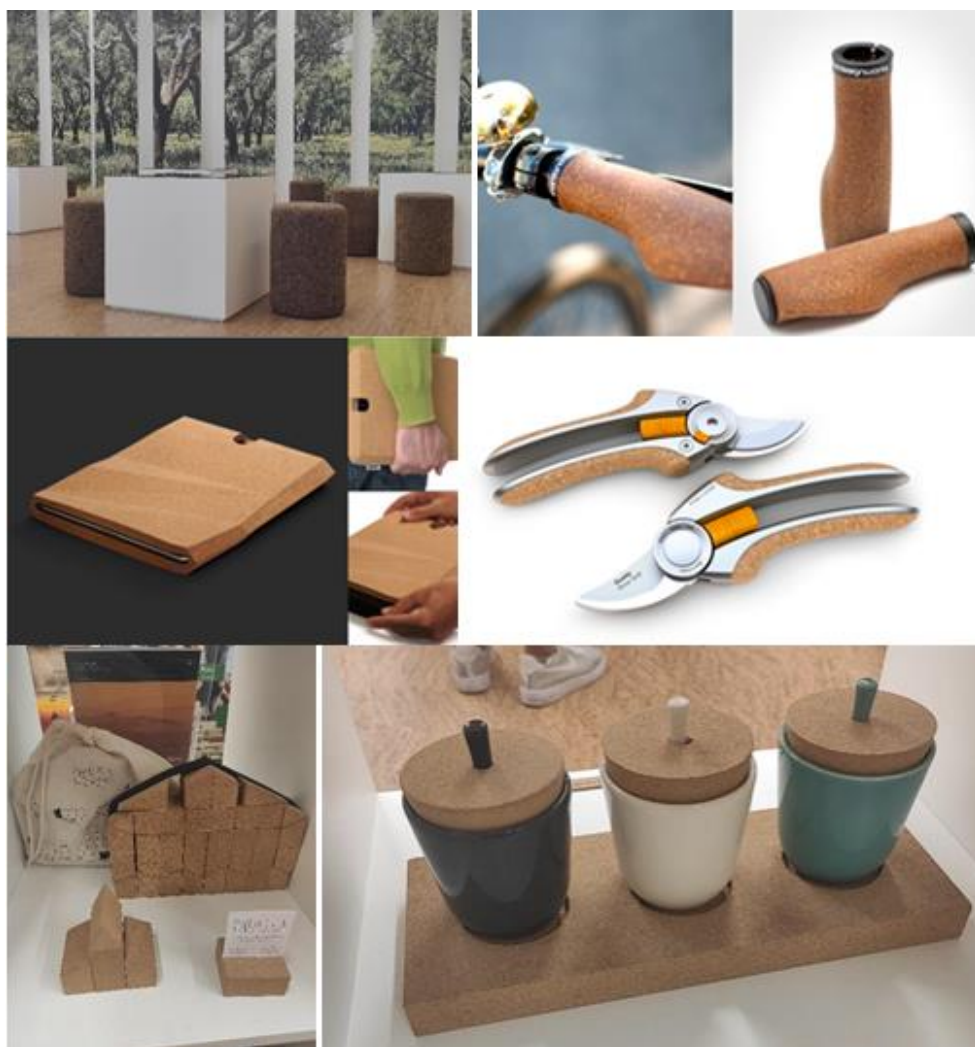
W otwartych środowiskach stosowanie systemów filtrujących nie jest możliwe, dlatego do wyłapywania szkodliwych substancji można użyć dużych ilości korka. Co więcej, w tym przypadku korek może pochodzić z recyklingu, ale wymaga to, aby rzeczywiste komórki korka nie były pokryte żadną warstwą spoiwa i były wystawione na działanie otaczającej atmosfery.

Naturalny, odnawialny i nadający się do recyklingu materiał korkowy o cennych właściwościach znajduje różnorodne zastosowania. Około 70% uzyskanego korka wykorzystuje się jako zatyczki do butelek. Wciąż jednak jest coraz powszechniej stosowany do produkcji materiałów kompozytowych przeznaczonych głównie dla budownictwa (ok. 22%) [3], [4], [20]. Oczekuje się, że w przyszłości rozszerzy swoje zastosowanie w innych obszarach gospodarki.

### **3.2.1 Aglomeraty korkowe do użytku ogólnego**

Kompozyty korkowe wytwarzane są z aglomeratów o różnej granulacji, zwykle o wielkości ziarna 0,5–30 mm. Stosowany granulak to zazwyczaj odpad z produkcji korków. Granulki są mieszane z reaktywnym prepolimerem i prasowane w temperaturze pokojowej lub mieszane ze spoiwem polimerowym i prasowane w podwyższonej temperaturze pod ciśnieniem w celu wytworzenia kompozytów korkowych [4]. Zamierzone właściwości gotowego produktu zależą od wymiarów granulek korka, jego udziału masowego w kompozycie (do 90% mas.), rodzaju spoiwa (poliuretany, żywice fenolowo-formaldehydowe itp.) oraz gęstości upakowania aglomeratów użytych w procesie produkcji.

Wytworzone bloki aglomeratów korkowych są laminowane, kształtowane zgodnie z planowanymi wymiarami i wygładzane (rysunek 3.2). Służą do otrzymywania paneli, desek, wkładek do butów itp. [2], [4]. Aglomeraty na okładziny ścienne [4] i podłogi wytwarza się podobnie, ale z odpowiednim spoiwem lub zmiennym ciśnieniem w procesie prasowania. Otrzymany materiał jest trwalszy i bezwonny. Odporność na ścieranie można zwiększyć poprzez jednokrotne lub wielokrotne nałożenie ochronnej warstwy polimerowej w produktach wielowarstwowych. Osobną, ważną grupę kompozytów korkowych stanowi tzw. korek gumowy, czyli mieszanka granulatu korkowego i gumy. Składniki kompozycji zostają zmieszane (zmieszane), a finalny produkt jest kształtowany i polerowany. Wytworzone kompozyty znajdują zastosowanie jako materiał na uszczelki w samochodach oraz dławnice do zbiorników oleju, ponieważ są nieprzepuszczalne dla cieczy i nie ulegają rozszerzalności poprzecznej ze względu na niską wartość współczynnika Poissona korka [3], [19].



Rysunek 3.2 Stołki korkowe, korkowe uchwyty rowerowe, etui POMM na iPada, nożyce ogrodowe Fiskars, klocki dla niemowląt, uchwyty na kubki i zatyczki [21]–[24].

### 3.2.2 Izolacja termiczna i akustyczna

Aglomeraty korkowe do izolacji termicznej i akustycznej w budownictwie (rysunek 3.3). Korek charakteryzuje się małym przewodnictwem cieplnym, szybkością rozchodzenia się dźwięku oraz impedancją akustyczną, dzięki czemu nadaje się do stosowania jako materiał do izolacji termicznej i akustycznej. Zastosowane w ten sposób kompozyty korkowe zawierają 90–95% masy korka w matrycy poliuretanowej. Zmieszane składniki są zwykle podgrzewane do około 100°C przez określony czas w celu ich aglomeracji. Ten rodzaj materiału jest szeroko stosowany w budownictwie do izolacji termicznej i akustycznej. Jest również używany przez agencje kosmiczne NASA i ESA jako osłony termiczne i antywibracyjne elementów rakiet [2]. Według Portugalskiego Stowarzyszenia Korkowego, Peugeot 208 Natural, zaprezentowany w 2014 roku w Sao Paulo, miał zaimplementowany korek na dachu i desce rozdzielczej. Materiał zapewnił lepszą izolację termiczną i akustyczną.



Rysunek 3.3 Izolacja domu wykonana z aglomeratu korkowego.

Budownictwo jest drugim co do wielkości obszarem, w którym korek naturalny jest wykorzystywany do wygłuszenia ścian, sufitów podwieszanych, tapet, cokołów, wykładzin podłogowych w budynkach oraz izolacji w chłodniach przemysłowych (rysunek 3.4). Stosowane dotychczas kompozyty z rdzeniem z pianki syntetycznej i karbonowym zbrojeniem okładziny mają stosunkowo niską izolacyjność akustyczną. W odpowiedzi na rosnącą potrzebę redukcji hałasu opracowano innowacyjny kompozyt o strukturze warstwowej, składający się z przekładki z naturalnego korka i włókna węglowego. Taki kompozyt wykazuje synergę zalet materiałów składowych. Zachowuje swoje właściwości wytrzymałościowe i niską wagę, tłumi hałas skuteczniej niż tradycyjne materiały izolacyjne (o 250%) oraz jest znacznie trwalszy [3], [25]. Tak zwane czarne aglomeraty powstają z granulek naturalnego korka bez spoiwa w zamkniętym autoklawie w wysokiej temperaturze (ok. 300°C) i wysokim ciśnieniu (ok. 540 kPa) [26], [27]. W wyniku termochemicznej degradacji ścian komórkowych korka uwalniana jest suberyna (działająca jako naturalne spoiwo). Odpady degradacyjne ulegają aglomeracji i powstaje półprodukt do produkcji tablic korkowych [3], [28], [29]. Jest to materiał wielokrotnego użytku, a jednocześnie całkowicie naturalny, bez chemicznych dodatków. Przemysł środków transportu Korek dzięki bardzo małej gęstości ( $0,24 \text{ g/cm}^3$ ) i dobrej izolacyjności jest często wykorzystywany w przemyśle środków transportu jako materiał na elementy pojazdów samochodowych i różnego rodzaju taboru kolejowego.



Rysunek 3.4 Branża podłogowa z wdrożonym aglomeratem korkowym.

### 3.2.3 Obudowa dźwiękochłonna

Jak wspomniano wcześniej, korek jest produkowany z kory dębu korkowego. Jest to naturalny surowiec o unikalnych właściwościach, takich jak niska waga, nieprzepuszczalność cieczy i gazów, elastyczność, ściśliwość oraz dobra izolacyjność termiczna i akustyczna. W swojej naturalnej postaci korek jest również doskonałym środkiem ogniochronnym, chociaż pył korkowy jest wysoce łatwopalny (ponieważ struktura komórkowa została rozbita). Ponadto jest całkowicie biodegradowalny, odnawialny i łatwy do recyklingu. W studium przypadku Kłusak i Grygny [30] przedstawiono zastosowanie sztywnej przekładki typu korek do wykonania kompozytu korkowego oraz jej zastosowanie w pojazdach strażackich.

Do wytworzenia kompozytów i porównania masy próbek zastosowano następujące metody wytwarzania:

- laminacja HLU (Hand Lay Up), - worek próżniowy VB (Vacuum Bagging), laminowanie ręczne z wykorzystaniem próżni
- natrysk włókna ciętego i żywicy SU (Spray-Up)
- Infuzja VI (infuzja próżniowa)
- Wtrysk żywicy CCBM (Closed Cavity Bag Moulding) pod silikonową membranę wielokrotnego użytku
- LRTM (wtrysk żywicy Light Resin Transfer Moulding do zamkniętej formy )

Do tej pory materiał Soric był używany do produkcji kompozytów o grubości 10 mm. Celem badań jest zbudowanie kompozytu, który będzie lżejszy niż kompozyt z przekładką Soric i nie będzie stwarzał problemów technologicznych podczas obróbki. Podczas testów zdecydowano się na wykonanie kompozytu z rdzeniem korkowym i dla porównania przekładką typu SBC. Kompozyt wykonany z przekładki SBC okazał się bardzo niestabilny wymiarowo, ponieważ uzyskano duże



odchyłki grubości w różnych przekrojach próbek. Stał się trudny technologicznie w obróbce i został pominięty w dalszych pracach [30].

W ramach prób wytworzenia kompozytu korkowego różnymi metodami okazało się, że 1 m<sup>2</sup> materiału wykonanego z przekładką korkową ważył 6,2 kg i był o 1,3 kg lżejszy od kompozytu z przekładką włókninową poliestrową typu Soric. W wyniku zastąpienia przekładki syntetycznej Soric przekładką korkową podczas produkcji elementów do nowej konstrukcji kompozytowej udało się zmniejszyć masę produkowanej konstrukcji [30].

Do badań eksperymentalnych próbki wykonano z przekładką korkową, przekładką piankową PVC, przekładką Soric oraz litymi strukturami z laminatu. Testowane materiały kompozytowe posłużyły do budowy unikalnych karoserii, w tym przedziałów załogi do transportu personelu i obsługi. Kompleksowe badania kompozytów zostały przeprowadzone zgodnie z wymaganiami R1 normy PN-EN 45545-2:2013 i obejmowały następujące charakterystyki [30]:

- badanie reakcji na ogień – rozprzestrzenianie się ognia wg ISO 5658-2
- odpowiedź na próbę ogniową. Badanie intensywności ciepła, dymu i szybkości spalania masy wg ISO 5660-1: 50 kW/m<sup>2</sup>
- badanie zadymienia materiałów i toksyczności produktów ich spalania wg ISO 5659-2: 50 kW/m<sup>2</sup> PN-EN-455 45-2:2013 załącznik C.

Badania przeprowadzono na materiałach kompozytowych wytwarzanych w różnych technologiach, w tym na kompozyt typu sandwich. Badania przeprowadzone w ramach ekspertyzy obejmowały palność poziomą (zgodnie z ECE-R 118 załącznik 6), topliwosć materiałów (zgodnie z ECE-R 118 załącznik 7) oraz palność pionową (zgodnie z ECE-R 118 załącznik 8). Badania przeprowadzono dla następujących pięciu konstrukcji [30], [31] :

- nr struktury 1: kompozyt wykonany metodą infuzji składający się z czterokierunkowych tkanin o gramaturze 600 g/ m<sup>2</sup>, rdzenia korkowo-korkowego o grubości 6 mm oraz trudnopalnej żywicy winyloestrowej
- nr struktury 2: kompozyt wykonany metodą infuzji składający się z czterokierunkowych tkanin o gramaturze 600 g/ m<sup>2</sup>, przekładki syntetycznej Soric 6mm oraz trudnopalnej żywicy winyloestrowej
- nr struktury 3: kompozyt wykonany metodą infuzji składający się z 9 warstw czterokierunkowej tkaniny o gramaturze 600 g/ m<sup>2</sup> oraz trudnopalnej żywicy winyloestrowej
- nr struktury 4: Kompozyt wykonany metodą ręcznego laminowania, składający się z czterokierunkowych tkanin o gramaturze 600 g/m<sup>2</sup>, rdzenia z korka dystansowego 6 mm i ognioodpornej żywicy poliestrowej

- struktura nr. 5: Kompozyt wykonany metodą ręcznego laminowania, składający się z czterokierunkowych tkanin o gramaturze 600 g/m<sup>2</sup>, przekładki syntetycznej Soric 6 mm oraz trudnopalnej żywicy poliestrowej

Podsumowując, wszystkie próbki (5 konstrukcji) spełniły wymagania przepisów, co daje doskonałą możliwość doboru odpowiedniej konstrukcji w zależności od wymaganej wytrzymałości mechanicznej [32] -[35]. Zgodnie z normą PN-EN ISO 527-4 próbki wykonane z przekładką korkową o grubości 30 mm uzyskały niższą wartość profilu ugięcia przy maksymalnym naprężeniu niż z pianką PVC [34]. Wyniki otrzymały następujące materiały: profil ugięcia korka o maksymalnym naprężeniu 17,2 mm; Pianka PCV 26,67 mm. Konstrukcja z korkiem jako materiałem przekładki wykazała większą sztywność, nawet o 35%, w porównaniu z przekładką piankową [30].

Stosowanie kabin wtykowych i konstrukcji przeciwpożarowych jest uzasadnione z kilku powodów. Korek pozwala na znaczne zmniejszenie masy produkowanych elementów, co przekłada się na mniejsze zużycie paliwa w użytkowanych samochodach strażackich. Zmniejszenie masy pozwala również na przewożenie bardziej specjalistycznego sprzętu ratowniczego bez ryzyka przekroczenia dopuszczalnych nacisków na oś samochodu. Kabiny samochodów zostały wygłuszone specjalnie montowanymi matami oraz zabezpieczone warstwą usztywniającą. Postanowiono zastąpić inne stosowane materiały dystansowe metodami obróbki korka i w jednej operacji metodą infuzji wykonać kabinę samochodu. Taka kabina z przekładką korkową okazała się lżejsza przy zachowaniu wymaganej wytrzymałości mechanicznej. Kabina uzyskała podwyższoną izolacyjność akustyczną bez wykonywania dodatkowych czynności, co zmniejszyło ilość roboczogodzin potrzebnych do wygłuszenia kabiny. Kabinę wykonano również z układem i materiałami spełniającymi wymagania odporności ogniowej zgodnie z regulaminem ECE R 118 [30], [31].

#### **3.2.4 Struktury podobne do kanapek**

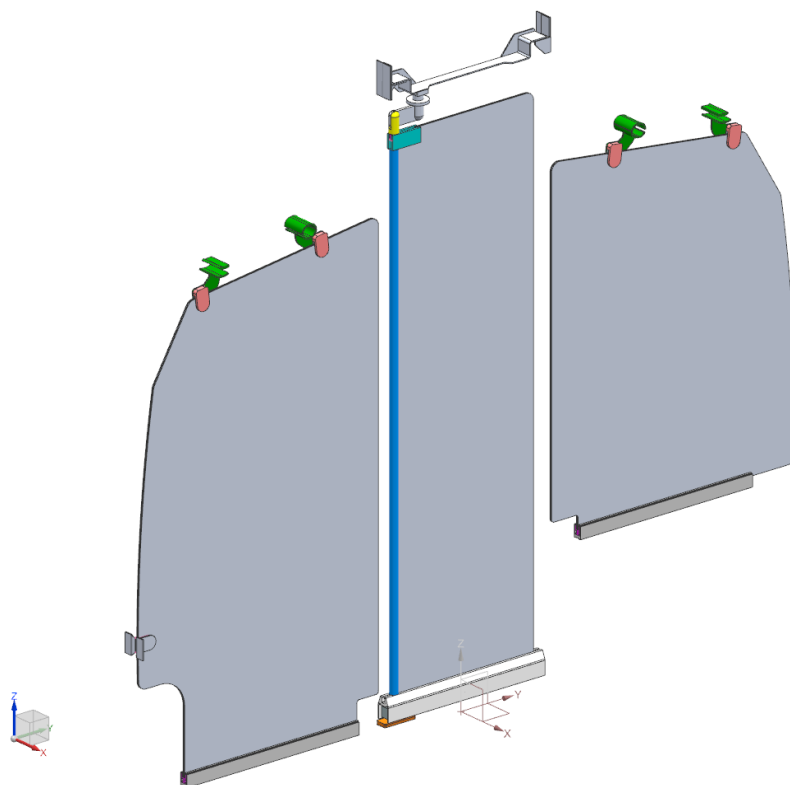
Lekkie konstrukcje panelowe to dobry wybór do szybkich przeróbek przestrzeni pasażerskiej pojazdu. Może być stosowany do tymczasowych ścian, podłóg i sufitów. Tego rodzaju panele są zwykle konstrukcjami warstwowymi. Zewnętrzne panele wykonane są z materiału typu side skin, który zapewnia sztywność i przenoszenie większości obciążeń, podczas gdy wewnętrzny materiał rdzenia jest lekki. Materiał rdzenia przyklejony do paneli skóry zapobiega wyboczeniu. W tym miejscu należy zauważyć, że ani panele poszyciowe, ani materiał rdzenia nie są w stanie wytrzymać nawet niewielkiej części obciążeń, które może wytrzymać prawidłowo sklejony materiał warstwowy, głównie z powodu utraty stabilności, zwykle określanej jako wyboczenie.

Rysunek 3.5 przedstawia aluminiowe panele poszycia o różnych grubościach i z różnych materiałów rdzenia.

Obecnie materiały rdzeniowe dzielą się na naturalne lub syntetyczne, takie jak drewno, sklejka, konopie, słoma czy korek. Dolny lewy panel (Rysunek 5) jest tworzony z materiału rdzenia z drewna balsy prostopadle do kierunku słojów do powierzchni panelu. Dwa inne panele są tworzone z syntetycznymi rdzeniami, które mają aluminiowe rdzenie o strukturze plastra miodu i piankowe. Reszta paneli ma rdzenie korkowe. Należy wspomnieć, że w konstrukcjach warstwowych objętość materiału rdzenia może sięgać nawet 95% materiału. Dlatego kluczowe znaczenie ma zapewnienie wysokiego stopnia wykorzystania ekologicznych i zrównoważonych materiałów na rdzenie. Panele typu skin, zwykle wykonane z aluminium, mają niewielki wpływ na środowisko ze względu na ich wysoką zdolność do recyklingu. Wykorzystanie do tego celu naturalnych materiałów umożliwia tworzenie wydajnych, lekkich konstrukcji o niskim śladzie węglowym.



Rysunek 3.5 Panele warstwowe z drewnem balsy, korkiem, aluminiowym plastrem miodu i rdzeniem z pianki syntetycznej.



Rysunek 3.6 Model tymczasowych ścian pociągu.

Wśród sektorów, w których mogą być stosowane płyty z rdzeniem korkowym, konieczne jest omówienie i przegląd ogólnych wymagań i dobrych praktyk w konkretnym sektorze. W branży kolejowej, gdzie wymogi bezpieczeństwa są przesunięte na długotrwałą eksploatację, powszechną praktyką są tymczasowe instalacje do przebudowy wnętrza. Wymagania stawiane szerokokadłubowym samolotom pasażerskim są bardzo wysokie, a ze względu na dużą koncentrację pasażerów i krótki czas ewakuacji nie jest możliwe stosowanie ruchomych, tymczasowych ścian. Dla branży motoryzacyjnej tymczasowe rearanżacje wnętrza są bardzo rzadkie i są rozwiązaniami bardzo niestandardowymi. W przemyśle morskim statki i jachty są projektowane tylko w jednym celu i wprowadza się tylko drobne zmiany.

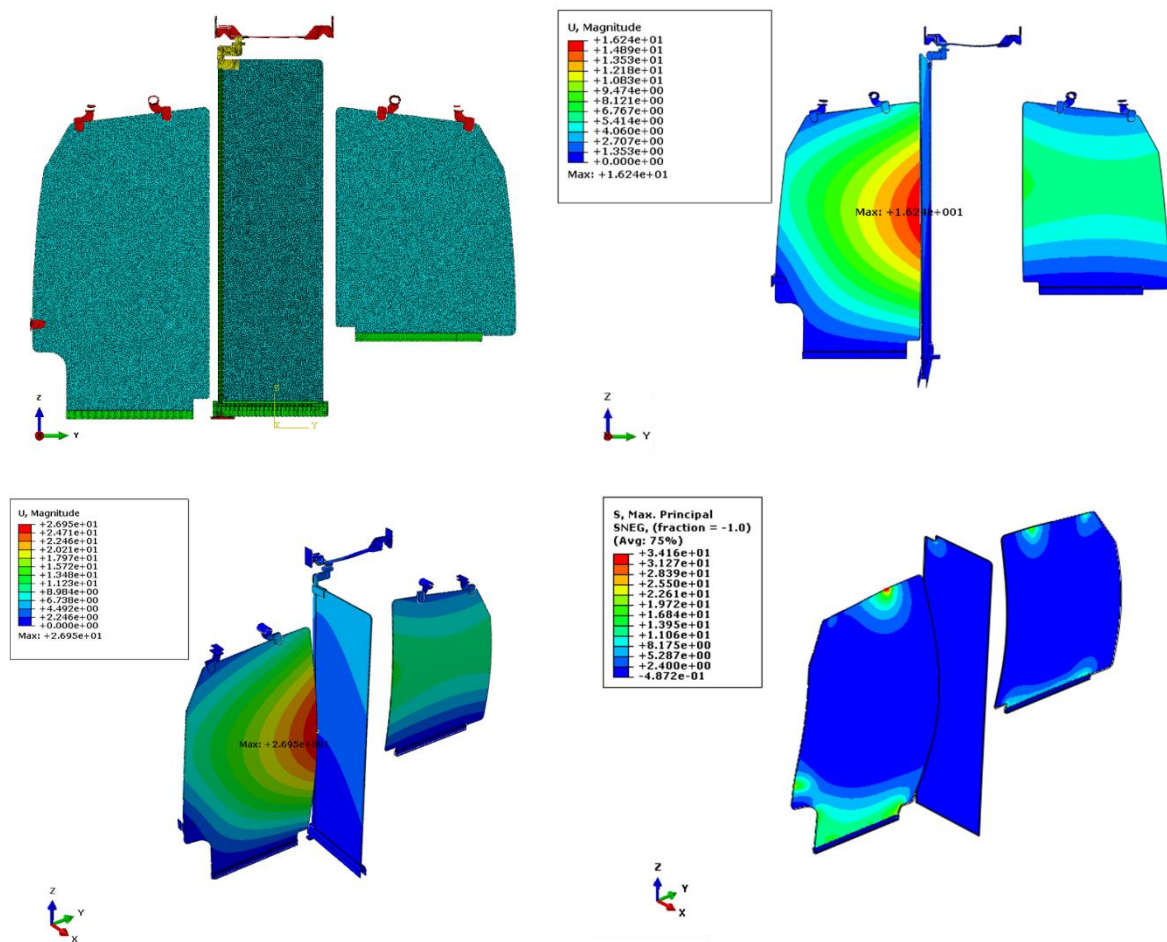
W przedstawionym scenariuszu przedstawiono tymczasową ścianę pociągu do przebudowy wnętrza (rysunek 3.6). Ścianę taką można zdemontować i ustawić w nowym miejscu podczas przygotowywania pociągu do podróży, zmieniając rozkład pasażerów we wnętrzu. Oryginalna koncepcja uwzględniała dwa materiały na te ściany: wysoce modyfikowaną sklejkę z błyszczącą farbą powierzchniową i klejone dwuwarstwowe szkło. Po rozważeniu przyjmuje się, że możliwym wyborem jest zmiana materiałów na materiał warstwowy z rdzeniem korkowym.

Jedną z zalet materiału warstwowego z rdzeniem korkowym jest jego wysokie właściwości tłumienia dźwięku. Jest znacznie lepszy od wysokomodyfikowanej sklejki czy klejonego dwuwarstwowego szkła, głównie dzięki zastosowaniu dwóch połączonych materiałów o znacznych zmianach gęstości, które działają jak filtr pasmowoprzepustowy. Przy podobnym scenariuszu masowym płyty warstwowe

mają znacznie większą sztywność niż wspomniane wcześniej materiały o większej grubości. Wadą konstrukcji z płyt warstwowych jest skomplikowany montaż, który wymaga zastosowania wkładek do przenoszenia sił ściskających pochodzących z połączeń śrubowych. Wysoka odporność ogniowa została uwzględniona na tym samym poziomie co sklejka, natomiast tafla szklana posiada wybitne właściwości ognioodporne.

Analiza Elementów Skończonych (MES) pozwala określić naprężenia w materiale oraz odkształcenia badanej geometrii pod wpływem przyłożonych obciążeń. Zwykle MES wymaga następujących kroków: oczyszczenia oryginalnej geometrii poprzez usunięcie z niej zbędnych elementów, przygotowania modelu dyskretnego (przekształcenie domyślnie nieskończonej ciągłej geometrii na elementy dyskretne), zastosowania mechanizmów interakcji, takich jak styki, wiązania czy połączenia klejące, użycia warunki brzegowe i siły, ustawienia parametrów symulacji. Rysunek 3.7 w lewym górnym rogu przedstawia przygotowany model dyskretny z ukrytymi warunkami brzegowymi i siłą, podczas gdy inne przykłady na rysunku 3.7 przedstawiają wyniki scenariuszy przypadków statycznych, które zakładają silny nacisk na inne pojazdy pociągu. Rysunek 3.7, górny prawy i dolny lewy, to wykresy deformacji, które wystąpią pod założonymi obciążeniami. Należy zauważyć, że skala jest w milimetrach, a skala deformacji jest dziesięciokrotnie powiększona dla lepszej wizualizacji kierunków deformacji. Rysunek 3.7 w prawym dolnym rogu przedstawia maksymalne naprężenia główne (MPa) w częściach poddanych wyżej wymienionym obciążeniom. Bez szerszych rozważań i wyjaśnień, co wykracza poza ramy tej książki, przedstawione wyniki należy traktować jako jakościowe, a nie ilościowe.

Jedną z interesujących właściwości materiału korkowego w konstrukcjach warstwowych jest doskonała rola podporowa dla paneli poszycia przenoszących większość obciążeń. W próbach 4-punktowego zginania w środku próbki występuje czysty stan naprężenia zginającego. Badacze muszą określić ogólną wytrzymałość konstrukcji i ocenić mechanizm uszkodzeń w określonej kombinacji materiału płyty i rdzenia, biorąc pod uwagę grubość i zastosowaną warstwę adhezyjną. Jak pokazano na rysunku 3.8, wyniki testów wskazują na dobre właściwości korka w stosunku do przyłożonych obciążeń. Pierwszy panel piankowy (górny) uległ miejscowemu uszkodzeniu w wyniku miejscowego przeciążenia rdzenia, który zapadł się i spowodował nadmierne odkształcenie skóry. W przeciwieństwie do tego, drugi panel piankowy podlegał siłom ścinającym w strefie przylegania pomiędzy pianką a skórą. W przypadku korka, gdzie wyniki wymagają znacznie głębszego rozważenia, można powiedzieć, że korek ma dobre właściwości adhezyjne z różnymi materiałami skórnymi oraz dobre właściwości podtrzymywania skórek, które zapobiegają miejscowym uszkodzeniom. W większości przypadków cała struktura ma szeroki zakres wpływów.



Rysunek 3.7 Lewy górny róg — dyskretny model tymczasowych ścian pociągu; u góry po prawej — Widok z przodu odkształcenia tymczasowych ścian pociągu pod wpływem scenariusza przypadku ciężkiego pchania w kierunku ruchu [mm]; lewy dolny róg - Widok izometryczny odkształcenia ścian tymczasowych pociągu pod wpływem scenariusza przypadku ciężkiego pchania w kierunku ruchu [mm]; prawy dolny róg — widok izometryczny tymczasowych ścian pociągu naprężenie główne w przypadku scenariusza przypadku dużego obciążenia pchającego w kierunku ruchu [MPa].

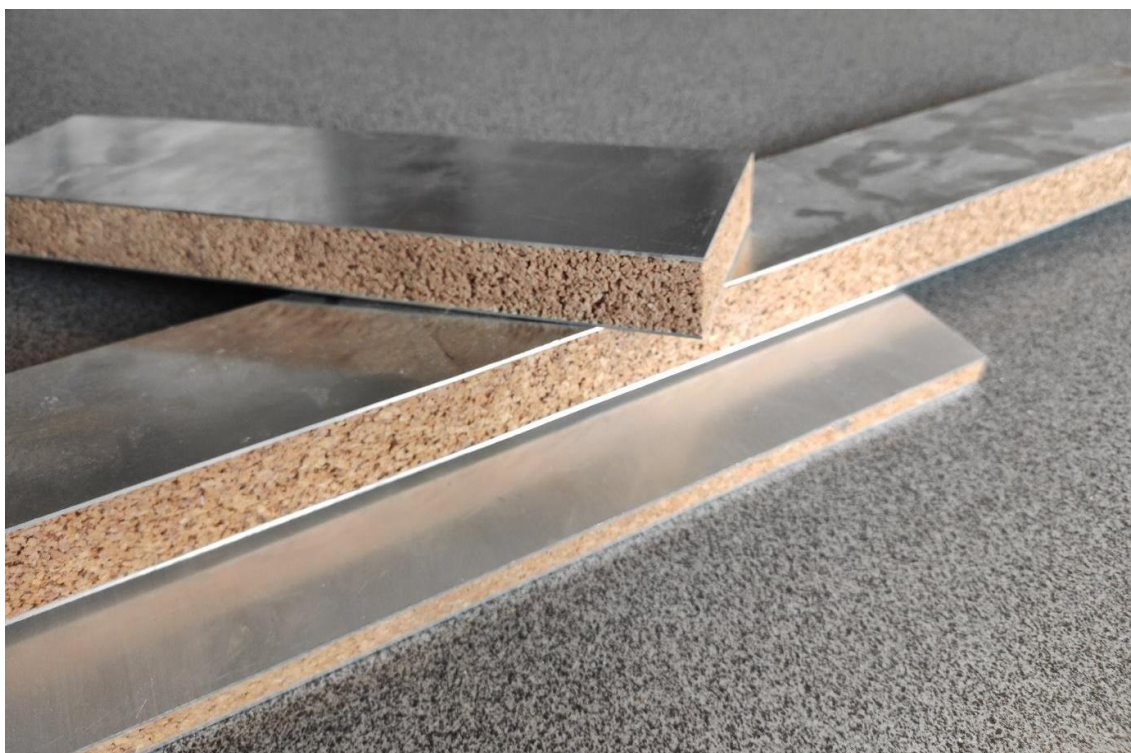


Rysunek 3.8 Analiza posteksperymentalna trybu i mechanizmów uszkodzeń płyt warstwowych z rdzeniem z korka i materiałów syntetycznych.

Przedstawiony przykład paneli typu skin jest jednym z najciekawszych, ekonomicznie i konstrukcyjnie uzasadnionych przypadków zastosowania zaawansowanego materiału korkowego. Osiąga się połączenie materiałów powłokowych o wysokiej wytrzymałości i sztywności, takich jak aluminium lub żywica epoksydowo/poliestrowa kompozytowych w małej objętości z dużą objętością materiału rdzenia, którym może być np. korek, materiał warstwowy. Pozwala to na projektowanie inteligentnych, lekkich i wytrzymałych konstrukcji o niskim śladzie węglowym i gotowych do wprowadzenia na rynek.

### **3.2.5 Motoryzacja**

Korek służy do wykonywania różnych uszczelnień, zwłaszcza w samochodach oraz do wykańczania wnętrza kabin pojazdów. Wykorzystuje się jej elastyczność, odporność na ciepło i uderzenia oraz przyjemną w dotyku teksturę [5], [36]. Przemysł transportowy ma rosnące zapotrzebowanie na materiały o wysokim stosunku wytrzymałości do masy [37]. Ze względu na małą gęstość, wysoką wytrzymałość, niezależny poziom wilgoci i zmiany temperatury korek jest stosowany jako materiał rdzenia w konstrukcjach warstwowych. tzw. sandwich, w którym materiałem rdzenia jest aglomerat korkowy, a cienkie wielowarstwowe okładziny wykonane są z materiałów o dużej sztywności, takich jak stal, stopy aluminium, polimery czy różne kompozyty włókniste [3], [27], [38], [39]. Badania nad warstwowymi kompozytami aluminiowo-korkowymi wytwarzanymi w warunkach przemysłowych (Carbon Fox), z potencjalnym zastosowaniem na ściany i podłogi w kolejnictwie. Na rysunku 3.9 przedstawiono przykładowy wyrób wykonany w technologii wytwarzania kompozytów z prepregów w wyżej wymienionej firmie.



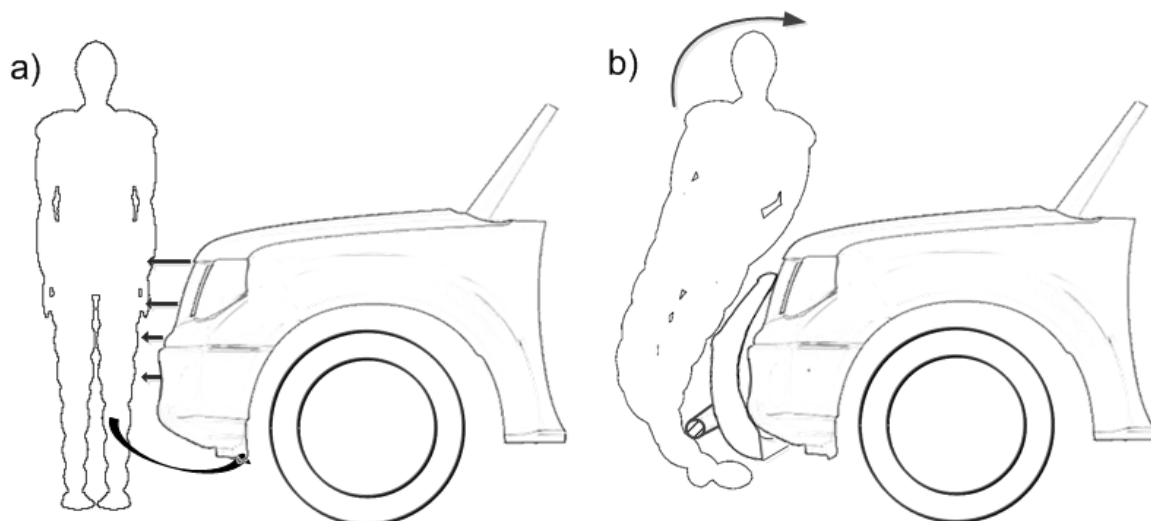
Rysunek 3.9 Szczegółowy widok powłoki aluminiowej i materiału warstwowego z rdzeniem korkowym o różnych grubościach.

Element karoserii, panel wahacza do samochodu rajdowego, wykonany jest z włókien węglowych i aramidowych w matrycy z żywicy epoksydowej, z rdzeniem z przekładki korkowej (rozwiązanie na podstawie zgłoszenia patentowego P-413342). Korkowa przekładka została zastosowana w celu zwiększenia sztywności produktu przy zachowaniu wymaganej wagi, uderzalności, pochłaniania energii i żywotności oraz obniżenia kosztów produkcji. Warto wspomnieć o wyjątkowym zastosowaniu korka w przemyśle pojazdów kosmicznych. Jakość materiałów izolacyjnych odgrywa istotną rolę w silnikach rakietowych, ponieważ struktura ich elementów narażona jest na działanie wysokich temperatur stwarzających zagrożenie wybuchem gazu podczas startu i powrotu rakiet na Ziemię. Ze względu na swoje właściwości korek jest zwykle używany do produkcji dysz i osłon termicznych krytycznych dla bezpieczeństwa rakiet.

#### **3.2.5.1 Studium przypadku**

Rozdział ten wprowadza czytelnika w studium przypadku, w którym autorzy przedstawiają podejście do wykorzystania kompozytu korkowego w sektorze motoryzacyjnym. Badania miały na celu poprawę bezpieczeństwa niechronionych użytkowników dróg (VRU) poprzez opracowanie i wdrożenie przedniego systemu ochronnego (FPS), który łagodzi obrażenia podczas zderzenia z pojazdem.





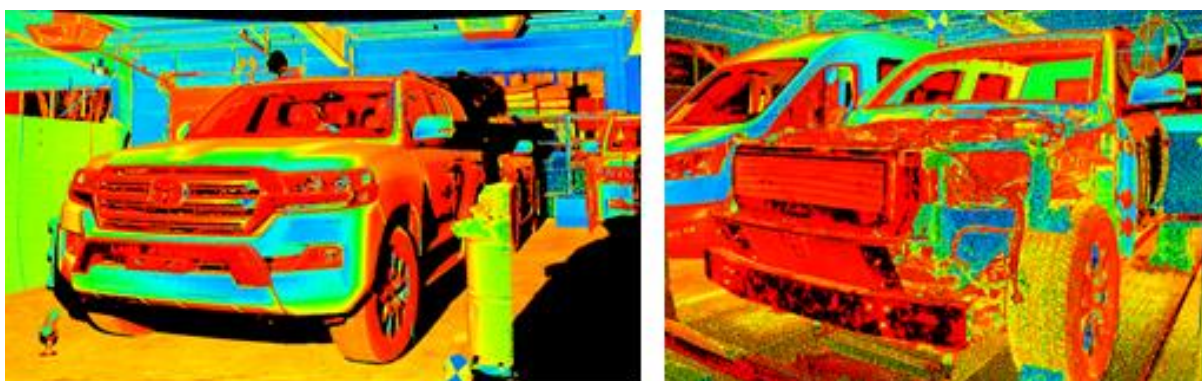
Rysunek 3.10 Schemat ideowy kinematyki pieszego po zderzeniu z SUV-em: a) bez bezpiecznego FPS; b) z bezpiecznym FPS zamontowanym w pojeździe – na podstawie autorskiego patentu [40].

W związku z tendencją do kupowania SUV-ów w Europie i coraz częstszym ich udziałem w wypadkach z udziałem pieszych i rowerzystów (SUV-y są powszechnie używane w miastach) autorzy zidentyfikowali potrzebę bezpiecznego systemu ochrony czołowej (rys. 3.10) [41] – [43]. Zaprojektowany FPS zapewnia pieszym i rowerzystom odpowiednią, popartą badaniami numerycznymi, kinematykę po zderzeniu z pojazdem, jednocześnie przyczyniając się do zmniejszenia obrażeń poprzez zastosowanie odpowiednich materiałów pochłaniających energię, tj. materiałów naturalnych (korek) i kompozyty (włókno węglowe). W ramach badań stworzono i przetestowano wielowymiarowe modele numeryczne oraz fizyczny prototyp. To wdrożenie połączenia korka z włóknami węglowymi pozwoliło autorom na zastąpienie w FPS stali i stopów aluminium. Należy podkreślić, że opracowanie nowego FPS nie tylko zwiększyło bezpieczeństwo VRU, ale także poprawiło konstrukcję przodu pojazdu (rysunek 3.11).



Rysunek 3.11 Proponowana konstrukcja przedniego układu zabezpieczającego.

W kolejnym etapie wykonano dokładny skan 3D za pomocą skanera Leica P20 pojazdu ze zdjętym pasem przednim w celu rozpoznania elementów mocowania przedniego układu zabezpieczającego. Pomiary wykonano z dwóch pozycji skanera i połączono w oprogramowaniu Leica Cyclon [44]. Rejestrację – czyli efekt procedury scalania skanowania – przedstawiono na rysunku 3.12 (z zaznaczoną intensywnością odbicia). Jakość otrzymanej chmury punktów w przypadku metod optycznych zależy m.in. od współczynnika odbicia powierzchni obiektu. Zeskanowane elementy konstrukcyjne są stosunkowo czarne, co powoduje brak punktów w chmurze punktów reprezentujących geometrię bryły. Wpływ tej właściwości jest szczególnie widoczny przy porównaniu przezroczystych szyb lub reflektorów z bardziej pochłaniającą światło konstrukcją przodu.



Rysunek 3.12 Chmura punktów pojazdu Toyota Land Cruiser ze zdemontowanym pasem przednim (z zaznaczoną intensywnością cienia).

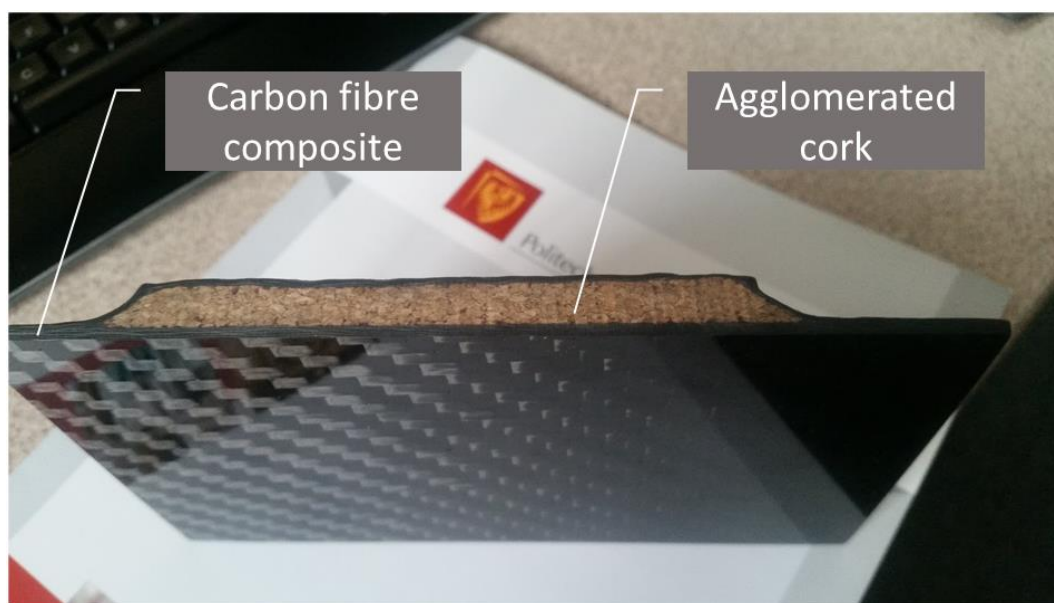
Końcowym wynikiem pomiarów jest połączona chmura punktów ze wszystkich skanów, która jest podstawą do odtworzenia geometrii czoła pojazdu. Uzyskana tolerancja skanowania po połączeniu chmury punktów wyniosła ok. 1 mm. Przykładowy widok chmury punktów uzyskanej ze skanowania przedstawiono na rysunku 3.13. Stanowi podstawę projektową do modelowania przedniego układu zabezpieczającego. Dalsze prace projektowe prowadzono w oprogramowaniu CATIA v5.



Rysunek 3.13 Chmura punktów Toyota Land Cruiser z modelami FPS (po lewej) i renderowaniem FPS (po prawej).

Badano różne gatunki dębu korkowego, tj. korek naturalny, korek aglomerowany kompozytowy z poliuretanem oraz korek wypełniony cieczą nienewtonowską [45]. Ze względu na minimalizację urazów głowy podczas wielokrotnych uderzeń (zwłaszcza u motocyklistów) zbadano również różne konfiguracje ułożenia różnych rodzajów korka połączonego klejem (kompozyty korkowe). Na koniec opracowano również model materiałowy (MES), który zostanie zweryfikowany podczas testów eksperymentalnych. Ze względu na właściwości bezpieczeństwa FPS zastosowanie materiału korkowego do wypełnienia energochłonnego FPS było jak najbardziej rozsądnym wyborem. Rozważono jednak dwa rodzaje wzmocnienia (pokrywającego materiał korka): włókna węglowe i szklane. Węgiel składa się ze struktur prawie całkowicie chemicznie podobnych do grafitu. Charakteryzują się dużą odpornością na wysokie temperatury i chemikalia oraz dobrą przewodnością cieplną i elektryczną. Ponadto do zalet włókien węglowych należy niska gęstość, wysoka wytrzymałość oraz zdolność tłumienia drgań.

Ponadto, co ważne w kontekście rynku motoryzacyjnego, włókno węglowe ma atrakcyjny wygląd (wykres 3.14). Rozważano również technologię włókna szklanego S-2 / SC-15 [46]. Właściwości włókien szklanych różnią się od właściwości czystego materiału szklanego, ponieważ charakteryzują się dużą wytrzymałością na rozciąganie i elastycznością, dzięki czemu nie pękają przy dużych kątach zginania. Jednak właściwości kompozytów z włóknami szklanymi są gorsze od materiałów wzmocnianych włóknami węglowymi. Dlatego ostatecznie zdecydowano się na zastosowanie włókien węglowych w prototypie FPS-a. Wady polimerów wzmocnianych włóknem węglowym (CFRP) obejmują wysoką cenę materiału i bardziej skomplikowany proces produkcyjny niż zbrojenie włóknem szklanym [47].



Rysunek 3.14 Przekrój przedniego układu zabezpieczającego wykonanego z korka aglomerowanego jako rdzenia i splotu diagonalnego włókna węglowego.

Zapotrzebowanie rynku wymaga nie tylko produktu o odpowiednich zabezpieczeniach, ale również atrakcyjnego wzornictwa. Dlatego autorzy wybrali strukturę splotu skośnego, który jest najczęstszym typem splotu części z włókna węglowego – czasami określanym jako splot 2x2 [48]. Wzór przechodzi przez dwie przecinające się osnowy, tworząc tkaninę o ukośnym wzorze (rysunek 3.5).

Badania homologacyjne wymagane dla FPS, tj. Rozporządzenie (WE) 78/2009 [49] oparte na impaktorach, nie obejmują pełnej kinematyki zderzenia pojazdu z pieszym. Dlatego nasze podejście obejmowało analizę kinematyczną uderzenia pieszego przez pojazd wyposażony w kompozytowy system ochrony przed uderzeniami czołowymi. Wykorzystaliśmy elipsoidalny manekin pieszego z biblioteki MADYMO v7.5. Liczne niezależne instytucje potwierdziły, że ten manekin jest szeroko stosowany w testach bezpieczeństwa pieszych i jego wierności biologicznej. Na podstawie wyników badań [50], [51] punkt styku manekina z podłożem określono na 0,55. Przez całą symulację manekin znajdował się w polu przyspieszenia  $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ . Prędkość początkowa pojazdu wynosiła 40 km/h bez zastosowanego opóźnienia hamowania.

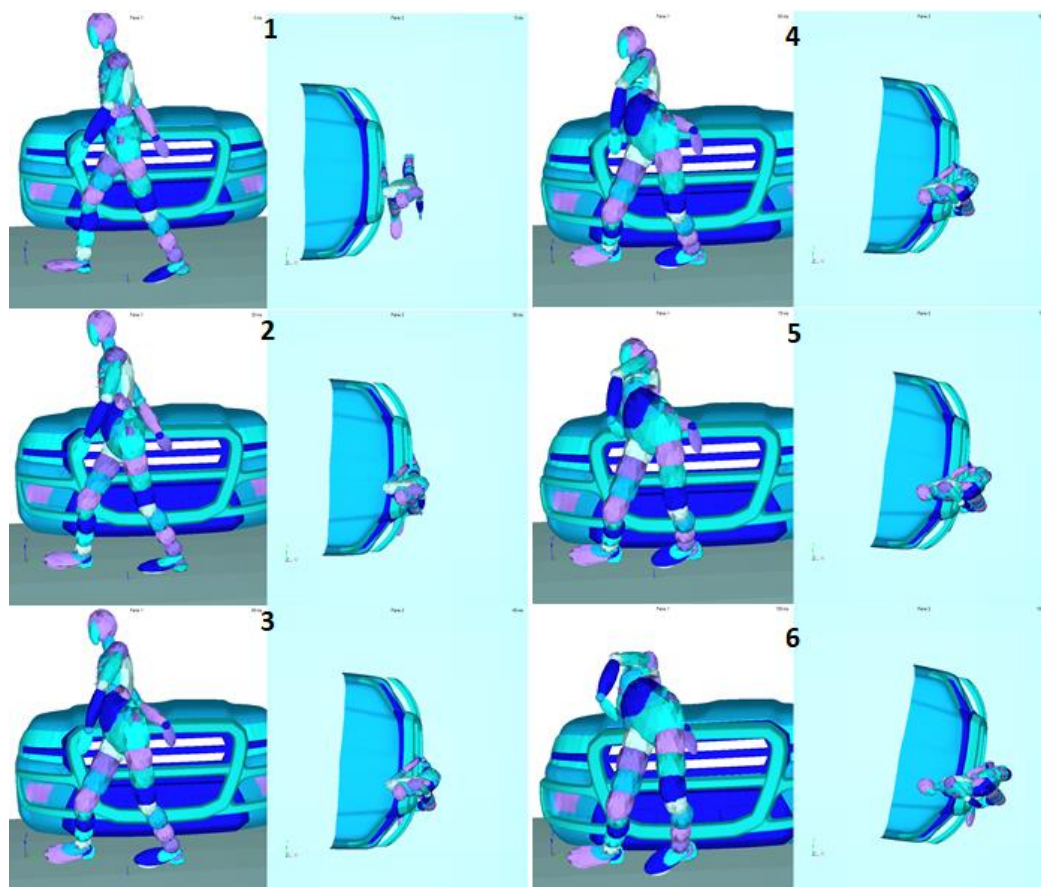
Za najgorszy przypadek obliczeniowy uznano warunki brzegowe, które definiują ograniczenie czoła pojazdu [52]. Połączenia śrubowo-nakrętkowe zostały odwzorowane przy użyciu elementów belek i zestawów węzłów dostępnych w kodzie LS-DYNA. Cały układ numeryczny przedstawiono na rysunku 3.15.



Rysunek 3.15 Dyskretny model przodu pojazdu z zamontowanym FPS i manekinem MADYMO 50 percentyla.

Analizując przedstawiony poniżej przebieg symulacji można zaobserwować znaczną poprawę parametrów kinematycznych i biomechanicznych manekina w stosunku do pojazdu niewyposażonego w FPS (rysunek 3.16). Największe ugięcia w kolanie zostały znacznie zredukowane, co potwierdzają również badania kryteriów biomechanicznych. Głowa i górna część ciała pozostają przez pewien

moment nieruchome pod wpływem siły bezwładności, ale zadany obrót umożliwia rzut głowy na maskę pojazdu. Obserwujemy zmniejszone ugięcie kręgów szyjnych manekina, co zmniejsza prawdopodobieństwo poważnego urazu [53]. Przebieg kinematyki manekina umożliwia zastosowanie innych systemów poprawiających bezpieczeństwo pieszych – w tym maski podnoszącej z dodatkową amortyzacją gazową, np. poduszki powietrznej chroniącej głowę. Obrót zadany pieszem powoduje również, że pieszy nie doświadcza maksymalnego przyspieszenia całego ciała w krótkim czasie. Dodatkowo przyspieszenie głowy nie przekracza parametru standardowego, m.in. HIC (wartość krytyczna 1000 – w symulacji <100) [54], [55].



Rysunek 3.16 Symulacja numeryczna zderzenia pieszego LS-DYNA i MADYMO przy prędkości 40 km/h – kolejne ujęcia 0-100 ms pokazane w odstępach 15 ms.

Ocena skuteczności FPS w zapewnieniu ochrony pieszych obejmowała pozytywną walidację kinematyczną. Ocena trajektorii pieszego po zderzeniu była wystarczająca na etapie projektowania SPS. Kolejnym etapem prac w ramach kryterium optymalizacyjnego było spełnienie przez FPS wymagań homologacyjnych określonych w Rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) 78/2009 dla badania zderzenia zderzacza nogi z przednim układem zabezpieczającym opisanego w [56]. Ostateczny projekt FPS-a zamontowanego na pojeździe Toyota Land Cruiser i Fordzie Transit przedstawiono poniżej (Rysunek 3.17).



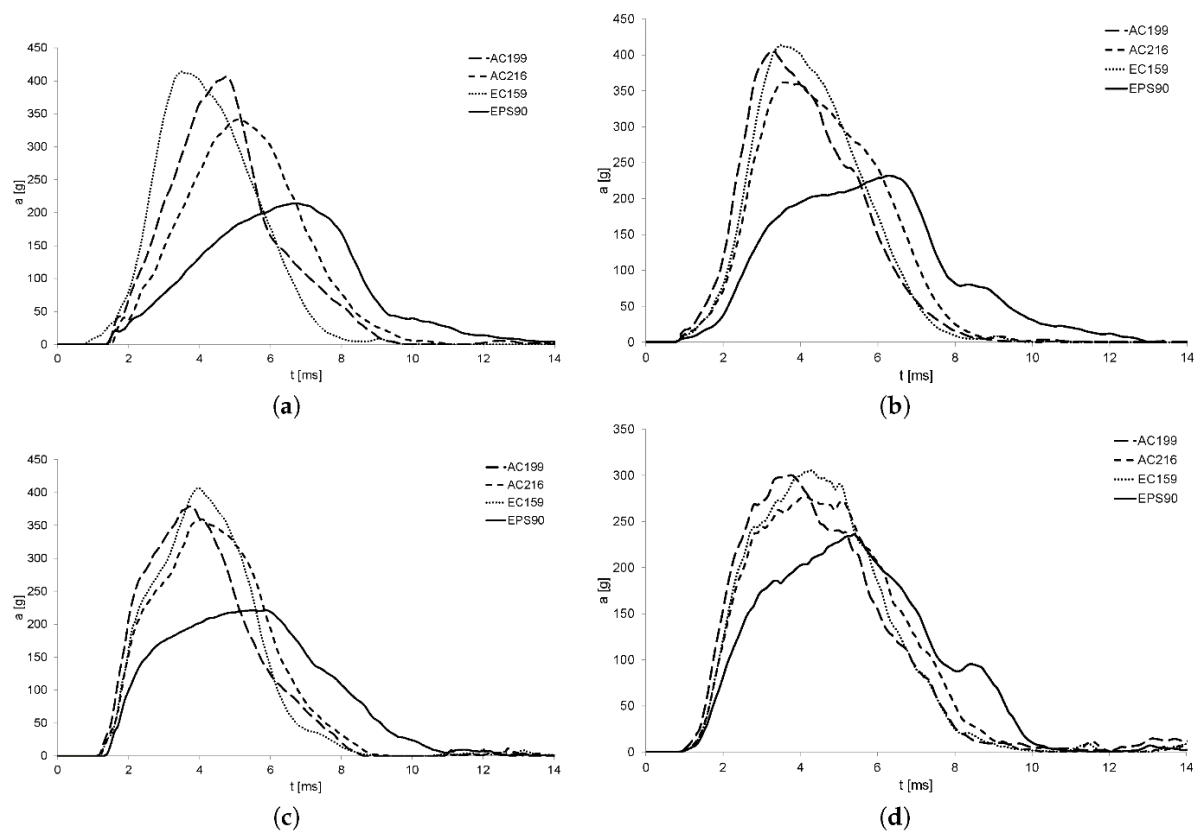
Rysunek 3.17 Przedni układ zabezpieczający wykonany z korka i CFRP montowany w Toyocie Land Cruiser (po lewej) i Fordzie Transit (po prawej).

### **Uwagi**

Badania miały na celu poprawę bezpieczeństwa pieszych i rowerzystów poprzez opracowanie i wdrożenie systemów opartych na naturalnych materiałach energochłonnych. W tym studium przypadku zaprojektowano i przetestowano numerycznie korkowo-korkowy FPS. Kompozyt z włókna węglowego jest coraz częściej stosowany w przemyśle motoryzacyjnym ze względu na małą gęstość masy i wysoką wytrzymałość. Dzięki temu FPS wykonany z włókna węglowego może skutecznie chronić przednie elementy pojazdu. Ponadto zdolność pochłaniania energii przez rdzeń z korka może zmniejszyć obrażenia odniesione przez pieszego podczas wypadku. Połączenie materiału korkowego i włókna węglowego to dobre rozwiązanie przy doborze materiału na elementy chroniące samochód i pieszego. Tym samym udowodniono, że połączenie korka i włókna węglowego to doskonałe rozwiązanie przy doborze materiału na elementy chroniące zarówno samochód, jak i pieszego – korek zapewnia pochłanianie energii mechanicznej, dzięki czemu urazy doznane przez człowieka są stosunkowo niewielkie. Natomiast włókno węglowe ze względu na swoją wytrzymałość chroni przednią część pojazdu.

### ***3.2.6 Technologia pochłaniania energii***

Obecne trendy w ciągłym poszukiwaniu materiałów przyjaznych dla środowiska i efektywnych kosztowo doprowadziły do licznych badań różnych grup badawczych [3], [57]–[65]. Obecnie większość środków ochrony osobistej wykorzystuje pochłaniającą energię wkładki wykonane z syntetycznych materiałów komórkowych, takich jak spieniony polistyren (EPS) i spieniony polipropylen (EPP), z kombinacją różnych gęstości w różnych podkładkach, pochłaniając energię uderzenia poprzez trwałe odkształcenie. Pod wpływem obciążenia ściskającego materiały komórkowe mogą ulegać dużym odkształceniom przy zachowaniu prawie stałego poziomu niskiego naprężenia aż do zagęszczenia [66]. W pracy Fernandes i zesp. [67] jako punkt odniesienia zastosowano dostępny w handlu kask motocyklowy z EPS, certyfikowany zgodnie z normą europejską R22.05 [68] (Rysunek 3.18). Pomysł polegał na porównaniu wyników walidacji kasku z EPS jako liniowym i z aglomerowanym korkiem jako wyściółką. Badania przeprowadzono z aglomeratami korkowymi AC199, AC216 i EC159 (AC - korek aglomerowany, EC - korek ekspandowany).



Rysunek 3.18 Przyspieszenie mierzone w warunkach testowych modelu głowy COG – ECE 22.05: (a) Punkt uderzenia B. (b) Punkt uderzenia P. (c) Punkt uderzenia R. (d) Punkt uderzenia X zaadaptowano z [67].

Można zauważyć, że aglomerat korkowy AC216 wyróżniał się spośród innych proponowanych konfiguracji. Dla badanych krzywych przyspieszenie-czas charakterystyka krzywej jest szersza i ma mniejsze przyspieszenia szczytowe. Dodatkowo AC216 był najlepszym materiałem pod względem reakcji na drugie uderzenie, nawet lepszym niż EPS90. Co więcej, AC216 ma większą zdolność wytrzymywania energii uderzenia. Dlatego uważa się, że hełm zastosowany w tej analizie pochłaniał energię o grubości większej niż wymagana dla AC216. Dalszym etapem badań była modyfikacja geometrii wkładki. Zdaniem autorów najlepszym przypadkiem była wykładzina AC216 o grubości 40 mm z 15 mm otworami w układzie kołowym o kącie  $30^\circ$  i rozstawie 45 mm. Pomogło to zredukować 0,907 kg z konstrukcji. Podsumowaniem badań była współpraca z CMS, portugalską firmą produkującą kaski. Produkt wzbogacono o wkładkę korkową odpowiedzialną za pochłanianie energii (rysunek 3.19).

Portugalska firma Nexx s opracowała korkowy kask do dyscyplin zimowych podobny do CMS. Technologia pochłaniania energii jest stosowana jako część wewnętrznej amortyzacji. Skorupa jest tworzona przez odporną na uderzenia, zaawansowaną skorupę z żywicy termicznej, miękka, przeciwpotną, antyalergiczną podszewkę wewnętrzną (którą można wyjmować), z daszkiem PC Lexan. Dodatkowo producent oferuje wzór korkowej skorupy [69].



Rysunek 3.19 Koncepcja kasku motocyklowego z korka (po lewej) i kasku z korkową skorupą (po prawej) [69].

### 3.3. Wnioski

Korek to niezwykle naturalny surowiec o unikalnym połączeniu synergistycznie wzmacniających właściwości. Nadaje się do różnych zastosowań, od typowych zatyczek do butelek po wyrafinowane osłony termoizolacyjne silników i zbiorników raketowych. Celem modułu było pokazanie w technicznie wiarygodny sposób, w jaki sposób różne właściwości materiału korkowego tworzą i napędzają sektor produkcji korka. W tym rozdziale przedstawiono wiedzę na temat charakterystycznej kombinacji właściwości korka, która doprowadziła do określonych zastosowań materiału korkowego. Rozpoczynając od charakterystyki materiału korkowego na tle innych materiałów i podkreślając jego zalety/wady, czytelnik powinien posiadać wiedzę na temat prawidłowego zastosowania materiału korkowego zgodnie z wymaganiami świata rzeczywistego, a w szczególności studium przypadku – oryginalny front z korka system ochrony SUV-a. Zdolność pochłaniania energii przez rdzeń z korka może zmniejszyć obrażenia odniesione przez pieszego podczas wypadku. W tym module przybliżyliśmy czytelnikowi zestaw właściwości, które sprawiają, że korek jest wyjątkowym i wyjątkowym materiałem. Następnie ścieżka została przekształcona w wyjaśnienie na przykładach, dlaczego korek jest właściwym wyborem w procesie doboru materiału do prezentowanego zastosowania.

Korek to niezwykle naturalny surowiec o unikalnym połączeniu synergistycznie wzmacniających właściwości. Nadaje się do różnych zastosowań, od typowych zatyczek do butelek po wyrafinowane osłony termoizolacyjne silników i zbiorników raketowych. Wiedza z zakresu nowoczesnej inżynierii materiałowej umożliwia ciągle poszerzanie obszaru zastosowań korka i jego kompozytów, a także kontynuowane są badania nad innowacyjnymi zastosowaniami korka. Korek jest cennym darem natury, który musi być traktowany z szacunkiem i używany jak najszerszej, w sposób zrównoważony i ekologiczny.



## Bibliografia

- [1] Urbaniak, M., Gołuch-Goreczna, R., Bledzki, A.K., Gajdzinski, S.. Natural cork. Part I. Cork oak tree culture, macro-and micromorphology of cork. *Polimery*, 62(05):388-393.
- [2] Pereira, H. (2007). *Cork: Biology, Production and Uses*.
- [3] Urbaniak, M., Goluch-Goreczna, R., Bledzki, A.K., Gajdzinski, S. (2017). Natural cork. Part II. Properties and applications. *Polimery*, 62(06):472-480.
- [4] Silva, S.P., Sabino, M.A., Fernandes, E.M., Correló, V.M., Boesel, L.F., Reis, R.L. (2005). Cork: properties, capabilities and applications. *International Materials Reviews*, 50(6):345–365.
- [5] Sanchez-Saez, S., García-Castillo, S.K., Barbero, E., Cirne, J. (2015). Dynamic crushing behaviour of agglomerated cork. *Materials & Design (1980-2015)*, 65:743–748.
- [6] Mano, J.F. (2002). The viscoelastic properties of cork. *Journal of Materials Science*, 37(2):257–263.
- [7] Vaz, M. F., Fortes, M. A. (1998). Friction properties of cork. *Journal of Materials Science*, 33: 2087- 2093.
- [8] Gil, L. (2015). New Cork-Based Materials and Applications. *Materials*, 8(2):625–637.
- [9] Biggs, A.R. (1988). Association of Suberin Formation in Uninoculated Wounds with Susceptibility to *Leucostoma cincta* and *L. personii* in Various Peach Cultivars. *Phytopathology*, 78(8):1070-1074.
- [10] Kolattukudy, P.E. (1984). Biochemistry and function of cutin and suberin. *Canadian Journal of Botany*, 62(12):2918–2933.
- [11] Thomas, R., Fang, X., Ranathunge, K., Anderson, T.R., Peterson, C.A., Bernards, M.A. (2007). Soybean Root Suberin: Anatomical Distribution, Chemical Composition, and Relationship to Partial Resistance to *Phytophthora sojae*. *Plant Physiol*, 144(1):299–311.
- [12] Schreiber, L., Werner Breiner, H., Riederer, M., Düggelein, M., Guggenheim, R. (1994). The Casparian Strip of *Clivia miniata* Reg. Roots: Isolation, Fine Structure and Chemical Nature\*. *Botanica Acta*, 107(5):353–361.
- [13] Tendero, C., Tixier, C., Tristant, P., Desmaison, J., Leprince, P. (2006). Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochim Acta Part B At Spectrosc*, 61(1):2–30.
- [14] Abenojar, J., Torregrosa-Coque, R., Martínez, M.A., Martín-Martínez, J.M. (2009). Surface modifications of polycarbonate (PC) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) copolymer by treatment with atmospheric plasma. *Surf Coat Technol*, 203(16):2173–2180.

- [15] Encinas, N., Díaz-Benito, B., Abenojar, J., Martínez, M.A. (2010). Extreme durability of wettability changes on polyolefin surfaces by atmospheric pressure plasma torch. *Surf Coat Technol*, 205(2):396–402.
- [16] van Ooij et al., W.J. (2005). Corrosion protection properties of organofunctional silanes — An overview. *Tsinghua Sci Technol*, 10(6):639–664.
- [17] Rosa M.E., Pereira, H. (1994). The Effect of Long Term Treatment at 100°C–150°C on Structure, Chemical Composition and Compression Behaviour of Cork. *hfsg*, 48(3):226–232.
- [18] Gibson, L.J., Easterling, K.E., Ashby, M.F.A. (1981). STRUCTURE AND MECHANICS OF CORK. *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci*, 377(1769).
- [19] Fortes, M.A., Teresa Nogueira, M. (1989). The poison effect in cork. *Materials Science and Engineering: A*, 122(2):227–232.
- [20] Gil, L. (2014). Cork: a strategic material. *Front Chem*, 2.
- [21] Fiskars Garden Shears. Available: <http://lumberjac.com/2012/10/fiskars-quantum-garden-shears/>
- [22] Vitra Cork Stool (2014) . Available: <https://www.vitra.com/en-us/about-vitra/sustainability/materials/cork>
- [23] Cork Chop Grips. Available: <https://ridepdw.com/collections/grips-and-bells/products/cork-chop-grips?variant=24672749313>
- [24] Icork case. Available: [http://www.pomm.pt/\\_icorkcase#](http://www.pomm.pt/_icorkcase#)
- [25] Sargianis, J., Kim, H., Suhr, J. (2012). Natural Cork Agglomerate Employed as an Environmentally Friendly Solution for Quiet Sandwich Composites. *Sci Rep*, 2(1):403
- [26] Pereira, H., Ferreira, E. (1989). Scanning electron microscopy observations of insulation cork agglomerates. *Materials Science and Engineering: A*, 111:217–225.
- [27] Baptista A.P.M., do Carmo Vaz, M. (1993). Comparative wear testing of flooring materials. *Wear*, 162–164:990–995.
- [28] Pereira, H. (1992). The thermochemical degradation of cork. *Wood Sci Technol*, 26(4):259-269.
- [29] Rosa M.E., Fortes, M.A. (1988). Temperature-induced alterations of the structure and mechanical properties of cork. *Materials Science and Engineering*, 100:69–78.
- [30] Kłusak M., Grygny, S. (2017). The Application of Composite With Cork Core For Cabs and Superstructures of Firefighting Vehicles. *Modelowanie Inżynierskie*, G3:9.
- [31] ECE-R 118 Regulations.
- [32] PN-EN ISO 2818-Tworzywa sztuczne Przygotowanie próbek do badań metodą obróbki mechanicznej.

- [33] PN-EN ISO 20753-Tworzywa sztuczne Kształtki do badań.
- [34] PN-EN ISO 527-4-Tworzywa sztuczne Oznaczenie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu Warunki badań kompozytów tworzywowych izotropowych i ortotropowych wzmocnionych włóknami.
- [35] PN-EN ISO 14125- Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem oznaczanie właściwości przy zginaniu.
- [36] Farag, M.M. (2008). Quantitative methods of materials substitution: Application to automotive components. *Mater Des*, 29(2):374–380.
- [37] Zenkert, D. (1997). *The Handbook of Sandwich Construction*. Sheffield: EMAS Publishing.
- [38] Castro, O., Silva, J.M., Devezas, T., Silva, A., Gil, L. (2010). Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. *Mater Des*, 31(1):425–432.
- [39] Santos Silva, J., Dias Rodrigues, J., Moreira, R.A.S., Application of Cork Compounds in Sandwich Structures for Vibration Damping. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 12(4):495–515.
- [40] Ptak, M., Rusiński, E., Karliński, J. (2012). Frontal Protection System for pedestrian safety. Patent 399762 PL, Wrocław, Poland.
- [41] Ptak, M., Fernandes, F.A.O., Dymek, M., Welter, C., Brodziński, K., Chybowski, L. (2022). Analysis of electric scooter user kinematics after a crash against SUV. *PLoS One*, 17(1):e0262682.
- [42] Wilhelm J., Ptak, M. (2018). Influences of SUV front-ends on accidents with two-person bicycles. *Interdyscyplinarność badań naukowych [Dokument elektroniczny]: praca zbiorowa / pod red. Jarosława Szreka*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1:128–133. Available: [http://ko-oper.pwr.wroc.pl/files/Interdyscyplinarnosc\\_badan\\_naukowych\\_2018\\_JS.pdf](http://ko-oper.pwr.wroc.pl/files/Interdyscyplinarnosc_badan_naukowych_2018_JS.pdf)
- [43] Ptak, M., Rusiński, E., Karliński, J., Dragan, S. (2012). Evaluation of kinematics of SUV to pedestrian impact—Lower leg impactor and dummy approach. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 12(1):68–73.
- [44] James, D.W., Belblidia, F., Eckermann, J.E., Sienz, J. (2017). An innovative photogrammetry color segmentation based technique as an alternative approach to 3D scanning for reverse engineering design. *Comput Aided Des Appl*, 14(1):1–16.
- [45] Gürgen, S., Fernandes, F.A.O., de Sousa, R.J.A., Kuşhan, M.C. (2021). Development of Eco-friendly Shock-absorbing Cork Composites Enhanced by a Non-Newtonian Fluid. *Applied Composite Materials*. 1–15.

- [46] Ptak, M., Blicharski, P., Rusiński, E., Karliński, J. (2017). Numerical Simulations of Composite Frontal Protection System According to EC 78/2009. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Part F10:423–429
- [47] Iluk, A., Rusiński, E., Ptak, M. (2012). Wstępna analiza przebiecia ceramiczno-kompozytowych osłon balistycznych. *Systems: journal of transdisciplinary systems science*, 16(1):219–226, 2012, Available: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPW8-0024-0033>
- [48] Liu, Q., Ma, J., He, Z., Hu, Z., Hui, D. (2017). Energy absorption of bio-inspired multi-cell CFRP and aluminum square tubes. *Compos B Eng*, 121:134–144
- [49] European Parliament and Council, Regulation (EC) no 78/2009 (2009) of The European Parliament and of the Council.
- [50] Stevenson, T. (2006). Simulation of Vehicle-Pedestrian Interaction. Doctoral thesis, University of Canterbury.
- [51] Fricke, L.B. (1990). Traffic Accident Reconstruction. *Traffic Accident Investigation*, (2).
- [52] Ptak M., Karliński, J. (2012). Pedestrian passive safety during the SUV impact: regulations vs. reality. IRCOBI Conference Dublin, Ireland. 103–113.
- [53] Ptak, M. (2019). Pedestrian safety: a new method to assess pedestrian kinematics. *Transport*, 34(1):41–51.
- [54] Chybowski, L., Przetakiewicz, W. (2020). Estimation of the Probability of Head Injury at a Given Abbreviated Injury Scale Level by Means of a Function of Head Injury Criterion. *System Safety: Human- Technical Facility - Environment*, 2(1):91–99.
- [55] Jamroziak et al., K. (2019). Ballistic Head Protection in the Light of Injury Criteria in the Case of the Wz.93 Combat Helmet. *Applied Sciences*, 9(13):2702.
- [56] Ptak, M. (2019). Method to Assess and Enhance Vulnerable Road User Safety during Impact Loading. *Applied Sciences*, 9(5):1000.
- [57] Blanco, D.H., Cernicchi, A., Galvanetto, U. (2014). Design of an innovative optimized motorcycle helmet. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part P Journal of Sports Engineering and Technology*, 228(2):95-110.
- [58] Caserta, G.D., Iannucci, L., Galvanetto, U. (2011). Shock absorption performance of a motorbike helmet with honeycomb reinforced liner. *Compos Struct*, 93(11).
- [59] Coelho, R.M., Alves de Sousa, R.J., Fernandes, F.A.O., Teixeira-Dias, F. (2013). New composite liners for energy absorption purposes. *Mater Des*, 43:384–392.

- [60] Fernandes, F.A.O., Jardim, R.T., Pereira, A.B., Alves de Sousa, R.J. (2015). Comparing the mechanical performance of synthetic and natural cellular materials. *Mater Des*, 82:335-341.
- [61] Fernandes, F.A.O., Tavares, J.P., Alves de Sousa, R.J., Pereira, A.B., Esteves, J.L. (2017). Manufacturing and testing composites based on natural materials. *Procedia Manufacturing*, 13:227-234.
- [62] Ptak, M., Kaczynski, P., Fernandes, F.A.O., de Sousa, R.J.A. (2017). Assessing impact velocity and temperature effects on crashworthiness properties of cork material. *International Journal of Impact Engineering*, 106.
- [63] Ptak et al., M. (2019). Graphene-enriched agglomerated cork material and its behaviour under quasi-static and dynamic loading. *Materials*, 12(1).
- [64] Santos, P.T., Pinto, S., Marques, P.A.A.P., Pereira, A.B., Alves de Sousa, R.J. (2017). Agglomerated cork: A way to tailor its mechanical properties. *Compos Struct*, 178.
- [65] Shuaeib, F.M., Hamouda, A.M.S., Wong, S.V., Umar, R.S.R., Ahmed, M.M.H.M. (2007). A new motorcycle helmet liner material: The finite element simulation and design of experiment optimization. *Mater Des*, 28(1):182–195.
- [66] Gibson, L.J., Ashby, M.F. (1989). *Cellular Solids: Structure & Properties*. *Advances in Polymer Technology*, 9(2).
- [67] Fernandes, F.A.O., de Sousa, R.J.A., Ptak, M., Migueis, G. (2019). Helmet design based on the optimization of biocomposite energy-absorbing liners under multi-impact loading. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(4).
- [68] ECE Regulations 22.05 (2002). Uniform Provision Concerning the Approval of Protective Helmets and Their Visors for Driver and Passengers of Motor Cycles and Mopeds. United Nations. Available: [www.unece.org](http://www.unece.org)
- [69] Cork motorcycle helmet (2015). Available: <http://lumberjac.com/2015/02/nexx-x60-cork-motorcycle-helmet/>

## ROZDZIAŁ 4

### Wytwarzanie i wdrażanie kompozytów na bazie korka w lotnictwie

*Bronius Merkys*<sup>1</sup>, *Justas Nugaras*<sup>2</sup>, \*, *Mykola Karpenko*<sup>3</sup>, *Andrius Dubovas*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instytut Lotniczy im. Antanasa Gustaitisa, Wileński Uniwersytet Techniczny Giedymina, Wilno, Litwa

<sup>2</sup> Wydział Przemysłów Kreatywnych, Wileński Uniwersytet Techniczny Giedymina, Wilno, Litwa

<sup>3</sup> Wydział Inżynierii Transportu, Wileński Uniwersytet Techniczny Giedymina, Wilno, Litwa

\*Korespondencja: justas.nugaras@vilniustech.lt

#### Abstrakt

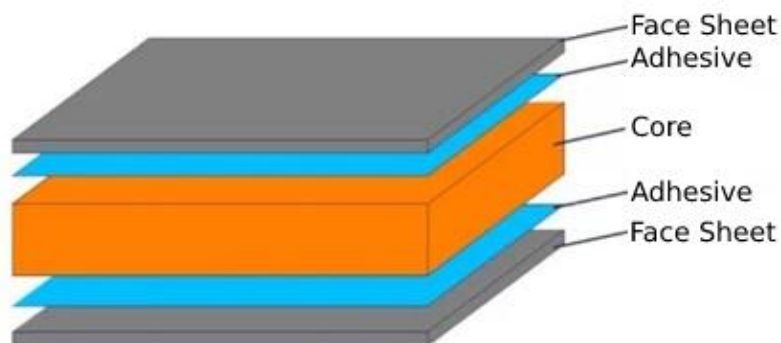
Zbadanie najbardziej znaczących pozytywnych i negatywnych właściwości kompozytów na bazie korka jest niezbędne do określenia wykorzystania naturalnych kompozytów korkowych w lotnictwie i racjonalnego ich zastosowania w elementach konstrukcyjnych. Badania te zapewniają szersze podejście do procesów produkcji materiałów korkowych i obszarów zastosowań kompozytów warstwowych na bazie korka w lotnictwie. W tym rozdziale przedstawiono zastosowania kompozytu korkowego do uszczelek i innych materiałów uszczelniających. Aby lepiej zrozumieć właściwości materiału, przeprowadzono dwa główne podejścia testowe: wibracje i zginanie. Wyniki przeprowadzonych badań wibracyjnych wskazują na możliwość zastąpienia pianki polimetakryloimidowej odnawialnym materiałem na bazie korka w laminowanych konstrukcjach kompozytowych. Badanie przeprowadzono z wykorzystaniem analizy modalnej, porównując w ten sposób właściwości tłumienia drgań materiału. Jak widać z uzyskanych wyników próby zginania, materiałem o największej wytrzymałości był skład największego granulatu na bazie korka. Wytrzymałość była trzykrotnie większa niż materiału kompozytowego z wypełniaczem z pianki polimetakryloimidowej. Integracja materiałów odnawialnych, takich jak korek, z kompozytami o strukturze warstwowej pozwala na wdrożenie i poszukiwanie wyższego poziomu zrównoważonego rozwoju w przemyśle lotniczym.

**Słowa kluczowe:** Korek, kompozyty o strukturze przekładkowej, materiały uszczelniające, badania wibracyjne i zginające.

## 4.1 Przegląd kompozytów o strukturze warstwowej na bazie korka

### 4.1.1 Definicja i rodzaje kompozytów o strukturze warstwowej

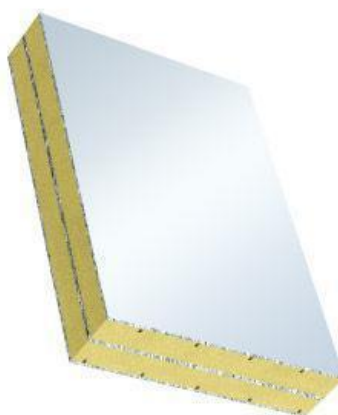
Kompozyty o strukturze warstwowej, wykonane z kilku warstw połączonych różnych materiałów, są szeroko stosowane w lotnictwie, gdzie wymagane są lekkie i sztywne konstrukcje [1]. Kompozyty o strukturze warstwowej, w których do rdzenia przymocowane są dwie warstwy wierzchnie, są najczęściej stosowane w lotnictwie [2] (rys. 4.1).



Rycina 4.1 Kompozyt o strukturze warstwowej [3].

Taka konstrukcja pozwala na zachowanie wysokiej sztywności przy zachowaniu niskiej masy.

Kompozyty o strukturze warstwowej mogą być wytwarzane z wielu warstw, posiadających dwie lub więcej warstw rdzeniowych, pomiędzy którymi rozmieszczone są arkusze wierzchnie [4]. Na przykład wielowarstwowe płyty warstwowe stosowane w budownictwie składają się z dwóch arkuszy wierzchnich (rysunek 4.2). Warstwy te są oddzielone podwójną warstwą rdzenia oddzieloną dodatkową warstwą.



Rysunek 4.2 Wielowarstwowy panel konstrukcyjny wykonany z trzech blach ocynowanych [5]. Dwie warstwy rdzenia są umieszczone pomiędzy warstwami blachy białej.

Takie wielowarstwowe struktury z rdzeniem na bazie korka i warstwami materiałów kompozytowych, drewna lub metalu mogłyby być stosowane jako panele dekoracyjne o ekologicznych i dobrych właściwościach dźwiękochłonnych. Choć struktura wielowarstwowa w pewnym stopniu różni się od struktury kanapkowej, to jej właściwości produkcyjne i wykonawcze są identyczne. Dlatego w razie potrzeby w artykule skupiono się tylko na kompozytach o strukturze warstwowej, zwracając uwagę na różnice technologiczne lub strukturalne struktur wielowarstwowych.

#### ***4.1.2 Właściwości, zalety i wady najbardziej znaczących kompozytów o strukturze warstwowej na bazie korka w aeronautyce***

Aby zdefiniować kompozyty na bazie naturalnego korka stosowane w lotnictwie i najbardziej racjonalnie wykorzystywane elementy konstrukcyjne, niezbędne jest zbadanie najważniejszych pozytywnych i negatywnych właściwości tych kompozytów.

Zalety kompozytów na bazie naturalnego korka:

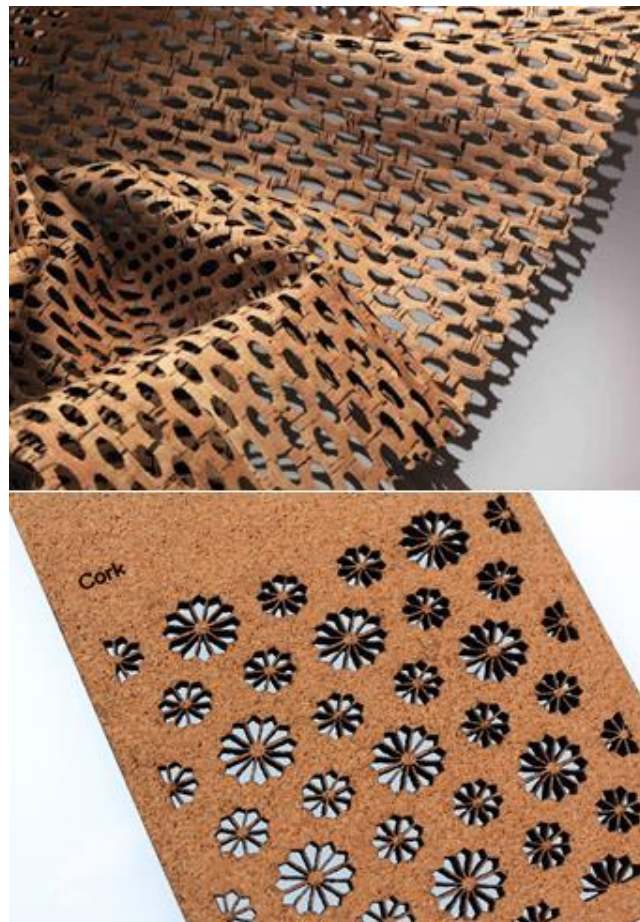
- A. Najbardziej przekonującą zaletą tego kompozytu jest to, że jest przyjazny dla środowiska i łatwo poddaje się recyklingowi [6]. Jest to bardzo ważna cecha, zwłaszcza w dzisiejszych czasach, kiedy coraz większą wagę przywiązuje się do materiałów maszynowych, które można by wykorzystać bez zanieczyszczania środowiska, a jeszcze lepiej, gdyby można je było poddać recyklingowi lub ponownie wykorzystać. Jest to przytłaczająca cecha istotna dla aeronautyki, ponieważ większość materiałów kompozytowych stosowanych obecnie w tej dziedzinie jest skomplikowana w utylizacji lub recyklingu w celu ponownego użycia.
- B. Dzięki odpowiedniej miękkości i sprężystości kompozyty o strukturze warstwowej na bazie korka mają dobre właściwości tłumienia hałasu i drgań [7].
- C. Niezależnie od organicznego charakteru materiałów o strukturze warstwowej na bazie korka, kolejną godną uwagi właściwością jest wysoki poziom ognioodporności [8]. Dzięki temu nadają się do wykańczania wnętrza kokpitów/kabin samolotów i szybowców.
- D. Kompozyty na bazie korka mają właściwości estetyczne – są przyjemne w dotyku. Ta właściwość jest brana pod uwagę przy stosowaniu jej jako wykończenia wnętrza [9]. Ponadto materiały te można było ozdabiać różnymi wzorami przenoszonymi na nie obrazy przy użyciu nowoczesnych technologii (np. grawerowanie laserowe).





Rycina 4.3 Laserowo zdobione panele na bazie korka [10].

Stosując technikę cięcia laserowego, panele kompozytowe na bazie korka można było wycinać wzorami. Takie wycięte elementy mogłyby być wykorzystane do dekoracji wnętrza kokpitu/kabiny samolotu (rys. 4.3 i 4.4).



Rysunek 4.4 Laserowe cięcie paneli kompozytowych na bazie korka [11], [12].

- E. Kompozyty te są odporne na wilgoć i nie wchłaniają wody.
- F. Kompozyty na bazie korka mają dobre właściwości termoizolacyjne [13].
- G. Kompozyty na bazie korka są dobrze obrabiane konwencjonalnymi metodami maszynowymi w ogólnym procesie produkcji maszyn (rysunek 4.5).



Rysunek 4.5 Frezowanie korka frezem palcowym [14].

Wady materiałów kompozytowych na bazie korka:

- A. Podobnie jak większość innych materiałów naturalnych, kompozyty na bazie korka mają wrażliwe właściwości mechaniczne. Zależą one od rodzaju dębu korkowego, warunków uprawy, klimatu, a nawet miejsca, w którym pobrano korę. Zewnętrzna część kory dębu korkowego jest krucha i zdrewniała oraz charakteryzuje się dużą gęstością. Gęstość kory zmniejsza się w miarę zbliżania się do pnia i nabiera elastyczności. Gęstość kory waha się zatem od  $60 \text{ kg/m}^3$  do  $250 \text{ kg/m}^3$  – odpowiednio zmienia się elastyczność i twardość kory [15].

Stanowi to ogromną przeszkodę w stosowaniu tych materiałów w konstrukcjach lotniczych, ponieważ stabilność wytrzymałości mechanicznej jest warunkiem koniecznym do zapewnienia wytrzymałości statycznej, wytrzymałości zmęczeniowej i stabilnych właściwości technologicznych. Tę przeszkodę można było pokonać, mieląc korę korkową na drobne granulki i mieszając je.

- B. Organiczny charakter materiałów kompozytowych na bazie korka decyduje o ich niskiej odporności na pleśń i inne uszkodzenia grzybowe [16]. Istnieje ryzyko, że mogą one stanowić pożywkę dla owadów do żerowania i rozmnażania.
- C. W lotnictwie stosuje się wiele rodzajów rozpuszczalników, środków czyszczących i innych chemikaliów. Ich wpływ na materiały kompozytowe na bazie korka nie został jeszcze wystarczająco zbadany.

#### **4.1.3 Obszary zastosowania kompozytów o strukturze warstwowej na bazie korka w aeronautyce**

Na podstawie zdefiniowanych zalet i wad materiałów kompozytowych na bazie naturalnego korka można oszacować, które elementy konstrukcyjne samolotów można by wyprodukować z kompozytów o strukturze warstwowej lub kanapkowej.

Małe aerodynamiczne i masywne obciążenia bezwładnościowe wpływają na ultralekkie i lekkie końcówki skrzydeł szybowców, owiewki i nadkola podwozia [17]. Te elementy konstrukcyjne nie mają decydującego wpływu na wytrzymałość lub charakterystykę zmęczenia cyklicznego tych statków powietrznych. Zwykle mają strukturę wielowarstwową lub kanapkową.



Rysunek 4.6 Część skrzydła szybowca z czterema typami wingletów [18].

Przy projektowaniu takich elementów konstrukcyjnych wystarczy przeanalizować, czy wypełnienia typu plaster miodu lub pianki można zastąpić materiałami na bazie korka. Prawdopodobnie zastosowanie tych materiałów nie wpłynie negatywnie na masę konstrukcji. Jednak znacznie zmniejszy zanieczyszczenie, gdy te elementy konstrukcyjne nie będą już nadawały się do użytku i zostaną przeznaczone do utylizacji. Na przykład łatwo usuwalne i wymienne końcówki skrzydeł szybowców (winglety) dość często uszkadzają szybowce podczas lądowania na zewnątrz. Ponadto na rynku dostępne są różne winglety przystosowane specjalnie do różnych warunków lotu [19]. W związku z tym szybowce używają kilku rodzajów wingletów (rysunek 4.6) lub są zmuszone do ich wymiany w przypadku naruszenia. Takie elementy są trudne do wykorzystania w sposób przyjazny dla środowiska. Częściowym rozwiązaniem tego problemu byłoby zastosowanie materiałów na bazie korka.



Rysunek 4.7. Motoszybowiec [20]. U góry widać otwartą komorę silnika kadłuba, natomiast w dolnej części kadłuba można było zaobserwować wnękę na koło podwozia. Te elementy konstrukcyjne można wytwarzać z kompozytów o strukturze warstwowej na bazie korka.

Wypełniacz na bazie korka jest dobrym materiałem do produkcji modeli samolotów lub małych UAV. Ulegają niewielkim obciążeniom, a dobre właściwości sprężyste mogą zapobiegać uszkodzeniom typowym dla tego typu statków powietrznych podczas lądowania.

Wystarczyłoby wykonać nadkole podwozia lub cofnięte drzwi przedziału silnikowego o strukturze warstwowej z dwuwarstwowych blach ze stopu aluminium, wypełniając szczelinę między nimi materiałem na bazie korka (rysunek 4.7). W ten sposób można było uzyskać lekką i mocną konstrukcję, a wszystkie komponenty (blachy aluminiowe i materiały na bazie korka) nadawałyby się do recyklingu.

Przegrody są zwykle instalowane wewnątrz kadłubów samolotów klasy biznes, oddzielając kabinę pasażerską od kokpitu i zapewniając separację izolowanych przestrzeni. Takie grodzie są powszechnie dekorowane drewnem (rysunek 4.8).

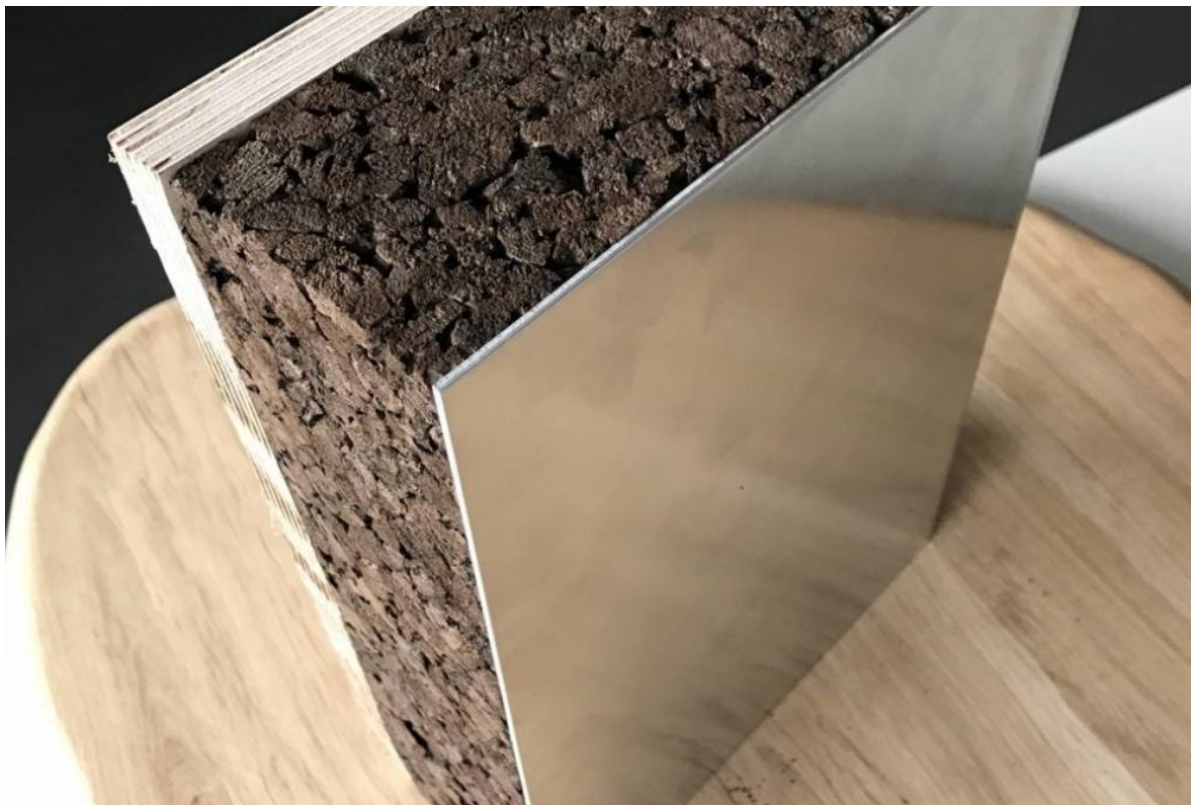


Rysunek 4.8 Kadłub samolotu klasy biznes [21]. Widoczna przegroda ozdobiona drewnem w tylnej części samolotu. Po prawej stronie między krzesłami zainstalowany jest składany stół.



Rycina 4.9. Płyta o strukturze warstwowej jest wypełniona materiałem korkowym, a warstwy drewna są przyklejone po obu stronach zewnętrznych [22].

Takie grodzie muszą być lekkie, ognioodporne, a także posiadać właściwości tłumiące hałas i termoizolacyjne. Przegrody te wystarczy wykonać z drewnianych płyt warstwowych, w których wypełnienie wewnętrzne jest wykonane z materiału na bazie korka (rysunek 4.9).

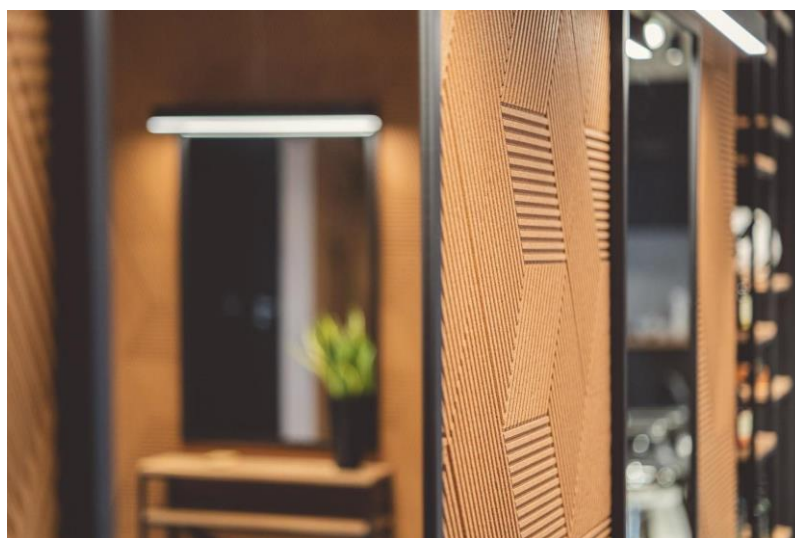


Rysunek 4.10 Panel o strukturze warstwowej [23]. Jedna strona pokryta sklejką, druga blachą. Wewnętrzny wypełniacz jest wykonany z granulowanego materiału korkowego.

Zewnętrzna część przegród może być pokryta metalowymi lub plastikowymi arkuszami. Warstwę drewna można było nakładać tylko z jednej strony. Dzięki temu przegroda jest szybko dostosowywana do wystroju wnętrza kabiny i specyficznych wymagań poszczególnych przedziałów samolotu. Na przykład, jeśli zaraz za kabiną pasażerską znajduje się przedział, jedna strona przegrody może być wykonana z drewna, a druga może być pokryta blachą lub specjalnym tworzywem sztucznym (Rysunek 4.10). Drewniana strona przegrody dodaje luksusu, natomiast metalowa strona od strony kambuza jest łatwa w utrzymaniu czystości i odporna na uszkodzenia mechaniczne.

Grodzie takie zapewniają dobrą izolację akustyczną i charakteryzują się niską masą. Takich arkuszy wystarczy do produkcji mebli lotniczych klasy biznes. (Na przykład powierzchnia stołu jest pokazana na rysunku 4.8). Dążąc do luksusowego wrażenia, są produkowane masowo. Zastosowanie płyt warstwowych na bazie korka umożliwia wykonanie mebli o masywnym wyglądzie i niewielkiej masie.

Powierzchnie przegród i mebli można pokryć specjalnie zdobionymi warstwami materiału na bazie korka. Ponieważ materiały na bazie korka są łatwe w obróbce różnymi metodami, możliwe jest uzyskanie powierzchni rozjaśniających wnętrze.



Rysunek 4.11 Powierzchnia drzwi szafy pokryta jest wzorzystym materiałem na bazie korka [24].

Rysunek 4.11 przedstawia drzwi szafy ozdobione warstwą materiału na bazie korka z geometrycznymi wzorami. Współczesne sposoby obróbki materiałów dają szerokie możliwości dekoracji powierzchni. Mogą być również stosowane we wnętrzach samolotów klasy biznes.

Dążąc do poprawy właściwości dźwiękochłonnych, wystarczy zastosować wielowarstwowe wypełniacze na bazie korka, których warstwy można wytwarzać z różnych gęstych materiałów na

bazie korka [25]. Takie arkusze skutecznie tłumią dźwięk w szerokim zakresie częstotliwości. Redukcję hałasu w kabinie samolotu klasy biznes można osiągnąć poprzez pokrycie dekoracyjnych powierzchni kabiny panelami z materiału na bazie korka. Mogłyby być wystarczająco cienkie i złożone z kilku różnych warstw materiałów na bazie korka o różnej gęstości. Wzrosłaby zatem masa paneli dekoracyjnych; jednakże hałas generowany przez powietrze przedostające się do samolotu i system wentylacji kabiny zostałyby zmniejszony.

Miękkie, przyjemne w dotyku i „ciepłe” materiały na bazie korka nadają się do produkcji dźwigni ręcznych pulpitu sterowniczego samolotu (rysunek 4.12).



Rysunek 4.12 Dźwignie ręczne wykonane z materiału na bazie korka

A - Dźwignia ręczna wykonana z korka granulowanego [26];

B - Dźwignia ręczna wykonana z korka ciągłego.

Takie dźwignie ręczne są od dawna stosowane w lekkich samolotach. Można je wytwarzać z prasowanych na gorąco granulek na bazie korka (rysunek 4.12A) lub poprzez mechaniczną obróbkę ciągłego materiału na bazie korka (rysunek 4.12B).

Łącząc materiały na bazie korka z warstwami gumy o różnej sprężystości, uzyskuje się skuteczne arkusze tłumiące drgania (rysunek 4.13). Arkusze mogą być zarówno produktami typu arkuszowego, jak i podwójnie giętymi. Skutecznie sprawdzają się przy mocowaniu foteli pilota i pasażerów na lekkich samolotach lub innych elementach konstrukcyjnych kabiny, zmniejszając tym samym przenoszone na nie drgania powodowane przez silniki i śmigła.





Rysunek 4.13 Arkusz antywibracyjny z rdzeniem korkowym pokrytym porowatą gumą [27].

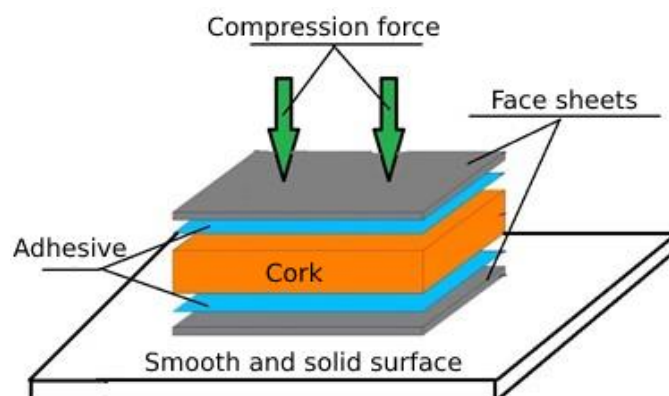
## **4.2 Metody wytwarzania kompozytów o strukturze typu sandwich na bazie korka**

Przeglądając metody wytwarzania kompozytów o strukturze warstwowej na bazie korka, warto zwrócić uwagę na właściwości geometryczne takich struktur. Istotne jest rozróżnienie płaskich płyt typu sandwich od elementów warstwowych o powierzchniach zakrzywionych pojedynczo lub podwójnie.

### ***4.2.1 Metody wytwarzania płaskich płyt warstwowych (sandwiczów)***

#### ***4.2.1.1 Wytwarzanie płaskich płyt typu sandwich poddawanych mechanicznemu ścisnaniu***

Podczas stosowania mechanicznego ścisnienia paneli o strukturze typu sandwich najlepszym rozwiązaniem są płaskie panele z arkuszami wierzchnimi składającymi się z gotowych arkuszy metalu, drewna, tworzyw sztucznych lub innych materiałów (rysunek 4.14). Również w tym celu z powodzeniem można zastosować płyty kompozytowe ze szkła, węgla lub polimeryzowanego tworzywa sztucznego wzmocnione innymi włóknami. Do procesu produkcyjnego potrzebna jest gładka i solidna powierzchnia o odpowiednich wymiarach oraz możliwość sprasowania płyty.



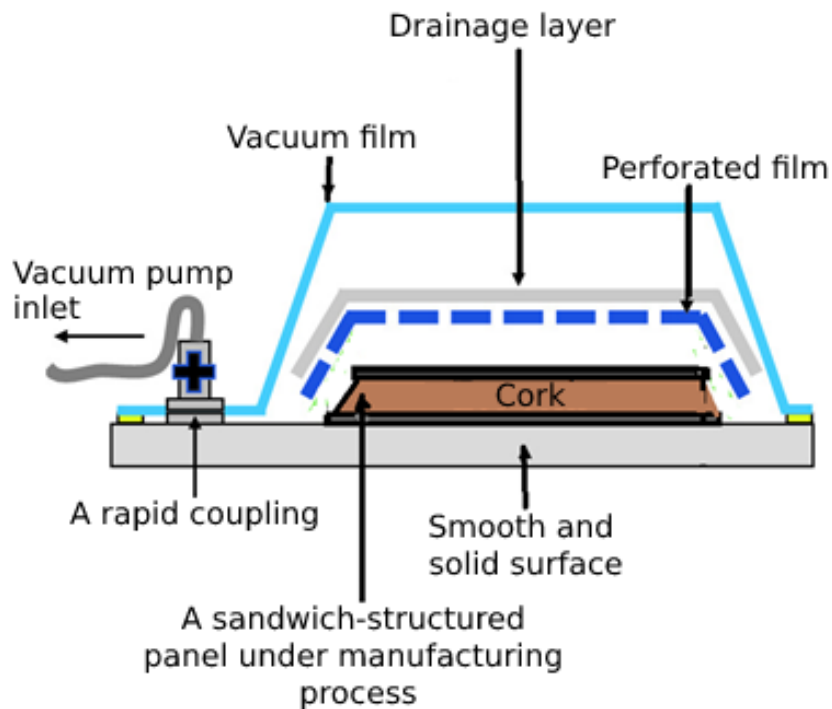
Rysunek 4.14 Schemat ideowy procesu produkcji płaskiego panelu o strukturze kanapkowej.

Na powierzchnię nakłada się arkusz wierzchni z powłoką klejącą. Następnie umieszczany jest rdzeń na bazie korka, nakładany jest klej, a konstrukcja pokrywana jest kolejnym arkuszem wierzchnim. Panel jest ściskany, a po stwardnieniu lub polimeryzacji kleju otrzymuje się płaski panel o strukturze kanapkowej, który należy przyciąć zgodnie z wymaganym konturem.

Do sprasowania płyty można użyć dowolnego sprzętu mechanicznego (prasa, kompresor specjalistyczny i inne). Małe panele można ścisnąć ciężkimi przedmiotami. W celu równomiernego rozłożenia siły ściskającej stosuje się worki wypełnione piaskiem lub dowolnym innym luźnym i stosunkowo ciężkim materiałem. Przyłożenie siły ściskającej od góry za pomocą innej gładkiej i solidnej płyty do przyłożenia siły jest wysoce zalecane w celu równomiernego dociśnięcia panelu. Bardzo wygodne jest stosowanie kleju do folii do produkcji takich paneli. Nie tylko upraszcza proces produkcyjny, ale także czyni go wygodniejszym i „czystszy”. Bardzo ważne jest, aby podczas nakładania płynnego kleju w powłoce klejowej nie tworzyły się pęcherzyki powietrza, ponieważ może to spowodować uszkodzenie wyglądu zewnętrznej płyty, a nawet spowodować częściowe odklejenie się warstw pod wpływem zmiany temperatury. Konieczne jest również upewnienie się, że nie występuje miejscowe *nadmierne ściskanie*, czemu najlepiej zapobiegać, przykładając siłę ściskającą do panelu za pomocą płytek do przyłożenia siły po obu stronach. Wypełniacz na bazie korka nie jest ani twardy, ani stały. Dlatego istotne jest kontrolowanie siły ściskania, zwłaszcza przy produkcji płyt o małych gabarytach.

#### **4.2.1.2 Wytwarzanie paneli o strukturze warstwowej pod wpływem kompresji próżniowej**

Wygodnie jest stosować próżnię do prasowania w procesie wytwarzania płyt warstwowych na bazie korka. Dzięki temu można uzyskać równomierny i niezbyt nadmierny ucisk, a także łatwiej uniknąć tworzenia się pęcherzyków powietrza w warstwach kleju. Proces wytwarzania takich paneli pokazano na rysunku 4.15.



Rysunek 4.15 Schemat ideowy procesu wytwarzania płaskich paneli o strukturze warstwowej z rdzeniem korkowym w procesie kompresji próżniowej.

Dlatego panele są produkowane w następujący sposób:

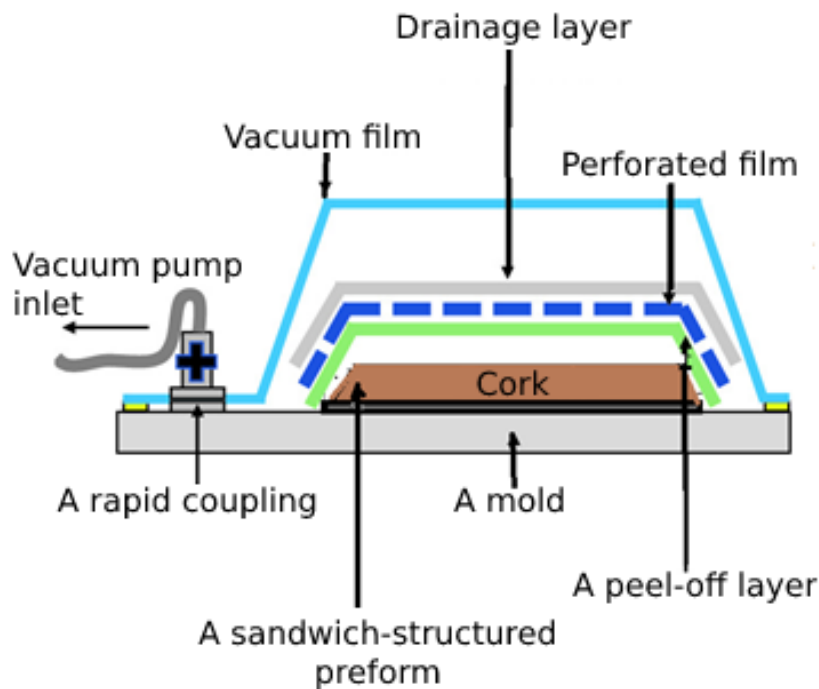
1. Arkusz wierzchni jest umieszczony na wystarczająco gładkiej, solidnej powierzchni o wystarczających wymiarach. Załóżmy, że w procesie wytwarzania panelu o strukturze warstwowej stosuje się płynny klej. W takim przypadku konieczne jest uprzednie pokrycie płyty warstwą antyadhezyjną (najczęściej pastami na bazie silikonu), aby uwolniony klej nie przyklejał się do procesu produkcyjnego płyta.
2. Arkusz wierzchni jest pokryty klejem i umieszczony jest rdzeń na bazie korka.
3. Górna warstwa wierzchnia pokryta jest klejem.
4. Na warstwie kleju umieszcza się kolejny arkusz wierzchni.
5. Całość pokryta jest specjalistyczną perforowaną folią. Folię perforowaną stosuje się tylko wtedy, gdy warstwy płyty są sklejone klejem. W przypadku zastosowania kleju do folii nie jest wymagane stosowanie folii perforowanej. Dzięki temu warstwa kleju folii nie jest gruba i po ściśnięciu nie wystaje poza krawędzie płyty.

6. Folia perforowana pokryta jest wyjątkowo grubym, przepuszczającym powietrze materiałem. Jest to warstwa drenażowa, która zapobiega powstawaniu wewnętrznych pęcherzyków powietrza pomiędzy folią próżniową a powierzchnią produkowanego panelu.
7. W odległości około 50÷150 mm od krawędzi panelu na płycie procesu wytwarzania, wokół całego wyprodukowanego elementu przykleja się specjalną taśmę klejącą, a wszystko pokrywa się folią próżniową. Folia próżniowa musi dobrze przylegać do taśmy klejącej, gdyż od tego zależy, czy po podłączeniu pompy próżniowej zostanie uzyskana wystarczająca próżnia.
8. Standardowe szczeliny są wykonane w folii próżniowej do szybkiego połączenia z wkładem pompy próżniowej i włożenia złącza.
9. Po weryfikacji worek jest podłączany do przewodu podciśnieniowego (pompy) za pomocą szybkozłącza.
10. Włączenie odkurzacza. Na tym etapie istotne jest powolne wytwarzanie podciśnienia pod folią odkurzającą poprzez kontrolowanie szczelności i formowania się fałd na obwodzie produkowanego panelu.
11. Próżnia jest utrzymywana do momentu wyschnięcia lub polimeryzacji kleju.
12. Gdy klej stwardnieje, próżnia jest wyłączana, a folia próżniowa i warstwa drenażowa są usuwane. Panel jest usuwany z płyty procesu produkcyjnego i docinany na wymagane wymiary.

W ten sposób wysokiej jakości panele korkowe o strukturze warstwowej są produkowane bez stosowania mechanicznej kompresji. Jednak do tego procesu wymagana jest pompa próżniowa i kilka materiałów pomocniczych.

#### ***4.2.2 Proces produkcji paneli pojedynczo lub podwójnie zakrzywionych***

Większość paneli o strukturze warstwowej stosowanych w lotnictwie jest wytwarzana z powierzchni zakrzywionych pojedynczo lub podwójnie [28]. Takie elementy są wytwarzane w nieco innej technologii niż panele płaskie. Technologia ta jest również wykorzystywana w procesie wytwarzania płaskich elementów o strukturze przekładkowej, gdy arkusze wierzchnie wykonane są z materiałów kompozytowych wzmocnianych włóknami, które powstają w procesie wytwarzania wyrobów o strukturze przekładkowej [29]. Do wytwarzania tych produktów niezbędna jest forma stosowana jako powierzchnia styku tworząca obszar roboczy. Zwykle takie panele są produkowane w dwóch etapach. Pierwszy etap pokazano na rysunku 4.16.



Rysunek 4.16 Schemat ideowy pierwszego etapu procesu wytwarzania panelu o strukturze warstwowej, gdy jest on formowany z materiałów kompozytowych.

Przeanalizujemy proces produkcyjny tego etapu:

1. Przed przystąpieniem do pierwszego etapu procesu produkcyjnego należy dokonać oględzin formy, zwracając szczególną uwagę na powierzchnie, na których będzie formowana blacha jakościowa. W razie potrzeby drobne rysy formy są polerowane. W przypadku poważnych uszkodzeń forma jest powlekana, a następnie polerowana.
2. Powierzchnię roboczą formy pokrywa się powłoką antyadhezyjną, a następnie poleruje. Czynności te wykonuje się zgodnie z instrukcją technologiczną producenta warstwy.
3. Jeśli produkt jest malowany, obszar roboczy formy jest pokryty specjalną warstwą dekoracyjną (Gelkaut).
4. Specjalna taśma klejąca jest nakładana na cały obwód modelu w celu uszczelnienia folii próżniowej.
5. Po wyschnięciu Gelkaut do stanu lekko kleistego układa się warstwy wierzchnie kompozytu, nasączając każdy z nich żywicą. Podczas układania warstw kompozytu należy bezwzględnie zachować kierunek zbrojenia określony w dokumentacji konstrukcyjno-technologicznej.

6. Podczas formowania warstw umieszcza się materiał rdzenia (materiał na bazie korka). Podczas umieszczania materiału rdzenia (czasami rdzeń składa się z kilku arkuszy, wtedy trzeba mówić o arkuszach), a następnie odkurzania, należy koniecznie kontrolować, czy arkusz tego materiału zajmuje właściwą pozycję w formie i nie porusza się podczas procesu odkurzania. Proces ten wymaga pewnych umiejętności i zrozumienia, w jaki sposób powierzchnia odkształca się po przyłożeniu podciśnienia i rozpoczęciu wchłaniania powietrza z zasysanej folii. Warto zauważyć, że przy wytwarzaniu powierzchni podwójnie zakrzywionych w formie promień zmiany powierzchni jest stosunkowo mały.

7. Na uformowaną powierzchnię nakładana jest specjalistyczna warstwa typu peel-off. Pomaga wchłonąć nadmiar żywicy i uprościć przygotowanie powierzchni do następnego etapu formowania.

8. Całość pokryta jest wyjątkową perforowaną folią.

9. Na folii perforowanej nakładana jest warstwa drenażowa. Zapobiega powstawaniu wewnętrznych pęcherzyków powietrza pomiędzy folią próżniową a powierzchnią produkowanego panelu. Pochłania nadmiar żywicy, który nieuchronnie występuje przy takiej technologii produkcji.

10. Uformowany panel jest pokryty folią próżniową. Folia próżniowa musi dobrze przylegać do taśmy samoprzylepnej, ponieważ od tego zależy, czy po podłączeniu pompy próżniowej zostanie osiągnięta wystarczająca próżnia.

11. W folii próżniowej wykonane są standardowe gniazda do szybkiego połączenia z wkładem pompy próżniowej i włożenia złącza.

12. Po sprawdzeniu worek jest podłączony do przewodu podciśnieniowego (pompy) za pomocą szybkozłącza.

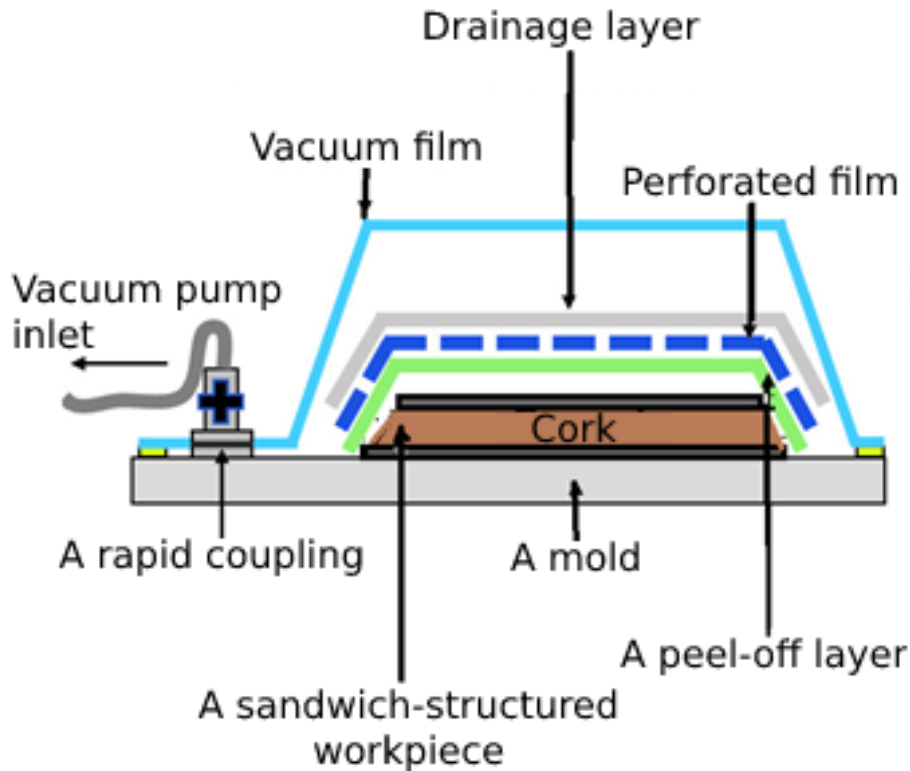
13. Odkurzacz jest włączony. Na tym etapie istotne jest powolne wytwarzanie podciśnienia pod folią odkurzającą poprzez kontrolowanie szczelności i formowania się fałd na obwodzie produkowanego panelu.

14. Próżnia jest utrzymywana aż do polimeryzacji kleju.

15. Po stwardnieniu kleju wyłącza się próżnię i usuwa folię próżniową, warstwę drenażową, folię perforowaną i warstwę odrywaną.

Po oględzinach i upewnieniu się, że wyrób spełnia wymagania, można było przystąpić do drugiego etapu produkcji.

Drugi etap procesu produkcyjnego polega na formowaniu kolejnej warstwy wierzchniej o strukturze warstwowej. Sekwencja działań tego etapu różni się nieco od tych podejmowanych w etapie pierwszym. Schemat ideowy drugiego etapu przedstawiono na rysunku 4.17. Poniżej szczegółowo przeanalizowano proces technologiczny drugiego etapu.



Rysunek 4.17. Schemat ideowy drugiego etapu procesu wytwarzania panelu o strukturze warstwowej, gdy jest on formowany z materiałów kompozytowych.

Przed wdrożeniem drugiego etapu procesu wytwarzania kompozytów o strukturze przekładkowej, ich powierzchnie, po usunięciu warstwy zdzieranej, są delikatnie szlifowane papierem ściernym o ziarnistości co najmniej 100. Podejmowane są następujące kroki:

1. Układamy warstwy pokrywające rdzeń kompozytu. Każda warstwa jest nasączona żywicą. W pierwszym etapie, podczas formowania warstw kompozytu, istotne jest zachowanie kierunku zbrojenia warstw określonego w dokumentacji konstrukcyjno-technologicznej.
2. Na uformowaną powierzchnię nakładana jest specjalistyczna warstwa typu peel-off. Warstwa zdzieralna pełni taką samą funkcję jak w pierwszym etapie.
3. Kolejne kroki są identyczne z krokami 8-12 wykonanymi w pierwszym etapie.
4. Wytworzona powierzchnia jest wyjmowana z formy. Jego jakość jest weryfikowana.
5. Powierzchnia jest cięta zgodnie z wymiarami podanymi na rysunku i po weryfikacji jest gotowa do dalszego użytkowania.

#### ***4.2.3 Specyfika miejsca montażu płyt o konstrukcji typu sandwich***

Panele o strukturze typu sandwich na bazie korka mają kilka cech konstrukcyjnych. Jednym z nich jest skomplikowana budowa punktów mocowania. Ta właściwość jest wspólna dla wszystkich materiałów o strukturze warstwowej z lekkim rdzeniem. Materiały rdzenia są bardzo lekkie i mają bardzo niskie naprężenia kontaktowe. Materiały wierzchnie arkuszy charakteryzują się zwykle dobrymi właściwościami mechanicznymi (a także stosunkowo dużymi naprężeniami kontaktowymi). Materiały te są jednak bardzo cienkie. Powszechnie jest mocowanie różnych zespołów do elementów o strukturze kanapkowej. Dlatego odbiór obciążeń miejscowych w tego typu konstrukcjach jest zwykle bardzo skomplikowany i wymaga unikalnych rozwiązań konstrukcyjnych.

Może być kilka opcji montażu. Każdy z nich wykorzystuje określoną metodę montażu.

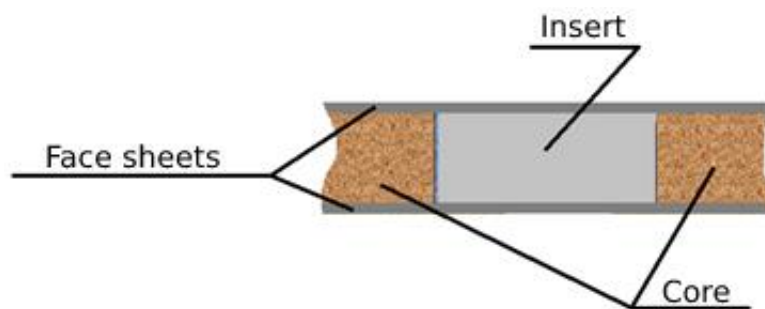
##### ***4.2.3.1 Wzmocnienie płyt o konstrukcji warstwowej w miejscach mocowania innych elementów konstrukcyjnych***

Jeżeli element konstrukcyjny jest narażony na większe obciążenie, należy go skleić z powierzchnią płyty warstwowej lub inną powierzchnią o strukturze warstwowej. W takim przypadku konieczna jest wymiana materiału rdzenia na cięższy materiał o lepszych właściwościach mechanicznych w miejscu mocowania. Szczelina konstrukcji warstwowej z taką wkładką jest pokazana na rysunku 4.18.

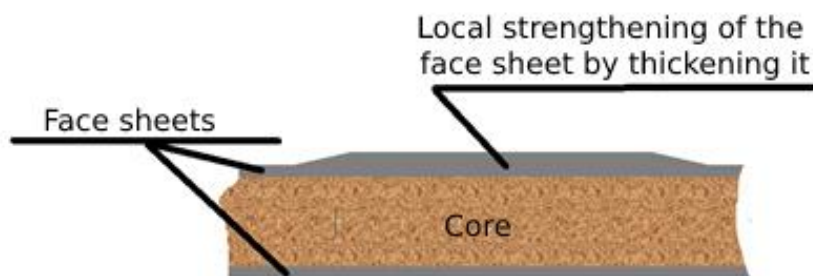
Taka struktura jest wytwarzana jako zwykła płaska lub pojedynczo lub podwójnie zakrzywiona powierzchnia. W lokalnych punktach mocowania materiał rdzenia jest usuwany i wstawiane są rdzenie o odpowiednich wymiarach. Wkładka wykonana jest z materiału o lepszych właściwościach mechanicznych. W celu uproszczenia procesu produkcyjnego wkładkę można uformować we wgłębienie o wymaganym kształcie wykonane w rdzeniu poprzez wypełnienie żywicą zmieszaną z wypełniaczem (rozdrobione włókno węglowe, inne specjalne wypełniacze żywiczne) poprawiające właściwości mechaniczne.

Gdy inny element konstrukcyjny poddany ekstremalnie małym obciążeniom jest łączony z panelem o strukturze warstwowej, może to wystarczyć zwiększyć grubość arkusza wierzchniego, do którego jest skleiony, nakładając lokalnie więcej warstw materiału wzmacniającego lub po prostu łącząc go z większą łąką wzmacniającą od zewnątrz. Schemat ideowy przedstawiający takie zbrojenie pokazano na rysunku 4.19.





Rysunek 4.18 Gniazdo wkładki w panelu o strukturze warstwowej z rdzeniem z korka ekologicznego.



Rysunek 4.19 Schemat szczelin lokalnego zbrojenia zewnętrznej płyty o strukturze warstwowej.

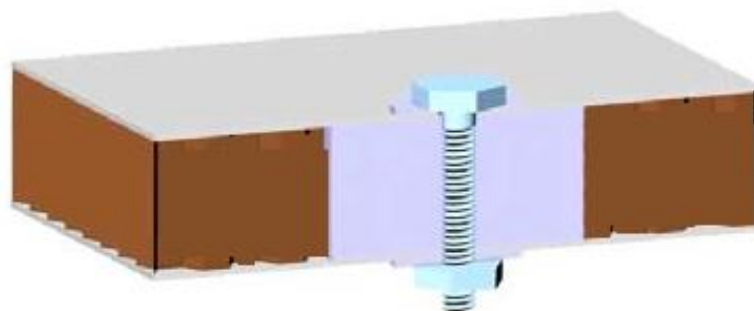
#### ***4.2.3.2 Wzmocnienie płyt o konstrukcji typu sandwich w punktach mocowania innych elementów konstrukcyjnych przy skręcaniu tych elementów***

Zwykle panele o strukturze warstwowej lub inne panele są mocowane do innych zespołów, które od czasu do czasu muszą być usuwane. Najlepszą opcją są połączenia śrubowe. Jednak w tym momencie można napotkać dwa wyzwania:

- A. W przypadku połączeń śrubowych stosunkowo łatwo jest przeciążyć materiał rdzenia podczas dokręcania nakrętki. Problem ten staje się widoczny, gdy materiał rdzenia jest na bazie korka. Taki rdzeń ma wysoki współczynnik sprężystości i jest łatwo odkształcalny. Dlatego podczas dokręcania śruby łatwo jest rozbić rdzeń, uszkadzając arkusze czołowe.
- B. Przy większych obciążeniach niezbrojony materiał rdzenia w punktach mocowania może zostać wyrwany przez śruby.

Rozwiązaniem tego problemu jest umieszczenie/zalanie wkładek w miejscach wkrętów, jak pokazano na rysunku 4.18. oraz przez wywiercenie otworów w tych zagłębieniach.

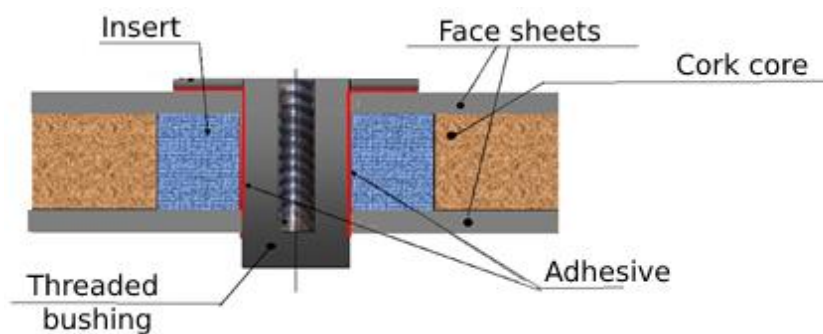
Schemat ideowy takiego zespołu pokazano na rysunku 4.20.



Rysunek 4.20. Otwór we wkładce płyty warstwowej do połączenia śrubowego [30].

Jednak taka decyzja wystarczy tylko czasami. Stosunkowo często zdarza się, że punkty mocowania są narażone na duże obciążenia. Połączenie śrubowe musi być łatwe do demontażu i ponownego montażu ze względu na wymagania eksploatacyjne i inne [31]. Czasami istnieją również wymagania zapewniające hermetyczność takiego połączenia. Jak przystało na zamknięte konstrukcje lotnicze, śruba musi być dokręcona z jednej strony bez użycia nakrętki.

W takich przypadkach do rdzenia wkleja się za pomocą kleju wkładkę o większej średnicy, a po wywierceniu otworu wkleja się za pomocą kleju specjalną tuleję. Schemat takiego połączenia pokazano na rysunku 4.21. Certyfikowane, produkowane na zamówienie tuleje lotnicze są stosowane głównie w lotnictwie (rysunek 4.22). W razie potrzeby przepusty mogą być zaprojektowane i wyprodukowane na zamówienie dla określonych punktów połączeń.



Rysunek 4.21 Gwintowana tuleja połączona klejem w strukturę typu „sandwich” [32].

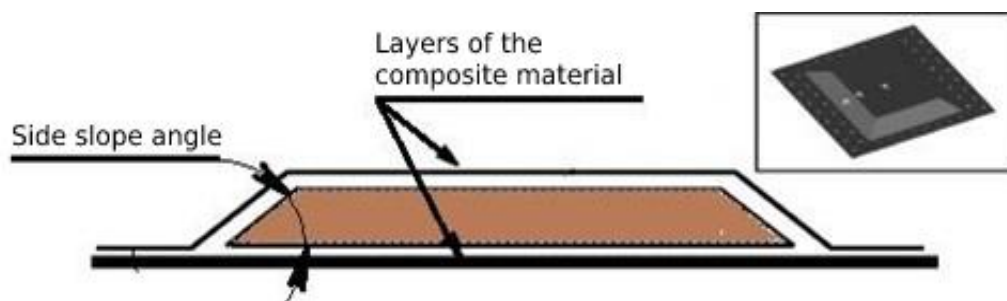


Rysunek 4.22 Przykłady standardowych przepustów paneli o strukturze warstwowej [33].

#### 4.2.4 Właściwości zamknięć krawędziowych płyt o strukturze typu sandwich

Krawędzie płyt typu sandwich lub paneli wielowarstwowych muszą być uszczelnione w wyjątkowy sposób. To musi być zrobić, aby zaizolować rdzeń na krawędziach. Ponadto krawędzie paneli są zwykle mocowane lub inne elementy konstrukcyjne. W tym przypadku nie można było jednak zastosować wyżej wymienionych metod montażu.

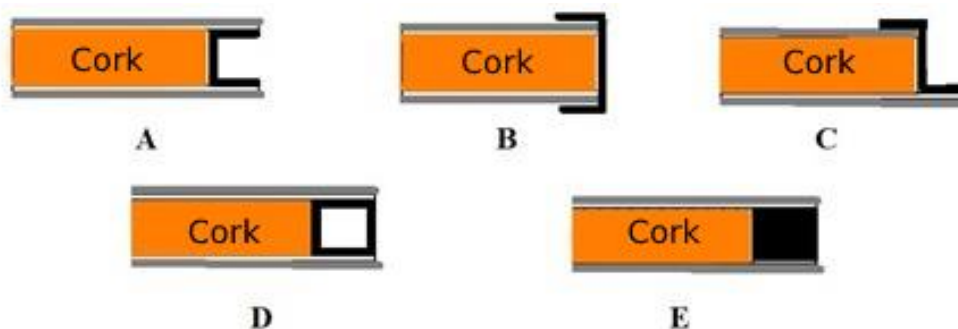
Kiedy elementy konstrukcyjne są produkowane do stosowania w konstrukcjach podlegających obciążeniom, połączenie zwykle wymaga krawędzi, w której stykają się arkusze wierzchnie, a między nimi nie ma materiału rdzenia. Przejście musi być płynnie, bez nagłych zmian sztywności. W związku z tym tworzone są nachylenia boczne rdzenia. Kąt nachylenia bocznego powinien być jak najmniejszy. Zwykle jest to 30 stopni lub nawet mniej (rysunek 4.23).



Rysunek 4.23. Zamknięcia krawędzi panelu o strukturze warstwowej poprzez utworzenie bocznych spadków w rdzeniu [34].

Im mniejszy kąt nachylenia, tym płynniejsza zmiana sztywności na krawędziach panelu. Mniejszy kąt nachylenia jest pożądanym przy wytwarzaniu paneli przy użyciu wspomnianych powyżej metod próżniowych. W przypadku większego (blisko 90 stopni) kąta nachylenia podczas odkurzania płyty przy krawędzi rdzenia nieuchronnie tworzą się strefy, w których podciśnienie nie dociska płyty kompozytowej. W konsekwencji pojawiają się defekty estetyczne powierzchni, a wytrzymałość punktów obciążenia ulega znacznemu pogorszeniu.

Czasami panel o strukturze typu sandwich z rdzeniem korkowym musi być uszczelnione przez ostre cięcie. W takim przypadku rdzeń również mógłby pozostać nienaruszony. Dlatego panele są uszczelniane przez wytwarzanie różnych przegród do kabiny samolotu. W takich przypadkach stosuje się metody uszczelnienia rdzenia płyty różnymi profilami. Schemat ideowy tych metod przedstawiono na rysunku 4.24.



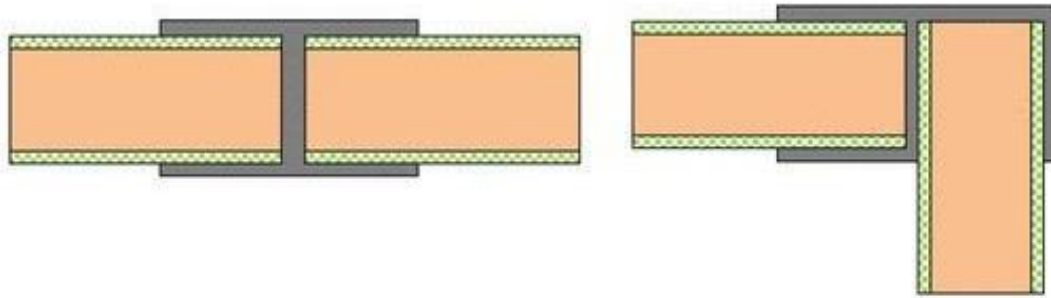
Rysunek 4.24 Metody uszczelniania płyt o strukturze warstwowej z rdzeniami korkowymi, gdy konieczne jest ich stromo przycięte. Profil w kształcie litery „U” wewnątrz arkuszy wierzchnich; B profil „U” na zewnątrz arkuszy wierzchnich; Profil formy C „Z”; D zamknięty profil pusty; E pełny kwadratowy lub prostokątny pręt.

We wszystkich tych przypadkach uszczelniania panelu o strukturze typu sandwich elementy uszczelniające (profile i pręty) są łączone za pomocą kleju z arkuszami wierzchnimi i rdzeniem. Połączenia śrubowe lub nitowane są mniej powszechne. Jeśli elementy uszczelniające muszą być niewidoczne z zewnątrz, stosuje się uszczelnienie z profilem w kształcie litery "U" wewnątrz blach czołowych (rysunek 4.24A) lub z zamkniętym profilem pustym lub pełnym (jak pokazano na rysunku 4.24D i rysunku 4.24E).

Czasami panel o strukturze kanapkowej musi być „obramowany” w określonych strefach na całym obwodzie. Często wykonuje się to ze względów estetycznych, rzadziej ze względu na cechy konstrukcyjne połączeń. W takich przypadkach najlepszym rozwiązaniem jest użycie tzw metody uszczelniania pokazane na Rysunku 4.24B i Rysunku 4.24C.

Przeanalizujemy proces wytwarzania uszczelnienia przedstawiony na rysunku 4.24A. Przede wszystkim materiał rdzenia jest usuwany mechanicznie ze strefy, w której profil uszczelniający ma być sklejeny klejem. Podczas wykonywania tego kroku należy zwrócić uwagę, aby nie uszkodzić lica płyty i nie pozostawić pozostałości rdzenia w usuniętych obszarach. Wewnętrzne powierzchnie arkuszy wierzchnich są szlifowane i powlekane klejem. Profil przeznaczony do klejenia jest czyszczony i przygotowywany do sklejenia zgodnie z technologią odpowiednią dla materiału profilu. Profil jest wkładany, nadmiar kleju usuwany, a po sprasowaniu produkt jest pozostawiać do stwardnienia kleju. Gdy tylko klej stwardnieje, kompresja zostaje złagodzona, a nadmiar kleju usunięty.

Podczas pracy nad wnętrzem kabiny samolotu często kluczowe znaczenie ma łączenie stromo przyciętych paneli o strukturze warstwowej. Do uszczelnienia krawędzi racjonalne jest stosowanie takich połączeń, które upraszczają bardziej złożone profile.



Rysunek 4.25 Połączenie płaskich paneli za pomocą profili uszczelniających ich krawędzie.

Rysunek 4.25 przedstawia sposób łączenia dwóch paneli płaskich z profilami oraz opcje uszczelnienia i łączenia elementów krawędzi paneli. Dzięki temu masa złącza jest zmniejszona, połączenie jest tańsze i uzyskuje się estetyczny wygląd.

### **4.3 Zastosowania kompozytów korkowych w uszczelkach i innych materiałach uszczelniających**

Uszczelki należą do najbardziej powszechnych i sprawdzonych zastosowań kompozytu korkowo-gumowego. Zastosowanie kompozytów korkowych ze względu na ich właściwości uszczelniające w lotnictwie jest szeroko rozpowszechnione i sprawdzone w praktyce. Uszczelki wykonane z kompozytu korkowo-gumowego mogą być stosowane z różnymi płynami i gazami w różnych systemach lotniczych [35].

#### **4.3.1 Najczęściej stosowane płyny w przemyśle lotniczym**

##### 1. Benzyna (AVGAS 100LL):

AVGAS 100LL jest standardowym paliwem stosowanym w większości silników tłokowych do samolotów śmigłowych i śmigłowców. *Avgas* to konwencjonalna benzyna stosowana w przemyśle motoryzacyjnym, tylko z dodatkiem tetraetyloołowiu (TEL), który podnosi liczbę oktanową benzyny do 100. Ponadto dodana liczba TEL jest obniżona w porównaniu do AVGAS 100, stąd nazwa – „Avgas 100LL (niski poziom ołowiu) [36].

##### 2. Nafta (paliwo lotnicze):

JET A-1 jest najczęściej używany rodzaj paliwa naftowego stosowanego głównie w silnikach odrzutowych samolotów i helikopterów [37]. Istnieją zasadnicze różnice przy porównywaniu nafty z benzyną lub olejem napędowym, głównie temperatura zapłonu, gęstość energii i skład chemiczny. Silniki odrzutowe mogą generalnie pracować na szerszej gamie paliw, co jest jednym z najbardziej podstawowych powodów, dla których stosuje się tańsze paliwo na bazie nafty.

### 3. Olej silnikowy:

W zależności od typu silnika i jego charakterystyki stosowane są różne oleje silnikowe. Najczęściej stosowanymi olejami do czterosuwowych silników tłokowych do samolotów śmigłowych są oleje mineralne opisane w SAE J-1966, takie jak Aeroshell 80 (dla temperatur od -17°C do 21°C) oraz oleje półsyntetyczne opisane w SAE J-1899, jak Aeroshell W15W50 i ich odpowiedniki.

Silniki odrzutowe zwykle używają rzadszych olejów ze względu na wyższe obroty silnika. Najczęściej stosowany standard - MIL-PRF-23699F, Eastman Turbo Oil 2380 jest jednym z przykładów.

### 4. Płyn hydrauliczny

Głównym celem tego rodzaju płynu jest przenoszenie energii (w postaci ciśnienia) z jednego miejsca do drugiego. Z tego powodu płyn zwykle nie jest zużywany w procesie eksploatacji. Jednak wymagania dotyczące właściwości płynu hydraulicznego są niewiarygodnie wysokie. Na przykład standardowe ciśnienie robocze dla układów hydraulicznych wynosi 3000 psi (206,8 bara) [38]. Inną istotną cechą jest szybkość przepływu, która w niektórych systemach lotniczych może osiągnąć nawet 3 litry na sekundę. Wymaga to, aby płyn hydrauliczny działał przy wysokim ciśnieniu i dużym natężeniu przepływu, pozostając płynnym, najlepiej utrzymując przepływ laminarny, nie parując i nie zmieniając swoich właściwości pod ogromnym obciążeniem, jak wskazano w normie SAE AS1241.

Wszystkie te właściwości uzyskuje się poprzez zmieszanie oleju mineralnego i różnych pierwiastków chemicznych, zwykle nieujawnianych ze względów handlowych. Jednak w standardowej organizacji obsługi technicznej i naprawy statków powietrznych płyn hydrauliczny jest uważany za najbardziej erozyjny i agresywny chemicznie płyn stosowany w lotnictwie (tabela 4.1).

Tabela 4.1 Standardowe ciśnienia płynów lotniczych i temperatury robocze.

Rodzaj płynu	Standardowa temperatura pracy	Standardowe ciśnienie robocze
Benzyna (AVGAS 100 LL)	-58°C do 60°C	≤ 1000 psi
Nafta (JET-A1)	-47°C do 80°C	≤ 1500 psi
Olej silnikowy (silnik tłokowy)	-17°C do 82°C	≤ 65 psi
Olej silnikowy (silnik odrzutowy)	-40°C do 350°C	≤ 45 psi
Płyn hydrauliczny	-40°C do 100°C	≤ 3000 psi

#### 4.3.2 *T Technologie uszczelniania płynów*

Ze względu na różne właściwości chemiczne i mechaniczne wymagane dla materiałów uszczelniających stosowanych w przemyśle lotniczym, opracowano sporo rozwiązań. Najczęstszym rozwiązaniem są uszczelki płytowe, uszczelki z materiałów pełnych, uszczelki kopertowe, uszczelki kammprofilowe i o-ringi (rysunek 4.26). Jednak technologie uszczelniania kompozytów korkowo-gumowych okazały się skuteczne jedynie w postaci uszczelki płytowej [39].



Rysunek 4.26 Uszczelki z blachy korkowo-gumowej [40].

Właściwości uszczelki korkowo-gumowej zależą od kilku czynników, takich jak wielkość ziarna korka, gęstość, skład chemiczny oraz stosunek gumy do korka (Tabela 4.2). Dostosowanie tych właściwości umożliwia stworzenie kompozytu o parametrach wymaganych do konkretnego zastosowania. Nieuzasadnione jest jednak oczekiwanie możliwości stworzenia „doskonałego” kompozytu, który sprawdziłby się we wszystkich środowiskach występujących w przemyśle lotniczym. Różne płyny, temperatury i ciśnienia będą miały różny wpływ na kompozyt; dlatego dla każdego systemu wymagana jest unikalna konstrukcja uszczelki korkowo-gumowej.

Tabela 4.2 Kompozyty korkowo-gumowe i ich właściwości [41].

Material	Opis	Gęstość (kg/m <sup>3</sup> )	Twardość (Brzeg-A)	Ścisłość% (400 psi)	Opór trakcji (MPa)	Odporność na temperaturę (°C)
TS2050 (D205)	Mieszanka korka/SBR. Odpowiedni do wszystkich olejów silnikowych i przekładniowych oraz płynów chłodzących.	830*	60-80	15-35	2*	-30°C do 90°C
TS4600 (GT46)	Mieszanka korka/SBR. Nadaje się do wszystkich olejów silnikowych i przekładniowych.	>640	70*	25-45	>1,03*	-30°C do 110°C
TS1521	Mieszanka korka/SBR. Nadaje się do większości płynów smarnych.	550-750	50-70	35-50	>0,8	-30°C do 110°C
TS1400	Mieszanka korka/NBR. Nadaje się do paliw, biopaliw, olejów i chłodziw.	1100*	75-90	10-22	>3,5	-30°C do 125°C
TS7100	Mieszanka korka/NBR. Nadaje się do paliw, biopaliw i olejów.	900*	60-75	20-45	2,5*	-30°C do 110°C



Kompozyty korkowo-gumowe mają wiele zalet, takich jak trwałość i wykorzystanie produktów ubocznych przemysłu korkowego, takich jak wióry i ścinki korka, do produkcji wysokiej jakości produktów lotniczych. Korek ma wyjątkową odporność na temperaturę, tłumienie drgań i właściwości uszczelniające. Jednak jako materiał korek mógłby lepiej działać w środowisku o wysokim ciśnieniu. Dlatego generalnie nie jest stosowany w układach hydraulicznych, w których ciśnienie robocze przekracza 3000 psi [42]. Najpopularniejsze materiały do uszczelniania układów hydraulicznych są nadal czysto syntetyczne, takie jak kauczuk etylenowo-propylenowo-dienowy utwardzany nadtlakiem (EPDM), fluorowęglowodór lub silikon [43].

#### ***4.3.3 Sprawdzone na przestrzeni czasu zastosowania korka w lotnictwie***

We wczesnej epoce w przemyśle lotniczym pierwsze samoloty miały przede wszystkim silniki tłokowe ze śmigłami, a standardowym materiałem na uszczelki silnika i układu paliwowego był korek (rysunek 4.27). Technologia innych materiałów syntetycznych nie była na tyle zaawansowana, aby je zastąpić. Z czasem korki w produkcji uszczelek zaczęły zastępować nowe materiały. Jednak w miarę jak przemysł epoki nowożytnej zmierzał w kierunku zrównoważonego rozwoju i przyjazności dla środowiska, inżynierowie lotniczy zwrócili się z powrotem do uszczelek korkowych. Tym razem wdraża zaawansowaną technologię wytwarzania kompozytów korkowych z różnymi materiałami, takimi jak guma czy silikon, w celu wytworzenia uszczelki o pożądanych właściwościach.



Rysunek 4.27 Uszczelka korkowa (po lewej) i uszczelka silikonowa (po prawej) [44], [45].

Jeszcze jednym powodem, dla którego przemysł lotniczy wykorzystuje tak dużo korka do różnych systemów, jest to, że zmiany i wdrażanie nowych technologii w lotnictwie są znacznie wolniejsze i bardziej konserwatywne w porównaniu z przemysłem motoryzacyjnym. Mimo że w pierwszych silnikach stosowanych w samochodach i samolotach jako uszczelki stosowano głównie korek, to wraz

z pojawieniem się nowych materiałów inżynierowie motoryzacyjni znacznie szybciej wprowadzali zmiany. Tymczasem branża lotnicza potrzebuje znacznie więcej czasu na odpowiednie przetestowanie i certyfikację nowych projektów technologicznych. Dlatego nie było pośpiechu, aby wymienić coś, co działało dobrze. Zanim syntetyczne materiały uszczelniające ewoluowały i zostały wystarczająco dokładnie przetestowane, branża przeszła na zrównoważone rozwiązania. Dlatego samoloty nadal używają tych sprawdzonych uszczelek do układów olejowych i paliwowych.

#### **4.4 Badania materiałów kompozytowych o strukturze typu sandwich z wypełniaczami korkowymi**

##### **4.4.1 Analiza widma materiałów kompozytowych o strukturze kanapkowej z wypełniaczami korkowymi**

**Cel analizy :** Znalezienie punktów rezonansowych i ocena/porównanie dynamicznych (tłumiących) właściwości różnych laminowanych materiałów korkowych (dodatkowe porównanie z laminowanym materiałem piankowym polimetakryloimidowym).

**Obiekty do analizy:** W bieżących analizach badano cztery różne obiekty (3 rodzaje korka i 1 rodzaj materiałów piankowych z polimetakryloimidu) (Rysunek 4.28):



Rysunek 4.28 Obiekty badań (1-3: laminowany materiał korkowy; 4: laminowane materiały piankowe polimetakryloimidowe). Wymiar obiektu 30x30x3 mm dla 1-3 obiektów i ~25x30x3mm dla obiektu 4.

**Rodzaj analizy:** Bieżąca analiza oparta jest na analizie modalnej. Analiza modalna bada właściwości dynamiczne obiektów w dziedzinie częstotliwości. Analiza modalna pomaga określić charakterystykę drgań (częstotliwości własne i kształty drgań) konstrukcji mechanicznej lub komponentu, pokazując ruch różnych części konstrukcji w dynamicznych warunkach obciążenia, takich jak siła boczna generowana przez siłowniki elektrostatyczne [43]. Częstotliwości drgań własnych i kształty drgań własnych są podstawowymi parametrami przy projektowaniu konstrukcji na obciążenia dynamiczne [46].

Analizę modalną przeprowadza się za pomocą analizy widma drgań FFT (Fast Fourier Transform). Głównym celem tych badań jest znalezienie rezonansu i porównanie właściwości tłumiących

badanego obiektu. Istnieje kilka kroków, które należy wykonać jako wytyczne, aby pomóc w pomyślnej bieżącej analizie. Poniżej znajduje się ogólna lista tych kroków:

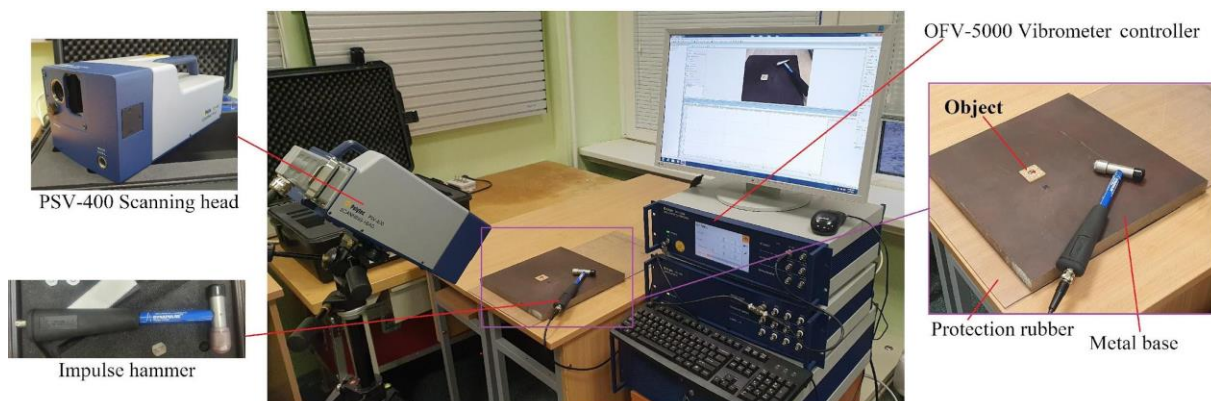
1. Zebranie danych z pomiaru: prędkości drgań obiektu pod wpływem impulsu (z wyłączeniem niskich drgań otoczenia). Przeprowadzenie dodatkowych testów, jeśli wymagane są dodatkowe dane.
2. Wykonanie analizy widma FFT dla każdego obiektu w celu porównania.
3. Analiza danych spektralnych – ocena ogólnych wartości i określenie częstotliwości odpowiadających materiałowi obiektu.
4. Raportowanie uzyskanych wyników i porównanie właściwości tłumiących obiektu.

#### 4.4.2 Stanowisko badawcze i warunki pomiarów

Niniejsze pomiary eksperymentalne przeprowadzono w celu wyznaczenia punktów rezonansowych badanych obiektów w celu porównania ich właściwości tłumiących. Pomiary zostały wykonane za pomocą projektu pomiaru z dwiema próbami i opartego na metodzie statystycznej dla jednej próby z szacowaniem niepewności w powtarzanych pomiarach przetwarzania danych.

Stanowisko badawcze do badań eksperymentalnych pokazano w Rysunek 4.29. Zawiera metalową podstawę z gumową ochroną przed wpływem środowiska o niskiej częstotliwości, obiekty badawcze oraz system skanowania laserowego do pomiaru drgań powierzchni obiektu pod wpływem sygnału uderzenia młota impulsowego Integrated Electronics Piezo-Electric (IEPE).

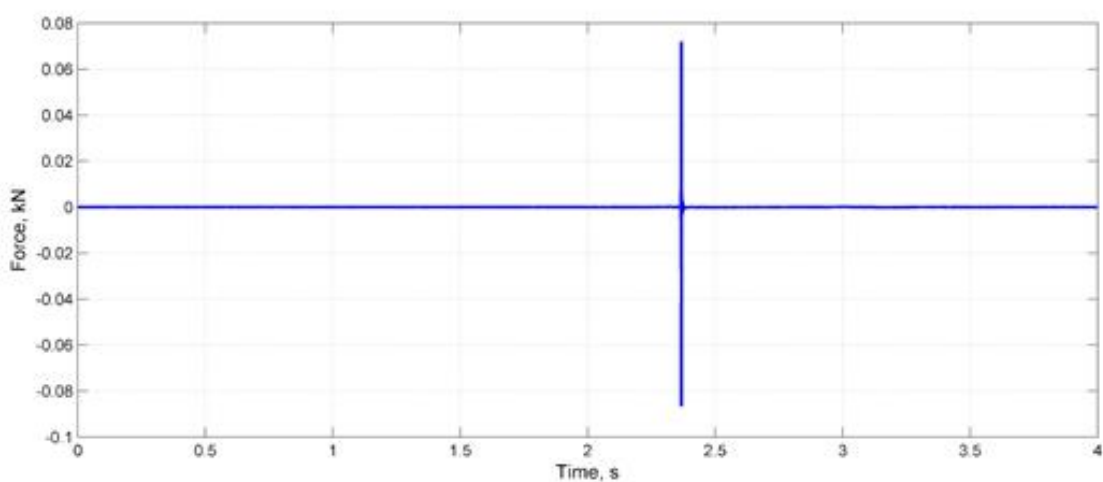
Badania pomiarowe obejmują pomiary drgań obiektów oraz deformacji powierzchni zewnętrznej (prędkości/przemieszczenia) przedmiotów w wyniku uderzenia młotkiem impulsowym. Czas jednego mierzony przez głowicę czujnika PSV wynosi dokładnie 4 sekundy. W tym czasie młot impulsowy IEPE generuje impuls na metalowej podstawie z siłą pokazaną na rysunku 4.30a, a prędkość jest mierzona przez głowicę czujnika PSV na metalowej podstawie, pokazanej na rysunku 4.30b, podczas testów.



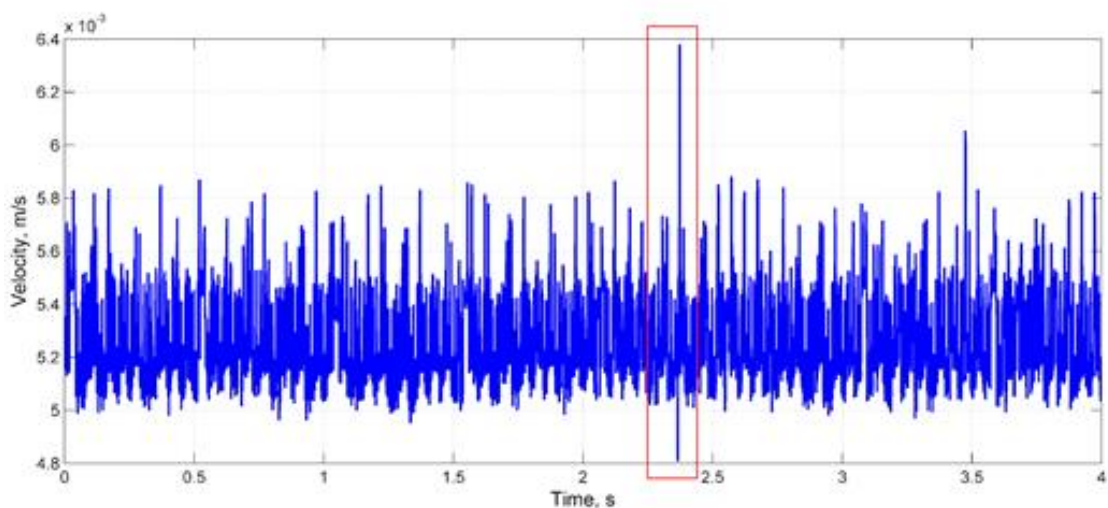
Rysunek 4.29 Stanowisko badawcze do pomiarów [47].

Za spadek podczas pomiarów przyjęto i przedstawiono średnie z kilku pomiarów. Głównym wynikiem uzyskanym z testów jest charakterystyka częstotliwościowa materiałów oparta na analizach widmowych z wykorzystaniem efektu Dopplera w celu lepszego ustalenia punktów rezonansowych i porównania właściwości tłumiących materiału.

Na ustalonych obiektach utworzono siatkę z 25 punktami, tworząc bliską powierzchnię do pomiaru (ryc. 4.31a). Punkty zostały zeskanowane laserem i podczas pomiaru cały czas stan skanowania był w optymalnych warunkach, co oznacza, że siatka punktów i skupienie lasera jest optymalne dla tego typu materiału odblaskowego. Dodatkowo dziedzina częstotliwości obejmuje szerokość pasma 1,6 kHz z rozdzielczością krokową 0,25 Hz (Rysunek 4.31b).

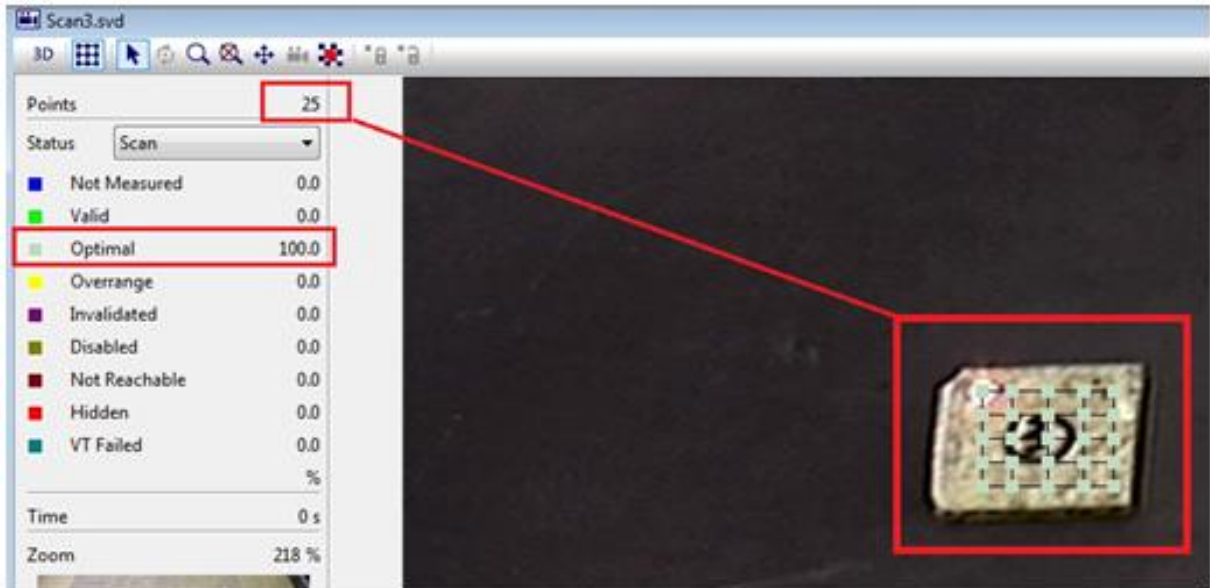


a)

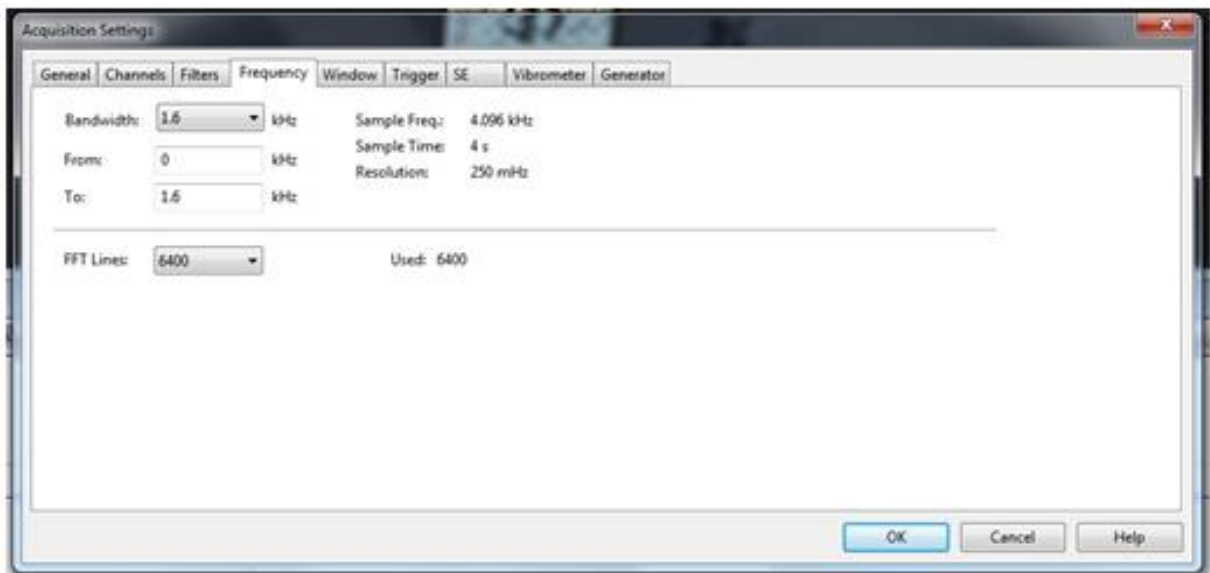


b)

Rysunek 4.30 Przykład pomiaru: a) sygnału z młotka impulsowego IEPE; b) pomiar prędkości z głowicy czujnika PSV.



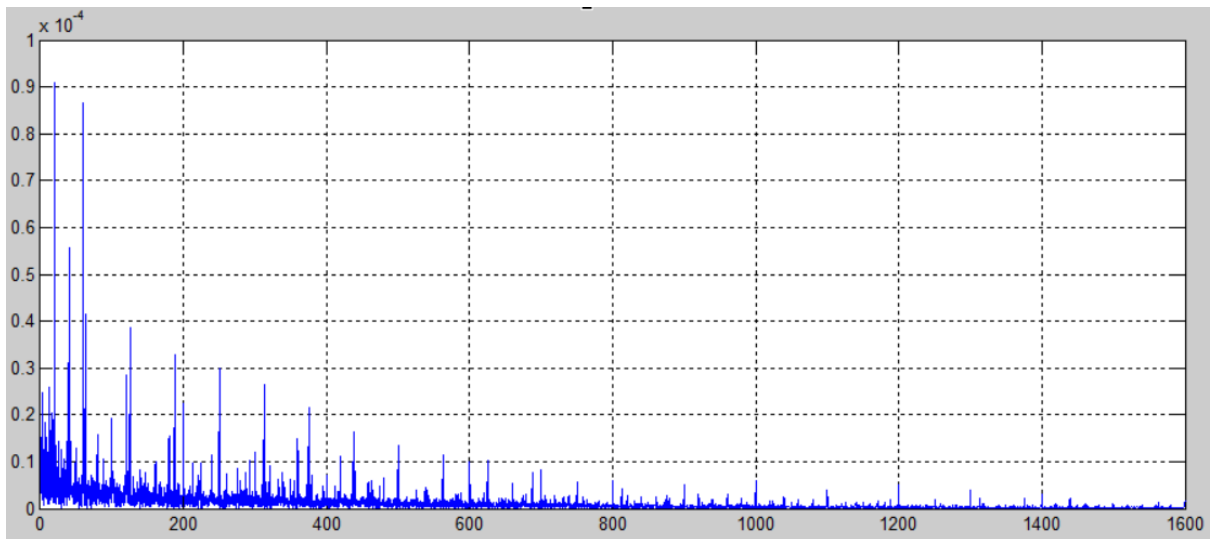
a)



b)

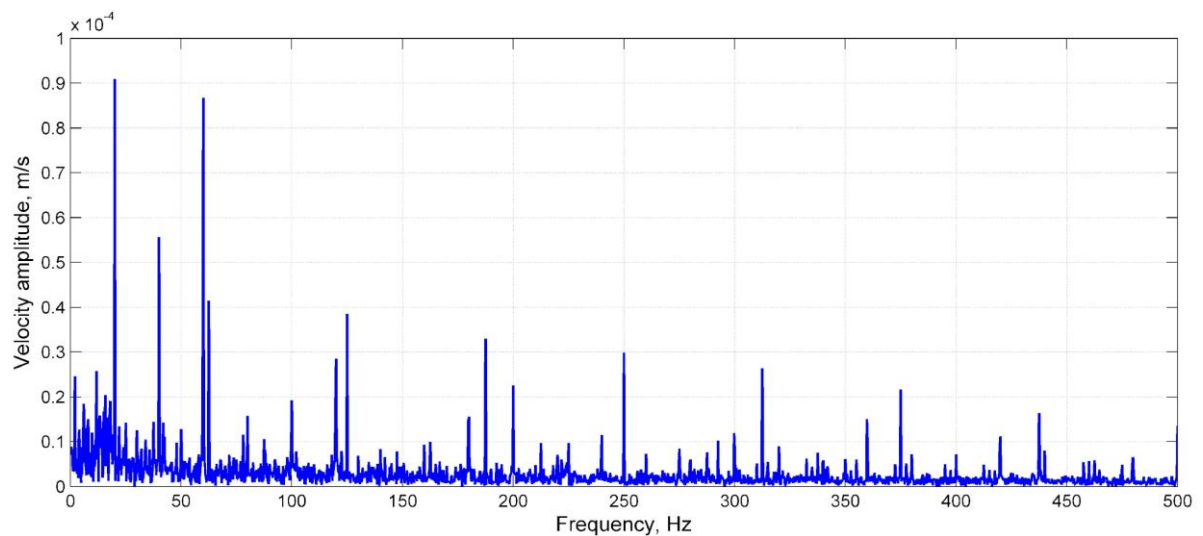
Rysunek 4.31 Konfiguracja pomiaru: a) punkt pomiaru; b) warunek częstotliwości.

Oznacza to, że uzyskane wyniki z analizy widma będą sięgać do 1600 Hz i będą wyświetlane co 0,25 Hz (Rysunek 4.32).



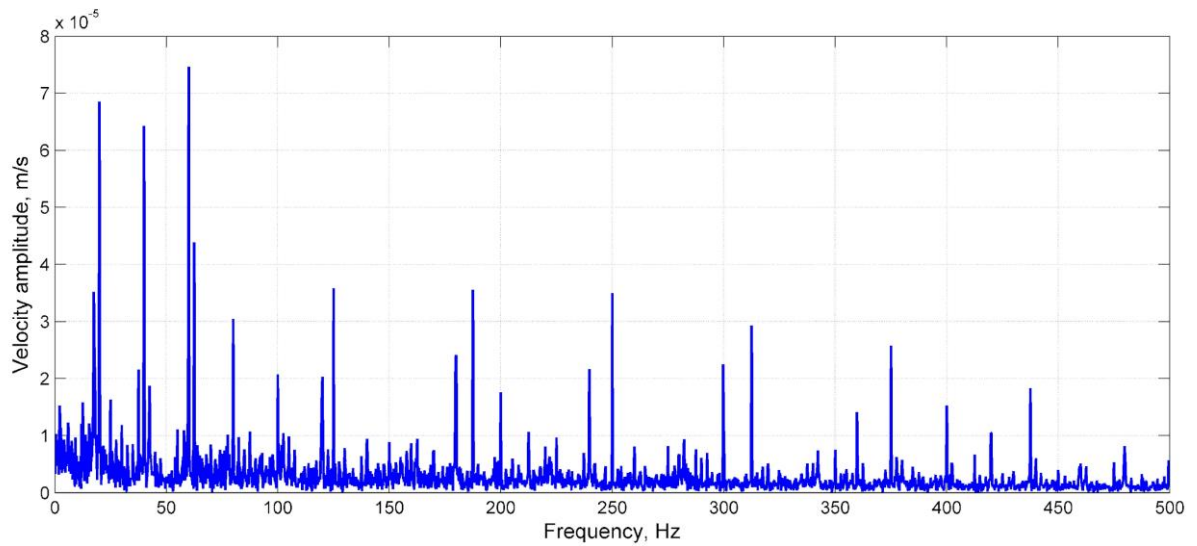
Rysunek 4.32 Uzyskane wyniki analizy widma.

Wyniki pomiarów metodą analizy modalnej przedstawiono poniżej (rys. 4.33-4.37). Jednak wiodącym przedmiotem zainteresowania analizy jest zakres częstotliwości do 500 Hz, ponieważ główne mody rezonansowe obserwowano w tym zakresie częstotliwości. \* *Uwaga: Wykresy odpowiedzi częstotliwościowej przedstawiono w obszarze prędkości, ponieważ w tej analizie widma punkty rezonansu są bardziej widoczne niż na wykresach przyspieszenia i przemieszczenia.*



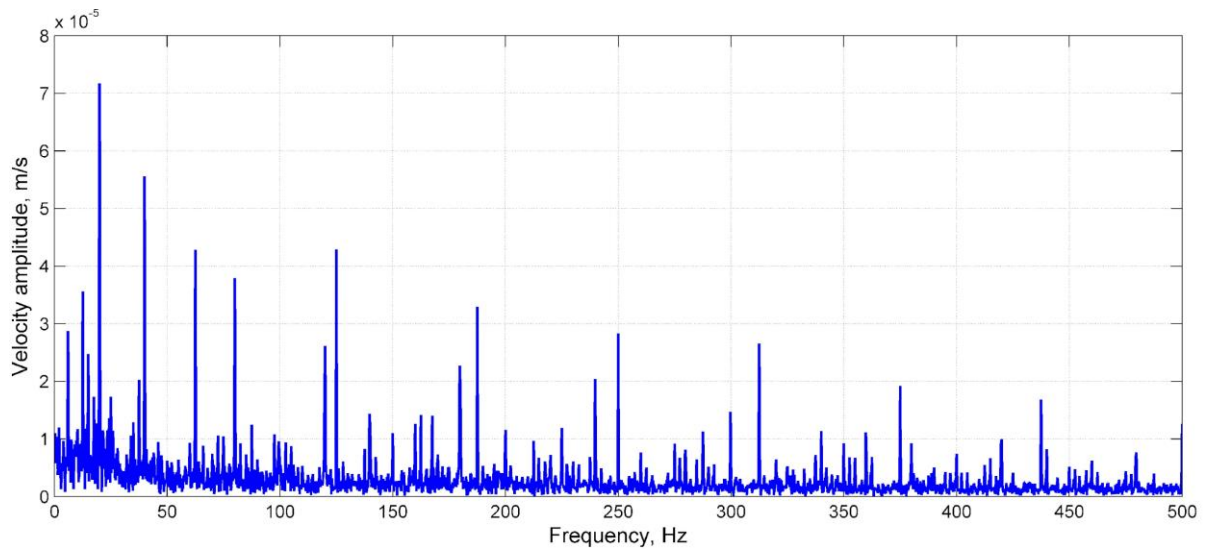
Rysunek 4.33 Wykresy analiz widma – odpowiedź częstotliwościowa pierwszego obiektu.

\* *Dodatkowo w osobnym pliku prezentowany jest film przedstawiający tryb kształtu na pierwszym punkcie rezonansowym - 20Hz (+.gif)*



Rysunek 4.34 Wykresy analiz widma – odpowiedź częstotliwościowa drugiego obiektu.

\* *Dodatkowo w osobnym pliku prezentowany jest film przedstawiający tryb kształtu na pierwszym punkcie rezonansowym - 20Hz (+.gif).*

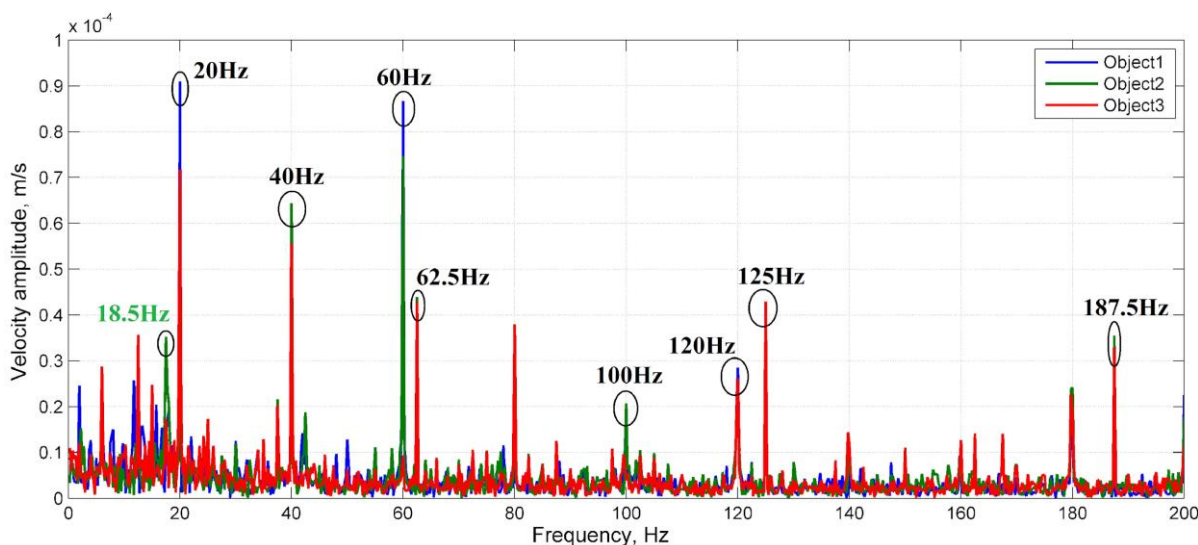


Rysunek 4.35. Wykresy analiz widmowych – odpowiedź częstotliwościowa trzeciego obiektu.

\* *Dodatkowo w osobnym pliku prezentowany jest film przedstawiający tryb kształtu na pierwszym punkcie rezonansowym - 20Hz (+.gif).*

#### 4.4.3 Wnioski z pierwszej analizy

Pierwsza analiza obejmuje porównanie odpowiedzi częstotliwościowej materiałów z korka (rysunek 4.36):



Rysunek 4.36 Analiza porównawcza: wykresy analiz widmowych – odpowiedź częstotliwościowa obiektów z materiału korkowego.

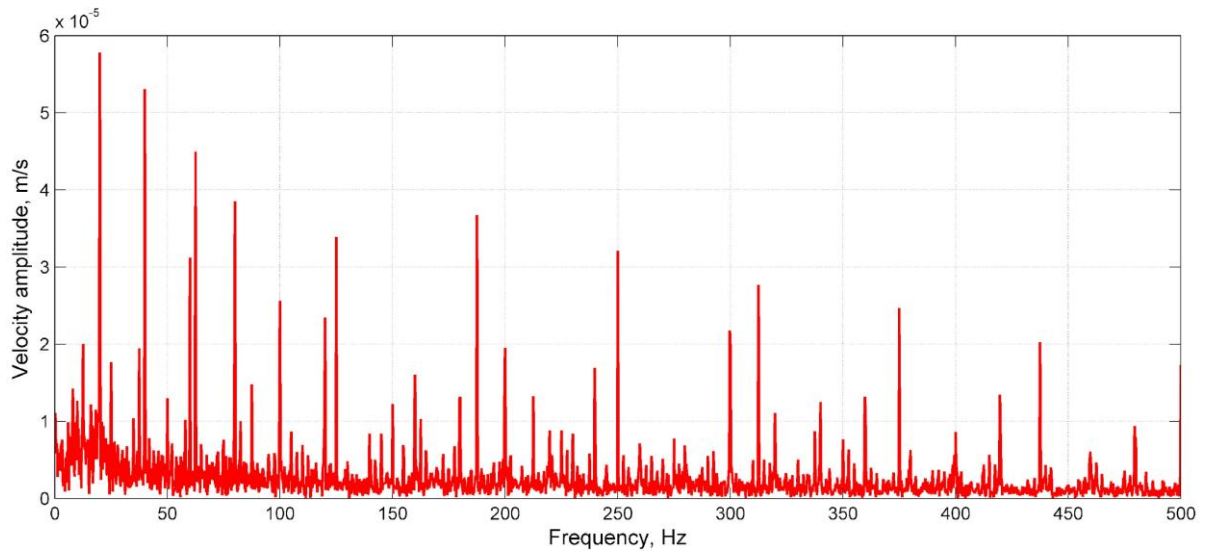
Z porównania analizy częstotliwościowej (Rysunek 4.36) wynika, że centralna częstotliwość rezonansowa laminowanych materiałów korkowych mieści się w zakresie niskich częstotliwości (0 – 200 Hz) i początku zakresu średnich częstotliwości (200 Hz – 500 Hz). Należy zauważyć, że w tym zakresie częstotliwości można zaobserwować główne mody rezonansowe. Porównanie prezentowane jest do 200Hz dla lepszego zobrazowania uzyskanych wyników.

Z analizy częstotliwości wynika, że główna i pierwsza częstotliwość rezonansowa badanego materiału kompozytowego wynosi 20 Hz z harmonicznymi co 20 Hz (20/40...80/100...itp. Hz). Powinna to być również wskazana częstotliwość w zakresie niskich częstotliwości 62,5 Hz z krokiem harmonicznym, który nadal przebiega w średnim zakresie częstotliwości (125 Hz...187 Hz itd.). Złożony charakter laminowanego korka wyjaśnia drugą częstotliwość rezonansową.

Porównanie właściwości tłumiących obiektów przedstawiono na przykładzie pierwszego punktu rezonansowego 20 Hz:

W bieżącym punkcie pierwszy obiekt wibrował z amplitudą prędkości –  $0,9 \cdot 10^{-4}$  m/s; 2. obiekt –  $0,68 \cdot 10^{-5}$  m/s; 3. obiekt –  $0,72 \cdot 10^{-5}$  m/s. To może prowadzić do pierwszego wniosku, że obiekt 2 ma lepsze właściwości tłumiące niż dwa pozostałe przedmioty z laminowanego korka.



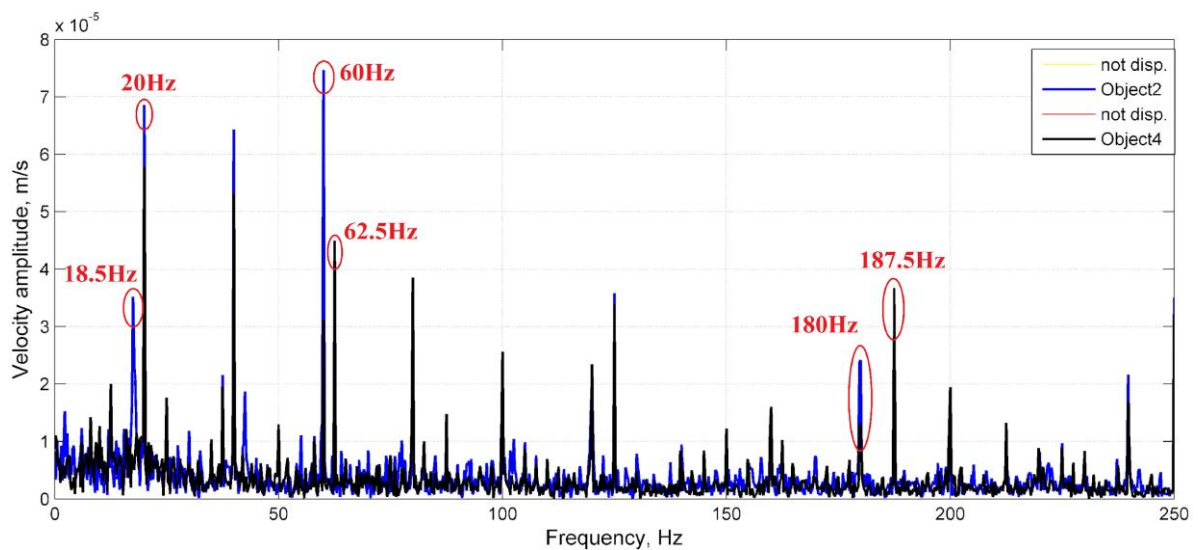


Rysunek 4.37 Wykresy analiz widma – odpowiedź częstotliwościowa czwartego obiektu.

\* Dodatkowo w osobnym pliku prezentowany jest film przedstawiający tryb kształtu na pierwszym punkcie rezonansu - 20Hz (+gif).

#### 4.4.4 Wnioski z drugiej analizy

Druga analiza obejmuje porównanie odpowiedzi częstotliwościowej materiałów laminowanego korka (obiekt 2) i polimetakryloimidu (obiekt 4) (do porównania przyjęto obiekt drugi, który wykazuje najlepsze właściwości tłumiące) (Rysunek 4.38):



Rysunek 4.38 Analiza porównawcza: wykresy widma – odpowiedzi częstotliwościowe laminowanego materiału korkowego i pianki polimetakryloimidowej.

Z analizy częstotliwościowej (rysunek 4.36) wynika, że centralna częstotliwość rezonansowa laminowanych materiałów korkowych znajduje się w zakresie niskich częstotliwości (0 - 200 Hz) i na początku zakresu średnich częstotliwości (200 Hz - 500 Hz). Należy zauważyć, że w tym zakresie częstotliwości można zaobserwować główne tryby rezonansowe. Dla lepszego zobrazowania uzyskanych wyników porównanie przedstawiono do 200Hz.

Z analizy częstotliwości wynika, że główna i pierwsza częstotliwość rezonansowa badanych materiałów kompozytowych wynosi 20 Hz z harmonicznymi co 20 Hz (20/40...80/100...itd. Hz). Powinna to być również częstotliwość punktowa w zakresie niskich częstotliwości 62,5 Hz z krokiem harmonicznym, który nadal przebiega w średnim zakresie częstotliwości (125 Hz...187 Hz itd.). Laminowanie korka i pianki polimetakryloimidowej tym samym materiałem może wyjaśnić dopasowanie punktów rezonansowych na tej samej częstotliwości. Główna różnica w tym przypadku polega na tym, że obiekt 4 zapewnia lepsze właściwości tłumienia w głównych punktach rezonansowych od ~16% do ~57%, w zależności od częstotliwości.

Porównanie właściwości tłumiących obiektów przedstawiono na przykładzie pierwszego punktu rezonansowego 20 Hz:

W tym momencie laminowany korek wibrował z amplitudą prędkości –  $0,68 \cdot 10^{-5}$  m/s, a laminowana pianka polimetakryloimidowa –  $0,57 \cdot 10^{-5}$  m/s (różnica w tłumieniu ~16%). Dodatkowo na częstotliwości 60 Hz: amplituda prędkości laminowanego korka –  $0,74 \cdot 10^{-5}$  m/s i laminowanej pianki polimetakryloimidowej –  $0,32 \cdot 10^{-5}$  m/s (różnica w tłumieniu ~57%). Amplituda prędkości deformacji przy częstotliwościach 62,5 Hz, 125 Hz itp. prawie nie tłum się przez piankę polimetakryloimidową (\*w pewnym momencie nawet więcej). *Różnica w amplitudzie materiałów potwierdziła, że pianka polimetakryloimidowa jest lepszym rozwiązaniem do tłumienia impulsu uderzeniowego niż materiał korkowy, ponieważ sztywność i odkształcenia obiektów są różne. Jednocześnie drugi obiekt wykazuje zbliżoną charakterystykę tłumienia w kilku punktach rezonansowych, co może prowadzić do wniosku, że korek laminowany w niektórych zadaniach może być stosowany oprócz laminowanej pianki polimetakryloimidowej.*

## **4.5. Próba zginania kompozytów o strukturze typu sandwich na bazie korka**

### **4.5.1 Próbki**

Wyprodukowano cztery panele testowe w celu porównania różnych charakterystyk zginania paneli o strukturze warstwowej. W trzech z nich zastosowano różne wypełniacze kompozytowe na bazie korka. Główne charakterystyki przedstawiono w tabeli 4.3. Jedna z nich zawiera wypełniacz z pianki polimetakryloimidowej. Jej charakterystykę przedstawiono w tabeli 4.4. Wszystkie panele pokryto obustronnie jednolitym laminatem szklano-plastikowym o grubości 0,135 mm. Zastosowane w nich

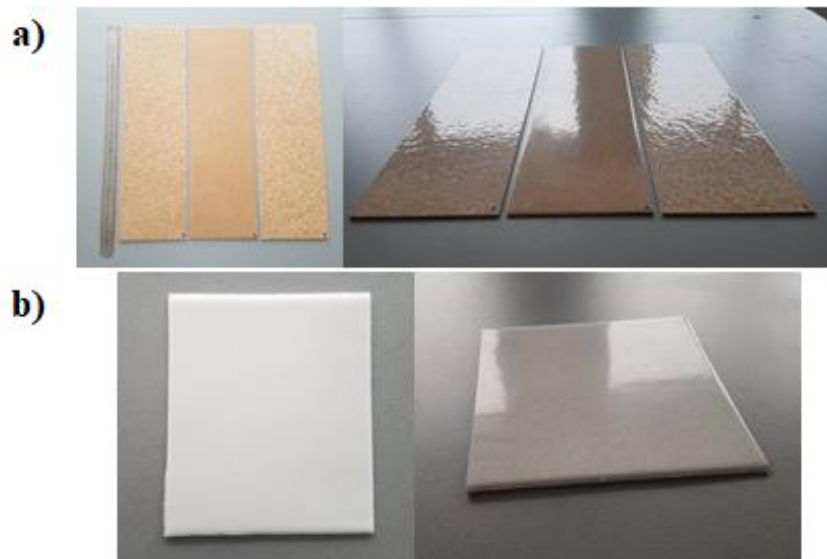
włókno szklane to *Interglas 91110* o gramaturze 110 g/m<sup>2</sup>, a rodzaj splotu to jodełka. Warto zauważyć, że panele były pokryte tkanem pod tym samym kątem z obu stron. Tkanina z włókna szklanego została zaimpregnowana dwuskładnikową żywicą epoksydową „Epoxy Resin L + Hardener L” i została dociśnięta do powierzchni paneli poprzez umieszczenie ich w szczelnym worku próżniowym, gdzie zastosowano próżnię 820 mbar. Po 14 godzinach ciśnienie w worku wyrównano do atmosferycznego, ale panele usunięto dopiero po 24 godzinach. Obraz paneli laminowanych przedstawiono na rysunku 4.39.

Tabela 4.3 Charakterystyka kompozytów na bazie korka.

Płaszczyzna materiału korka \Nr.	1	2	3
Wielkość granulek korka	2-5 mm	0. 5-1 mm	2-5 mm
Granulowany materiał wiążący	Poliuretan	Specjalistyczny poliuretan	Poliuretan
Gęstość	186,1kg/ m <sup>3</sup>	165,3 kg/ m <sup>3</sup>	357,7 kg/ m <sup>3</sup>
Wytrzymałość na rozciąganie	≥500 kPa	≥400 kPa	≥400 kPa
Ścisłość	10-25 %	30-50%	5-25%
Powrót do pozycji wyjściowej	≥70 %	≥75%	≥70 %

Tabela 4.4 Charakterystyka pianki polimetakryloimidowej.

Nazwa materiału	CASCELL 30 RS
Gęstość	30 k g/ m <sup>3</sup>
Odporność na ściskanie	400 kPa
Wytrzymałość na rozciąganie	800 kPa
Moduł sprężystości	38 MPa
Sztywność zginania	800 kPa
Odporność na ścinanie	400 kPa
Moduł ścinania	15 MPa
Odporność termiczna	≥200 °C



Rysunek 4.39 a) Panele o strukturze kanapkowej z różnymi wypełnierzami kompozytowymi na bazie korka, b) Panel o strukturze kanapkowej z wypełnierzem z pianki polimetakryloimidowej.



Rysunek 4.40 Panele przygotowane do próby zginania. Czerwona strzałka wskazuje 0 °, zielona 90 °.

Powierzchnie laminowanego panelu o strukturze warstwowej z wypełnierzem kompozytowym na bazie korka mają większą chropowatość niż te z wypełnieniem pianką polimetakryloimidową. Warto wspomnieć, że im mniejsze granulki kompozytu na bazie korka, tym gładsza jest powierzchnia.

Próbki o wymiarach: 40x75x3mm są wycinane z każdego panelu. Wytworzono 16 paneli próbnych, tj. otrzymano 4 próbki z każdego panelu o strukturze warstwowej. Poddano je próbom zginania. Należy

również zauważyć, że próbki przygotowywano obracając włókno szklane o 0-90° wzdłuż kierunku najdłuższego boku próbki. Ich obraz pokazano na rycinie 4.40.

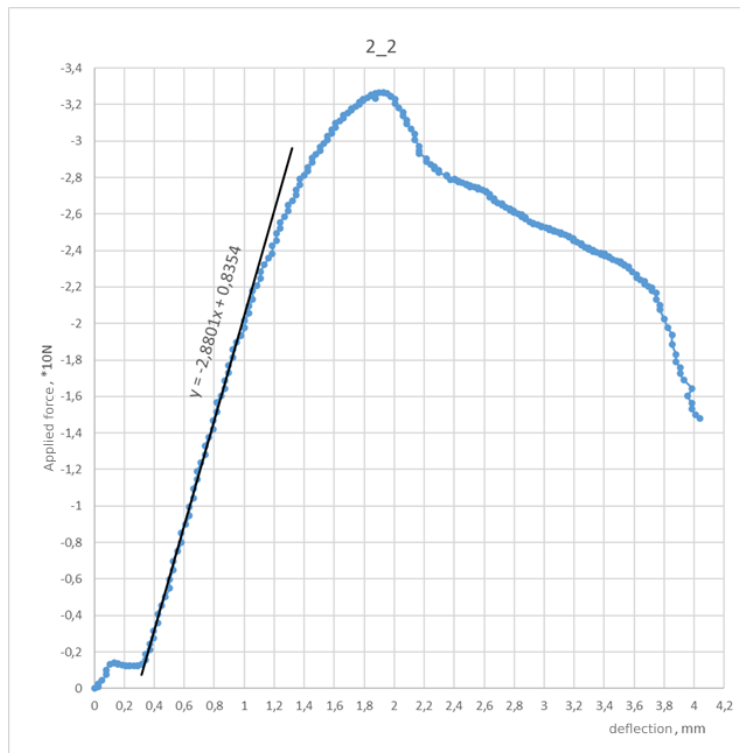
#### **4.5.2 Przeprowadzanie prób zginania**

Próby rozciągania i zginania przeprowadzono za pomocą uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej Tira Test 2300 z cyfrowym rejestrowaniem danych testowych. Do rejestracji danych użyto oprogramowania Catman expresses three. Zastosowano trójpunktowy statyw zginający. Odległość między stałymi łożyskami została ustawiona na 50 mm. Prędkość prasy do gięcia wynosiła 2-0,4 mm/min. Stanowisko przedstawiono na rysunku 4.41. Grubość i szerokość wszystkich próbek zmierzono suwmiarką.



Rysunek 4.41. Stanowisko do prób zginania.

Istotne jest odpowiednie przygotowanie systemu, aby uzyskać dokładne wyniki z testów praktycznych. Z powodu nierównej powierzchni materiałów konieczne jest wglębnienie próbki w trakcie badania. Próbki są odkształcane o 0,3-0,4 mm do momentu rozpoczęcia proporcjonalnego\* obciążania. Wykres współzależności między ugięciem a wytrzymałością na rozciąganie na próbce 2\_2 przedstawiono na rysunku 4.42.



Rysunek 4.42 Współzależność między ugięciem a przyłożoną siłą na próbce 2\_2.

W granicach obciążenia proporcjonalnego narysowano przybliżoną krzywą i obliczono wytrzymałość i moduł sprężystości każdej próbki.

Wytrzymałość ( $\sigma$ ) obliczono odwołując się do wzoru (Równanie 4.1):

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (4.1)$$

L - siła zginająca w newtonach; L - odległość między stałymi łożyskami w milimetrach; b - szerokość próbki w milimetrach; h - grubość próbki w milimetrach.

Do obliczeń modułu sprężystości ugięcia obliczono przy odpowiednich wartościach naprężeń  $f_1 = 0,0005$  i  $f_2 = 0,0025$  (Równanie 4.2).

$$s_i = \frac{\varepsilon_i L^2}{6h} \quad (i=1;2) \quad (4.2)$$

$s_i$ - odchylenie boczne w milimetrach;  $\varepsilon_{fi}$  - odpowiednie wartości naprężeń podane powyżej; L - odległość między stałymi łożyskami w milimetrach; h - grubość próbki w milimetrach.

Moduł sprężystości obliczono wg. wzoru (równanie 4.3):

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (4.3)$$

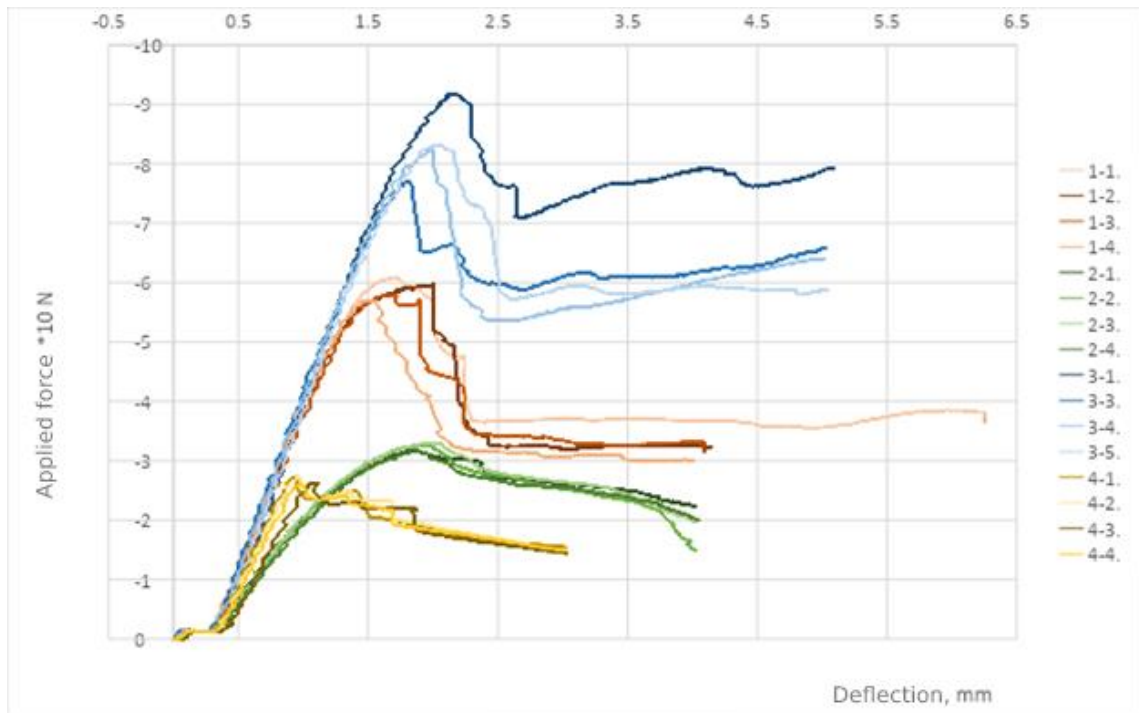
$\sigma_1$ - wytrzymałość w MPa w punkcie zginania  $s_1$ ;  $\sigma_2$ - wytrzymałość w MPa w punkcie zginania  $s_2$ .

#### 4.5.3 Porównanie wyników i analiza

W tabeli 4.5 przedstawiono dane zebrane podczas testów. Podaje również obliczoną wartość  $E_f$  każdej próbki (rysunek 4.43).

Tabela 4.5 Tabela danych testowych.

	h - total thickness	Laminate thickness	Filler thickness	b- width	l - distance	Fm	$\sigma$	$E_f$
	mm	mm	mm	mm	mm	N	MPa	MPa
01 01	2,96	0,135	2,69	40,3	50	60,88	12,93146	10,32732
01 02	2,9	0,135	2,63	40,1	50	59,52	13,23682	11,70209
01 03	2,91	0,135	2,64	40,3	50	57,95	12,73573	11,34853
01 04	2,91	0,135	2,64	40,2	50	56,99	12,5559	11,20888
02 01	2,91	0,135	2,64	40,3	50	31,65	6,95575	6,153586
02 02	2,87	0,135	2,6	40,1	50	32,65	7,413722	6,539743
02 03	2,97	0,135	2,7	40,6	50	33,01	6,913021	6,104861
02 04	2,9	0,135	2,63	40,4	50	31,57	6,968808	6,295767
03 01	3,28	0,135	3,01	40,4	50	91,65	15,81484	9,001601
03 03	3,22	0,135	2,95	40,2	50	76,95	13,84625	10,24622
03 04	3,37	0,135	3,1	40,9	50	82,25	13,28049	8,753336
03 05	3,2	0,135	2,93	40,8	50	83,13	14,9231	9,717874
04 01	2,82	0,135	2,55	40,2	50	27,43	6,435211	11,04473
04 02	2,89	0,135	2,62	40,2	50	27,47	6,136181	9,911932
04 03	2,65	0,135	2,38	40,1	50	26,18	6,972601	10,8347
04 04	2,73	0,135	2,46	40,1	50	26,06	6,539823	10,39721



Rysunek 4.43. Obliczony  $E_f$  każdej próbki.

Jak widać z uzyskanych wyników, materiałem o największej wytrzymałości były największe granulki na bazie korka. Wytrzymałość była trzykrotnie większa niż materiału kompozytowego z wypełniaczem z pianki polimetakryloimidowej. Warto zauważyć, że wraz ze zmniejszaniem się wielkości granulek na bazie korka, zmniejszała się również wytrzymałość na zginanie. Wytrzymałość na zginanie próbek o najmniejszych ziarnach była trzykrotnie mniejsza niż kompozytów o największych ziarnach.

#### 4.5.4 Próby rozciągania

Do testów praktycznych próbki zostały wycięte z paneli laminowanych. Wymiary zostały dobrane wg zaleceń personelu badawczego (rysunek 4.44). Kształty próbek zostały wycięte z płyt laminowanych przy użyciu frezarki (CNC).

Badanie przeprowadzono przy użyciu stanowiska do rozciągania. Głównym problemem podczas testów było przesuwanie się płytek w chwytakach. Z tego powodu nie uzyskano zadowalających wyników. W drugim teście, aby zapobiec ślizganiu się płytek, do punktów mocowania przyklejono gumową płytkę klejem w celu zwiększenia przyczepności.





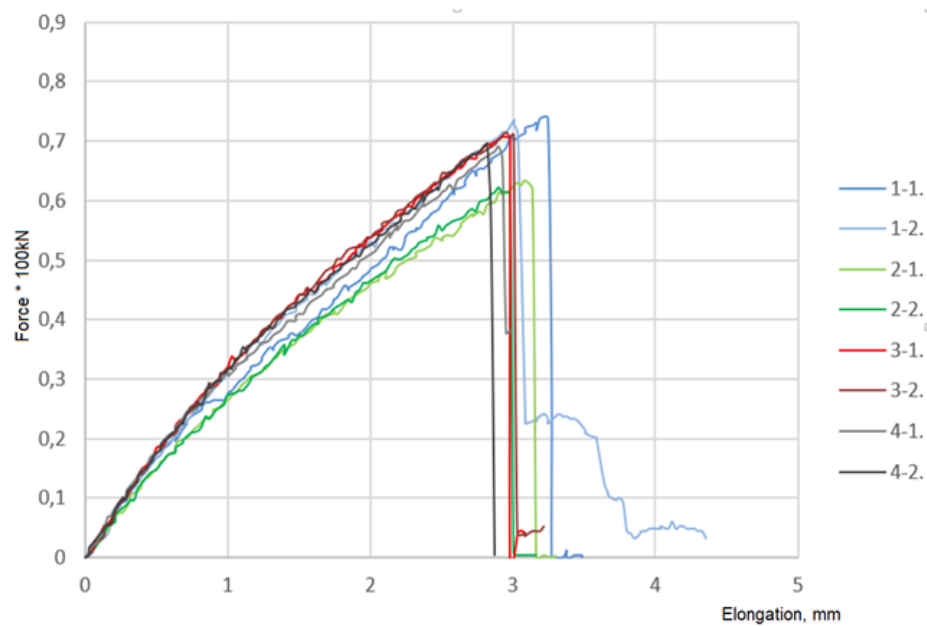
Rysunek 4.44 Przykładowe frezowanie i wymiary.

#### ***4.5.5 Wyniki próby rozciągania***

Jak wynika z wyników podanych w tabeli 4, materiał o największej szybkości rozciągania wytworzono z granulowanego materiału korkowego. Szybkość rozciągania była o ok. 5 proc. większa niż w przypadku materiału kompozytowego z wypełniaczem piankowym z polimetakryloimidu. Wskaźnik naprężenia próbek o najmniejszych granulkach był o 20N niższy w porównaniu do próbek o największych granulkach. Jednak nośność próbki z granulatem średniej wielkości była o około 10% mniejsza niż próbki z granulatem największym.

Tabela 4.6 Tabela danych testowych.

	A	B	S <sub>0</sub>	F <sub>m</sub>	Rm <sub>-</sub>
	mm	mm	mm <sup>2</sup>	N	MPa
1_1	2,95	10.07	29,7	738,9	2,95
1_2	2,96	10.03	29,7	734,9	2,96
2_1	2,88	10.08	29.0	634,5	2,88
2_2	2.91	10.03	29.2	622,5	2.91
3_1	2,85	10.02	28.6	706,8	2,85
3_2	2.83	10.03	28.4	714,8	2,93
4_1	2,80	10.01	28.0	690,8	2,80
4_2	2,80	10.03	28.1	694,8	2,80



Rysunek 4.45 Zależność między wydłużeniem a siłą przyłożoną do każdej próbki.

Na podstawie uzyskanych wyników rozciągania sporządzono wykresy przedstawiające zależność wydłużenia próbek od siły rozciągającej (rysunek 4.45). Z wykresów można było zauważyć, że wytrzymałość na rozciąganie różnych próbek jest podobna (wyniki wahają się w granicach 10 procent), gdyż w niewielkim stopniu zależy ona od materiału wypełniającego konstrukcję typu sandwich.

## Bibliografia

- [1] Fan, J., & Njuguna, J. (2016). An introduction to lightweight composite materials and their use in transport structures. *Lightweight Composite Structures in Transport*, 3–34. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-325-6.00001-3>
- [2] Krzyżak, A., Mazur, M., Gajewski, M., Drozd, K., Komorek, A., & Przybyłek, P. (2016). Sandwich Structured Composites for Aeronautics: Methods of Manufacturing Affecting Some Mechanical Properties. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2016/7816912>
- [3] Li, Z., & Ma, J. (2020). Experimental Study on Mechanical Properties of the Sandwich Composite Structure Reinforced by Basalt Fiber and Nomex Honeycomb. *Materials*, 13(8), 1870. <https://doi.org/10.3390/ma13081870>.
- [4] Walkowiak, M., Reinicke, U., & Anders, D. (2022). Numerical Investigation of Different Core Topologies in Sandwich-Structured Composites Subjected to Air-Blast Impact. *Applied Sciences*, 12(18), 9012. <https://doi.org/10.3390/app12189012>
- [5] (P6B) - ALU - Panneau sandwich âme en polystyrène expansé by Weiss Chemie | DirectIndustry. (n.d.). <https://www.directindustry.fr/prod/weiss-chemie/product-66508-1338307.html> (accessed Jan. 11, 2023).
- [6] Gil, L. (2015). New Cork-Based Materials and Applications. *Materials*, 8(2), 625–637. <https://doi.org/10.3390/ma8020625>
- [7] Silva, J., Sabatini, R., and Gardi, A.G.M. (2014). Opportunities offered by naturally occurring materials in lightweight aerostructures design, Proceedings of the Practical Responses to Climate Change (PRCC 2014), pp. 1–9.
- [8] Pereira, H. (2015). The Rationale behind Cork Properties: A Review of Structure and Chemistry. *BioResources*, 10(3). <https://doi.org/10.15376/biores.10.3.pereira>
- [9] Gesimondo, N., & James Christopher Postell. (2011). *Materiality and interior construction*. Hoboken, N.J.: John Wiley.

- [10] Utah National Parks Trivet hot Pad Original Text - Etsy. (n.d.). from [www.etsy.com](https://www.etsy.com/listing/573062806/utah-national-parks-trivet-hot-pad?click_key=20412901616b07a04914e36a5a71b3c36f16acc4%3A573062806&click_sum=3bb4c7d7&ref=shop_home_active_9&sts=1) website: [https://www.etsy.com/listing/573062806/utah-national-parks-trivet-hot-pad?click\\_key=20412901616b07a04914e36a5a71b3c36f16acc4%3A573062806&click\\_sum=3bb4c7d7&ref=shop\\_home\\_active\\_9&sts=1](https://www.etsy.com/listing/573062806/utah-national-parks-trivet-hot-pad?click_key=20412901616b07a04914e36a5a71b3c36f16acc4%3A573062806&click_sum=3bb4c7d7&ref=shop_home_active_9&sts=1) (accessed Jan. 11, 2023).
- [11] “Maripaz – 4Spaces.” Maripaz. (n.d.). 4Spaces. <https://www.4spaces.ch/collections/cork-fabrics-and-wallcoverings/products/maripaz> (accessed Jan. 11, 2023).
- [12] Laser Cut Cork – Laser Cut Signs. (n.d.). [https://lasercutsigns.co.uk/dt\\_gallery/laser-cut-cork/](https://lasercutsigns.co.uk/dt_gallery/laser-cut-cork/) (accessed Jan. 11, 2023).
- [13] Silva, J. M., Nunes, C. Z., Franco, N., & Gamboa, P. V. (2011). Damage tolerant cork based composites for aerospace applications. *The Aeronautical Journal*, 115(1171), 567–575. <https://doi.org/10.1017/s0001924000006205>
- [14] About. (2019, July 27). HandBoom. <https://handboom.net/about/> (accessed Jan. 11, 2023).
- [15] Densities of cork granules - CorkLink - cork products direct from Portugal. <https://www.corklink.com/index.php/densities-of-cork-granules/> (accessed Jan. 11, 2023).
- [16] Gil, L. (2015b). New Cork-Based Materials and Applications. *Materials*, 8(2), 625–637. <https://doi.org/10.3390/ma8020625>.
- [17] Castanie, B., Bouvet, C., & Ginot, M. (2020b). Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites Part C: Open Access*, 1, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100004>
- [18] My glider has 4 configurations of wingtips, winglets and wing extensions. Can anyone beat that?! (2020, October 8). Reddit. [https://www.reddit.com/r/aviation/comments/j7atmo/my\\_glider\\_has\\_4\\_configurations\\_of\\_wingtips/](https://www.reddit.com/r/aviation/comments/j7atmo/my_glider_has_4_configurations_of_wingtips/) (accessed Jan. 11, 2023).
- [19] Dimino, I., Gallorini, F., Palmieri, M., & Pispola, G. (2019). Electromechanical Actuation for Morphing Winglets. *Actuators*, 8(2), 42. <https://doi.org/10.3390/act8020042>
- [20] Trabol, J. (2021, December 7). Test: HpH 304 Shark MS. Nordic Gliding. <https://nordicgliding.com/ng-tester-hph-304-shark-ms/> (accessed Jan. 11, 2023).
- [21] Modern Aviation. (n.d.). 2001 Falcon 2000. <https://modern-aviation.com/product/2001-falcon-2000/> (accessed Jan. 11, 2023).
- [22] Ramec - Materiali Ecologici da Costruzione. (2017, December 14). Superlight panel - Pannello sandwich, Okoumè, sughero compatto biondo. R.A.M.E.C - Materiali Ecologici E Da

- Costruzione. <https://www.ramec.it/prodotti/superlight-panel-pannello-sandwich-okoume-sughero-compatto-biondo/> (accessed Jan. 11, 2023).
- [23] Grōwancork - Projetos customizados. (n.d.). <https://www.growancork.com/projetos/projetos-customizados-4/> (accessed Jan. 11, 2023).
- [24] Kamščio produktu ekspertai! (n.d.). Dekoratyvine kamÂštinė danga NATŪRALUS 3D STRIPE - BESTSELLER! KamČio Produktu Ekspertai! <https://www.kamstiena.lt/parduotuve/139-stripes/571-dekortyvine-kamstine-sienu-danga-fiord-exclusive-3x300x600mm-pakelis-198m22/> (accessed Jan. 11, 2023).
- [25] Lakreb, N., Knopic, S., Machado, J. S., Bezzazi, B., & Pereira, H. (2017). Properties of multilayered sandwich panels with an agglomerated cork core for interior applications in buildings. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(1), 143–153. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1198-3>
- [26] Griffe Clik Cork. (n.d.). Mcbike. <https://mcbike24.de/Griffe-Clik-Cork/1026771> (accessed Jan. 11, 2023).
- [27] Anti Vibration Mounting Pad. (n.d.). [indiamart.com. https://www.indiamart.com/proddetail/anti-vibration-mounting-pad-15429567862.html](https://www.indiamart.com/proddetail/anti-vibration-mounting-pad-15429567862.html) (accessed Jan. 11, 2023).
- [28] Wingren, N., & Sjoberg, D. (2022). Nondestructive Testing Using mm-Wave Sparse Imaging Verified for Singly Curved Composite Panels. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/tap.2022.3211341>
- [29] Kim, B. J., Kim, J., Cha, S. H., Shim, Y. B., Jeong, C., Kim, N., & Park, Y. B. (2021). Interfacial enhancements between a three-dimensionally printed Honeycomb-Truss core and woven carbon fiber/polyamide-6 facesheets in sandwich-structured composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 149, 106534. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106534>.
- [30] Ge Qi, L.M. and Jin-Shui, Y. (2016). Development of the lightweight inserts for composite sandwich panels with pyramidal truss cores Conference: ECCM17-17th European Conference on Composite Materials.
- [31] Yam, K. L. (2009). *The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology*. Wiley.
- [32] Jadhav, P., Quabili, A., Molligan, D., Andersen, S. and Gillespie Jr., J.W. (2007). Mechanical Characterization of Adhesively Bonded Metallic Insert Joints in Vinyl-Ester Balsa core Sandwich Panels, in American Society for Composites – 22nd Annual Technical Conference, 2007.

- [33] PCC Fasteners - Sandwich Structure Fasteners. (n.d.). <https://www.pccfasteners.com/products/product-categories/specialty-fasteners/fasteners-for-sandwich-structure/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [34] Castanie, B., Bouvet, C., & Ginot, M. (2020). Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites Part C: Open Access*, 1, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100004>
- [35] Flitney, R. K. (2014). *Seals and Sealing Handbook*. Elsevier.
- [36] Kumar, T., Mohsin, R., Majid, Z. A., Ghafir, M. F. A., & Wash, A. M. (2020). Experimental study of the anti-knock efficiency of high-octane fuels in spark ignited aircraft engine using response surface methodology. *Applied Energy*, 259, 114150. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114150>
- [37] Chuck, C. J., & Donnelly, J. (2014). The compatibility of potential bioderived fuels with Jet A-1 aviation kerosene. *Applied Energy*, 118, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.019>
- [38] Erickson, J., Brewer, P., Friederich, G., & Peltzer, E. (2002). Design and operation of a pressure retaining sampler for sedimentary gases and gas hydrates. MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No.01CH37295). <https://doi.org/10.1109/oceans.2001.968374>.
- [39] Fernandes, E., Pires, R., & Reis, R. (2017). Cork biomass biocomposites. *Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials*, 365–385. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100959-8.00017-2>
- [40] Cork Gasket Material | Types & Thicknesses. (2021, November 6). RAM Gasket Solutions. <https://www.ramgaskets.com/gasket-materials/cork-gasket-material/> (accessed Jan. 09, 2023).
- [41] Portugal, F. (n.d.). Automotive industry. Amorim Cork Composites. <https://amorimcorkcomposites.com/en/materials-applications/sealing/industries-applications/automotive/> (accessed Jan. 09, 2023).
- [42] Parr, E. A. (2011). *Hydraulics and pneumatics : a technician's and engineer's guide*. Amsterdam ; Boston: Butterworth-Heinemann..
- [43] Santra, R. N., Roy, S., Tikku, V. K., & Nando, G. B. (1995). In-situ compatibilization of thermoplastic polyurethane and polydimethyl siloxane rubber by using ethylene methyl acrylate copolymer as a reactive polymeric compatibilizer. *Advances in Polymer Technology*, 14(1), 59–66. <https://doi.org/10.1002/adv.1995.060140106>
- [44] Ashton Seals. (n.d.). CORK. <https://www.ashtonseals.co.uk/gaskets-cork> (accessed Jan. 12, 2023).

- [45] Silicone Gaskets - Real Gaskets Tennessee. (2022, August 3). Valve Cover Gasket - Lycoming engines O-235 thru TIO-540. <https://realgaskets.com/product/valve-cover-gasket-6-holes-2/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [46] Woodyard, D. (2009). Theory and General Principles. Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines, 1–40. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-8984-7.00001-1>
- [47] Karpenko, M., & Nugaras, J. (2022). Vibration damping characteristics of the cork-based composite material in line to frequency analysis. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 593–602. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl/152970>

## ROZDZIAŁ 5

### Zastosowani a kompozytów korkowych w lotnictwie i kosmosie

*Elvin Ragimov*<sup>1</sup>, *Mehmet Alper Sofuoğlu*<sup>2,\*</sup>, *Selim Gürgen*<sup>3</sup>, *Melih Cemal Kuşhan*<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet w Leeds, Wielka Brytania

<sup>2</sup> Wydział Inżynierii Mechanicznej, Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir, Turcja

<sup>3</sup> Wydział Inżynierii Lotniczej, Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir, Turcja

\*Korespondencja: asofuoglu@ogu.edu.tr

#### Abstrakt

Korek to naturalnie występujący, odnawialny i trwały surowiec, który był używany od wieków. Literatura naukowa na temat korka jest pokaźna ze względu na to długotrwałe zainteresowanie. Większość opracowań koncentruje się na strukturze chemicznej korka, jego możliwościach mechanicznych i fizycznych oraz produktach i subproduktach. Począwszy od wzrostu, histologii i struktury, omówione są szeroko zakrojone próby dokładnego scharakteryzowania korka oraz świeże postępy i rozwój badań (w skali mikro i makro). Następnie zbadano charakterystyczne cechy korka i porównano je z innymi materiałami stosowanymi w podobnych branżach. Podjęto próbę wyjaśnienia, dlaczego korek jest lepszy od innych materiałów pod różnymi względami. Wytrzymałość na rozciąganie, moduł Younga i współczynniki Poissona są omawiane w różnych warunkach, które są rzeczywistymi zastosowaniami, jednocześnie zajmując się ich właściwościami mechanicznymi w tych badaniach. Tematem tego przeglądu są właściwości mechaniczne i termiczne kompozytów korkowych oraz ich obecne wykorzystanie w zastosowaniach lotniczych. Na koniec omówiono część przyszłych zastosowań tych ekologicznych kompozytów.

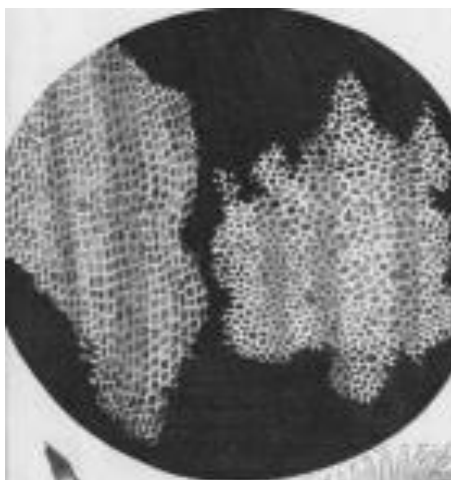
**Słowa kluczowe:** kompozyty korkowe, ekologiczne, zastosowania lotnicze.

#### 5.1 Wprowadzenie

Poszukiwanie lepszych naturalnych materiałów o określonych właściwościach w inżynierii ma kluczowe znaczenie dla naukowców. W różnych zastosowaniach inżynieryjnych i projektowych jednym z najbardziej znanych materiałów naturalnych jest korek, wykazujący niesamowity potencjał zmiany syntetycznych materiałów komórkowych. Co więcej, współczesny świat jest świadkiem świadomości nabywców, polityki rządów i „ekologicznych” trendów, które wymagają od producentów zapewnienia rozwiązań rynkowych nadających się do recyklingu. W XVI wieku korek był jednym z pierwszych materiałów odkrytych i



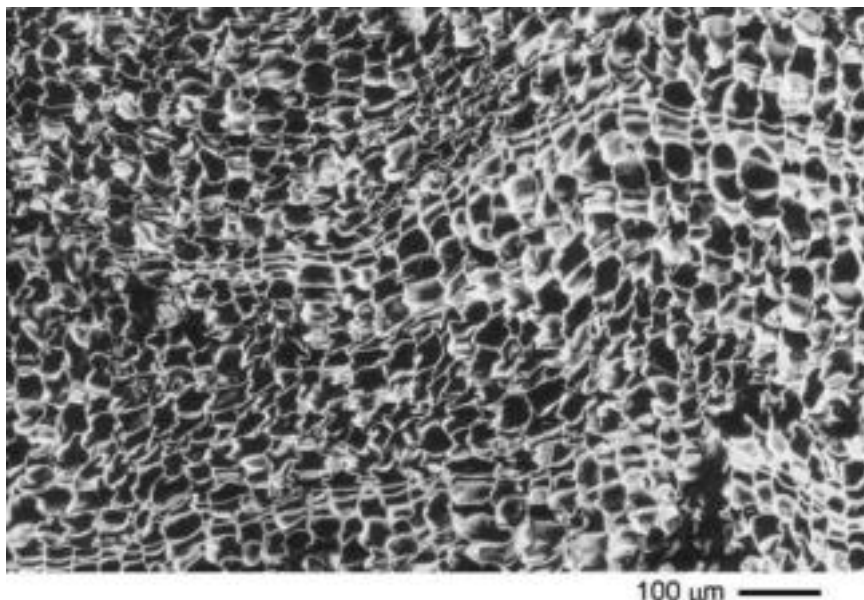
zbadanych przez Roberta Hooke'a. Rysował plastry korka dzięki mikroskopowi. Wyniki badań opublikowano w 1665 roku. Jak wspomniano w badaniach, małe struktury w materiale korka nazywane są komórkami. Komórka pochodzi z łaciny, i znaczy mały pokój. Na rysunku 5.1 widać rysunek Hooke'a. Ten rysunek może nam dostarczyć informacji o wielu cechach topologicznych komórek korka. Korek jest używany przez ludzi od ponad 5000 lat jako naturalny, odnawialny i zrównoważony surowiec. Ludzkość wykorzystuje materiały z korka do swoich codziennych potrzeb na całym świecie, takich jak uszczelnianie pojemników, narzędzia wędkarskie i sandały. Współczesne użycie jako zatyczka do korka pojawia się dzięki benedyktyńskiemu mnichowi Dom Perignon w pierwszej połowie XVII wieku. Dotychczasowe ulepszenia w badaniach nad korkiem zostały zmienione z formy relacji korka z winem na wysoką pojemność, myślenie natury, egzekwowanie pozostałości przemysłu korkowego i kompozytów. W XXI wieku ma różne zastosowania, nie tylko jako zatyczka korkowa, ale także jako materiał lotniczy, dzięki kompozytom stosowanym na podłogi, okładziny ścienne i różne zastosowania przemysłowe, wycinając znaczną część materiałów korkowych. Ponadto jest wszechstronnym materiałem budowlanym o takich właściwościach, jak lekkość, elastyczność i sprężystość, a także nieprzepuszczalność, izolacyjność, odporność na zużycie, właściwości ogniodoporne, właściwości hipoalergiczne i trwałość, które odróżniają go od drewna i kamienia [1].



Rycina 5.1 Rysunek komórki korka z perspektywy mikroskopowej [2].

Sztywna część, która zapewnia kluczowe właściwości korka, jest zawarta w twarzach każdego stopnia pryzmatycznego. Te pryzmatyczne etapy nazywane są komórkami, a biosyntetyczne przemieszczenie polimeru łączy je. Poza tym forma stałych materiałów komórki nie jest jednorodna. Ten typ ultrastruktury objawia się na poziomie poniżej mikroskopu ze względu na skład składników chemicznych i rozmieszczenie tych składników w przestrzeni, a także związany z tym proces rozwoju biologicznego. Struktura komórkowa korka jest wyjątkowa. Spienione tworzywa sztuczne mają mniejsze i cieńsze komórki niż korek. Idealna przeciętna komórka miałaby następujące wymiary: 40  $\mu\text{m}$  wysokości pryzmatu, 20  $\mu\text{m}$  krawędzi podstawy, 1  $\mu\text{m}$  grubości ścianki komórki, od dwóch do trzech pofałdowań na bocznej powierzchni pryzmatu, długość

fali 15 metrów i amplitudę 5– 6  $\mu\text{m}$ . Ściany komórkowe korka są w dużym stopniu elastyczne i pofaldują się lub pofalują pod wpływem ściskania w różnym stopniu. Ponadto, w porównaniu z wczesnymi komórkami korka, grubościennie, krótkie późne komórki korka są znacznie bardziej solidne i mocniejsze. Na rysunku 5.2 pokazano strukturę pierwotnego korka.



Rysunek 5.2 Struktura pierwotnego korka [1].

Różne zastosowania materiałów korkowych są badane przez różnych naukowców. Mechaniczna reakcja aglomerowanego korka w różnych sytuacjach była tematem Jardina i zesp. [3] oraz Santos i zesp. [4]. Ponadto zbadali charakterystykę zależności, takich jak gęstość, rodzaj spoiwa i wielkość ziarna ekspandowanego materiału korkowego. Costas i zesp. [5] przeanalizowali kompozyt korkowy jako element przedniego amortyzatora samochodu hybrydowego. Oprócz produkcji amortyzatorów, korek aglomerowany był używany do kształtowania reduktorów uderzenia bocznego w pojazdach drogowych w celu zapewnienia bezpieczeństwa. Badaniami kierowali Tay i zesp. [6]. Sanchez-Saez i zesp. [7] badali uderzenia balistyczne struktur rdzeniowych wykonanych z korka.

Kora dębu służy do produkcji korka, który jest substancją pochodzenia drzewnego. Pozyskiwana jest z najbardziej zewnętrznej warstwy pnia drzew, z której jest usuwana w nieszkodzony sposób z drzew, a dzieje się to co 9-12 lat, gdy producent ma pewność, że warstwa osiąga wymaganą szerokość. Kora jest zbierana przez wykwalifikowany personel, co pozwala drzewu wyrosnąć na kolejną warstwę kory zewnętrznej, którą można zebrać w przyszłości. Dlatego korek można zbierać 17 razy w ciągu życia dębu korkowego, trwającego 200 lat. Korek to nie tylko zasób naturalny, ale także materiał nadający się do recyklingu i odnawialny. Innymi słowy, jest to całkowicie „zielony” materiał o ujemnym śladzie węglowym ze względu na okres produkcji, który jest przenoszony podczas cyklu życia drzewa. 2,1 miliona hektarów jest porośniętych dębami korkowymi w Portugalii, gdzie znajduje się jedna trzecia wszystkich dębów na

świecie. Sesyjna produkcja dębów korkowych w Hiszpanii i Portugalii stanowi odpowiednio około 30,5% i 49,6% ogółu surowców dla tych pierwszych i drugich. Z tego powodu korek jest surowcem dla zintegrowanych łańcuchów przemysłowych, które mają duże znaczenie gospodarcze dla tych krajów.

Udział stałej objętości korka wynosi około 15% całkowitej objętości korka pod względem właściwości zamkniętych komórek. Ponadto stosunek objętości ciał stałych jest mniejszy niż objętość gazu. Kolejnym kluczowym aspektem jest produkcja korka aglomerowanego. Ziarna korka są mieszane z termoutwardzalnymi żywicami poliuretanowymi w celu utworzenia korka aglomerowanego. Ciśnienie, ciepło i spoiwo odgrywają znaczącą rolę w określaniu właściwości materiału. Po zlepieniu się granulek mieszaninę wyciska się i ogrzewa do temperatury między 110°C a 150°C. Ekstremalne zmiany reakcji mechanicznej pod wpływem obciążeń ściskających zachodzą w zależności od rodzaju i ilości kompozytu [4]. Powszechnie wiadomo, że aglomerat został przebadany pod kątem właściwości mechanicznych, termicznych i akustycznych przy produkcji zatyczek korkowych.

Zastosowanie materiału korkowego w innych sektorach stale się rozwija. Aby wykorzystać kompozyty na bazie korka w sektorze lotniczym, należy wziąć pod uwagę szczególne właściwości pod względem ich działania w ekstremalnych temperaturach [8]. Słaba przewodność cieplna i wysoka wytrzymałość korka na ściskanie sprawiają, że jest on idealnym materiałem na izolatory termiczne w raketach, studiach nagraniowych, izolacje akustyczne w łodziach podwodnych, silnikach spalinowych oraz energochłonne płyty podłogowe.

Niniejszy dokument podzielony jest na cztery części. Ogólna charakterystyka kompozytów korkowych została omówiona w drugiej części niniejszego opracowania. Wyjaśniono właściwości mechaniczne i termiczne materiału korkowego. Następnie w trzeciej części wyjaśniono na przykładach aktualne zastosowania kompozytów korkowych w przemyśle lotniczym. Na koniec omówiono potencjalne zastosowania materiałów korkowych w kontekście zastosowań lotniczych. Podsumowanie znajduje się na końcu rozdziału.

## **5.2 Ogólne właściwości kompozytów korkowych**

Kompozyty korkowe uzyskuje się poprzez obróbkę wyrobu korkowego różnymi metodami. Ogólnie rzecz biorąc, są one strukturalnie podobne do kompozytów stosowanych już w inżynierii. Właściwości struktury kompozytu zależą od sposobu łączenia materiału kompozytowego oraz właściwości i koncentracji warstw i materiałów, z których składa się kompozyt. W tym kontekście kompozyty korkowe mają takie właściwości, jak lekkość, izolacja cieplna i akustyczna oraz tłumienie uderzeń, które mają materiały korkowe.

Kompozyty korkowe do zastosowań w różnych sektorach są wytwarzane różnymi metodami w celu uzyskania różnych właściwości fizycznych i mechanicznych. Metody te różnią się w zależności od tego, jak przetwarzany jest materiał korkowy i jak składa się struktura kompozytowa. Materiały kompozytowe można

z grubsza zróżnicować pod względem rodzajów produktów i metod łączenia zgodnie z ogólnym zastosowaniem. Pod względem procesu produkcji korki można było podzielić na szlifowane, łamane i prasowane. Ponadto materiały są nazywane na podstawie metod ich łączenia, takich jak kanapka, wielowarstwowa lub aglutynacyjna.

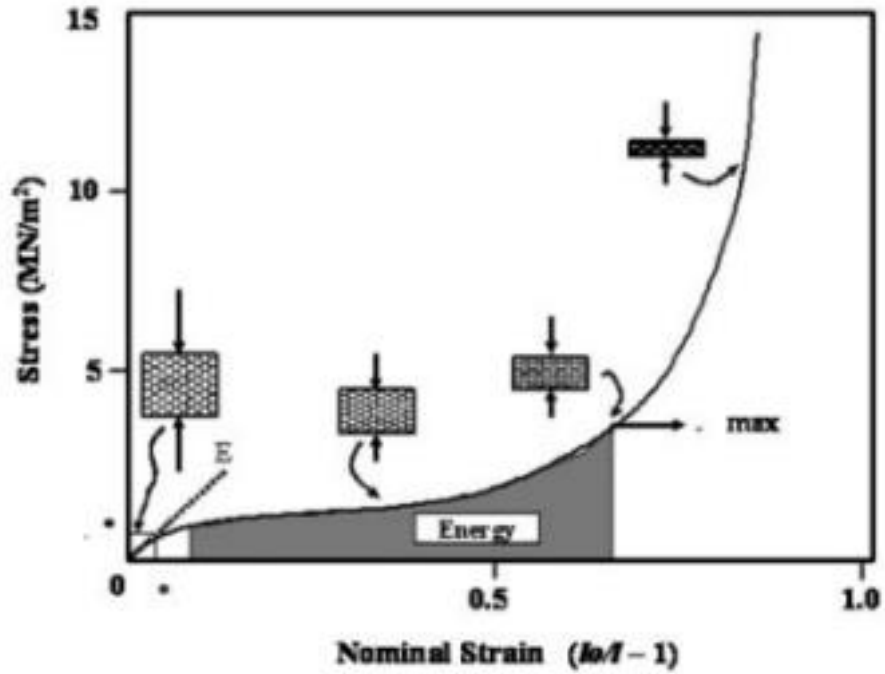
Ponieważ kompozyty korkowe są zbliżone właściwościami fizycznymi i mechanicznymi do korka pod względem ogólnych właściwości, zalety stosowania kompozytów korkowych są bezpośrednio związane z właściwościami materiału korkowego.

Dlatego zalety kompozytów korkowych są oceniane zgodnie z obszarem zastosowania. W tej sekcji zostaną ocenione i zbadane właściwości mechaniczne i termiczne kompozytów korkowych z różnych stron [9].

### ***5.2.1 Właściwości mechaniczne/fizyczne***

Korek posiada niezwykle właściwości, takie jak niska przewodność, ekstremalna ściśliwość, niska gęstość, stosunkowo niska przepuszczalność cieczy i gazów, stabilność chemiczna i trwałość. Ponadto korek jest anizotropowy pod względem orientacji komórek, więc właściwości wykazują różnice między pomiarami wraz z kierunkami promieniowymi (R, zbieżnymi z promieniową osią pryzmatu) i kierunkami niepromieniowymi (NR, płaszczyzna prostopadła). Niemniej jednak współczynniki anizotropii kształtu są niewielkie, a związane z tym właściwości są znacznie mniejsze niż w przypadku innych materiałów. W materiale z korka zaobserwowano kilka właściwości mechanicznych. W Tabeli 5.1 przedstawiono niektóre kluczowe właściwości materiału korkowego.

Krzywa kompresji jest przedstawiona na wykresie w trzech częściach (Rysunek 5.3). Każda część jest połączona z jednym z trzech mechanizmów kontrolujących właściwości elastycznych materiałów komórkowych [10], [11]. Pierwszy obszar, który wykazuje sprężyste wyginanie ścianek komórek, to odkształcenie do 7%. Po drugie, poziome plateau obejmuje około 70% odkształcenia. Wreszcie, w wyniku stopniowego wyboczenia ścian komórkowych, ich zmiażdżenia i całkowitej dekadencji komórek, krzywa zaczyna wspinać się pionowo [10], [11].



Rycina 5.3 Krzywa ściskania kompozytu korkowego [16].

Tabela 5.1 Właściwości mechaniczne korka.

Odniesienie	Właściwości mechaniczne	Wartość
Gibsona i zesp. [10]	Odształcenie pękające pod napięciem,%	5 (R) 9 (NR)
Gibsona i zesp. [10]	Naprężenie pękające pod rozciąganiem, MPa	1,0 (R) 1,1 (NR)
Rosa i Fortes [11]	Odporność na pęknięcie, gotowanie, MPa <sup>m<sup>2</sup>/l</sup>	60-130
Gibsona i zesp. [10], Fortes i Nogueira [12]	Współczynnik Poissona, podczas gotowania	0-0,097 ( <sup>W<sub>max</sub>/R.</sup> ) 0-0,064 ( <sup>W<sub>max</sub>/R</sup> ) 0,26-0,5 ( <sup>W<sub>max</sub>/R</sup> .R)
Rosa i zesp. [13]	Moduł Younga, podczas gotowania, MPa	6 (R) 8-9 (NR)
Rosa i Pereira [14]	Moduł Younga, po obróbce cieplnej w temperaturze 150 °C, MPa	15 (R) 14 (NR)
Rosa i Fortes [11]	Moduł sprężystości przy rozciąganiu, podczas gotowania, MPa	38 (R) 24-26
Gibsona i zesp. [10]	Odształcenie załamania (wyboczenia), %	4 (R) 6 (NR)
Gibsona i zesp. [10], Vaz i Fortes [15]	Naprężenie zawalenia (wyboczenia), podczas gotowania, MPa	0,75-0,8 (R) 0,6-0,7 (NR)

Kiedy występuje wysoki poziom kompresji przy dużych odkształceniach materiału, po zwolnieniu naprężeń następuje zasadniczo powrót do normalnego stanu. Wiadomo, że gęstość wpływa w znaczący sposób na właściwości korka podczas kompresji. Wytrzymałość korka na ściskanie w różnych kierunkach nie jest bardzo wysoka. Jednak wytrzymałość mechaniczna jest większa w kierunku promieniowym [16], [17], [18].

Jak wspomniano wcześniej, schodkowe i przypadkowe rozmieszczenie komórek, a także pofałdowanie występujące w bocznych ścianach komórkowych, wpłynęło na współczynnik Poissona, który może zmieniać zmienne właściwości korka w różnych jego zastosowaniach [12], [18]. Gdy materiał jest kruszony w kierunku promieniowym, pofałdowania zmuszają ściany komórkowe do fałdowania i upakowania, zwiększając amplitudę pofałdowań i wyrównując podstawy komórek w kierunku promieniowym. Kiedy kompresja wyrównuje się w kierunku NR, boczne komórki wyginają się, prostują i odwracają wzór falowania przy dużych odkształceniach, co skutkuje wycofaniem zmian w kierunku R i ujemnym współczynnikiem Poissona przy dużych odkształceniach [12]. Wiadomo, że płyty korkowe mają różne grubości ze względu na środowisko ich wzrostu. Grubość znacząco wpływa na właściwości mechaniczne [19],[20]. Na przykład większe średnice zmniejszają wytrzymałość na ściskanie i moduł w procesie prasowania.

Pęcherzykowa forma komórkowa korka jest podobna do plastra miodu. Dlatego komórki korka składają się z suberyny, celulozy i ligniny. Ze względu na swoją strukturę komórkową materiały na bazie korka charakteryzują się doskonałymi właściwościami mechanicznymi [21]. Pereira i zesp. [22] przeprowadzili eksperymenty i dostarczyli danych o właściwościach mechanicznych naturalnego korka. Wytrzymałość na ściskanie i moduł właściwy naturalnego korka są wyższe niż elastycznych pianek polimerowych i innych sztywnych pianek. Ponadto, gdy połączy się wytrzymałość na ściskanie i niską przewodność cieplną, materiał zamienia się w doskonałe formy. Ten ekologiczny materiał wykazuje doskonałą odporność na fale termiczne i obciążenia ściskające.

Przepuszczalność materiału korkowego dla gazów nieskrapających się, takich jak hel, nie jest wysoka [23], [24]. Korek ma niski współczynnik przenikania ciepła ze względu na dużą ilość powietrza i małe rozmiary komórek. Kilka sposobów zapewnia przenoszenie ciepła przez materiał, takich jak konwekcja gazu, promieniowanie lub przewodzenie przez frakcję stałą. W kompozytach korkowych barierę dla konwencji gazowej tworzą małe i zamknięte komórki, a promieniowanie jest wyczerpywane przez absorpcję w licznych komórkach. W przypadku przenoszenia dźwięku pochłanianie jest wysokie, ponieważ rezystywność akustyczna wynosi  $1.2 \times 10^5 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Tabela 5.2) [1], [16].

Jest to związane z właściwościami powierzchni, chociaż korek jest materiałem hydrofobowym o niskiej zwilżalności w stosunku do cieczy polarnych, takich jak woda. Mianowicie dla cieczy niepolarnych wykazuje duże powinowactwo do energii powierzchniowej  $18 \text{ mN m}^{-1}$  [25].

W ciągu ostatniej dekady naukowcy przeprowadzili kilka projektów w celu określenia właściwości i charakterystyki korka. Istnieje kilka modeli pozwalających zrozumieć właściwości mechaniczne korka w

zakresie technik eksploracji danych i uczenia maszynowego, gdy materiał jest poddawany obciążeniu ściskającemu [26]. Pierwsze i najważniejsze eksperymenty zostały przeprowadzone w ubiegłym stuleciu przez różne badania [27]-[31].

Porównując korek z innymi materiałami, z jednej strony korek naturalny ma gorsze właściwości mechaniczne niż różne materiały rdzeniowe, takie jak pianki syntetyczne. Z drugiej strony, ze względu na pewne specyficzne właściwości i zastosowania, korek może pokonać inne materiały. Porównując wytrzymałość na ściskanie ( $\sigma_c/\rho$ ) i moduł właściwy ( $E/\rho$ ), korek ma lepsze właściwości mechaniczne niż elastyczne pianki polimerowe. Ponadto jego niska przewodność cieplna łączy się z wytrzymałością na ściskanie. W efekcie uzyskuje się składnik ochrony termicznej. Materiał ten mógłby być również odpowiedni dla miejsc z obciążeniami ściskającymi [32]. W Tabeli 2 przedstawiono ogólną charakterystykę korka.

Tabela 5.2 Ogólne właściwości materiałów korkowych.

Odniesienie	Właściwości ogólne	Wartość
Medeiros [33]	Rezystywność akustyczna (kg $m^2$ .s)	$1,2 \times 10^5$
Fortes i Nogueira [12]	Przewodność elektryczna (S/m)	$1,2 \times 10^{-10}$ (25 °C) $1,6 \times 10^{-13}$ (50 °C)
Vaz i Fortes [15]	Współczynnik tarcia (korek/korek), gotowany	0,97 (R) 0,77 (NR)

Castro i zesp. [32] zbadali możliwy sposób wytworzenia nowego kompozytu aglomerowanego korka o różnej wielkości granulek i porównali go z materiałami dostępnymi na rynku. Wyprodukowano trzy różne odmiany korka złożone z różnych rozmiarów granulek i żywicy epoksydowej w celu zwiększenia wytrzymałości. Rozmiary granulek są następujące; granulaty mały (2/3), mieszany (mieszanka granulatu małego i dużego) oraz granulaty duże (3/4). Głównym problemem jest trudność metody pod względem wielkości aglomeracji i stosunku żywicy epoksydowej. Jednak po połączeniu pożądanych składników można osiągnąć idealne rezultaty. W konsekwencji, po kilku próbach, w zależności od liczby granulek, ustalono, że dokładna zawartość żywicy wynosi od 24% do 30%. Proces zaopatrzenia rozpoczyna się od kombinacji granulatu korkowego, a dawki żywicy podano w tabeli 5.3. Następnie różne materiały zostają uformowane i pokryte blachą stalową przed sprasowaniem. Ostatnim etapem jest umieszczenie wytloczki w piecu w stałej temperaturze 80°C na około 2 godziny, a następnie odczekanie, aż stopień utwardzenia osiągnie pożądaną wartość.



Według Castro i zesp. [32] test trzypunktowego zginania wykazał, że wielkość granulek nie wpływa na zginanie czołowe i naprężenia ścinające. Zgodnie z wynikami badań, kompozyty korkowo-epoksydowe wykazują zdecydowanie lepsze naprężenia ścinające w rdzeniu, zmniejszając obszar rozprzestrzeniania się pęknięć. Dzięki tej właściwości aglomeraty korkowe mogą być umieszczane na różnych konstrukcjach warstwowych. Wyniki testów udarności wykazały, że kompozyty korkowe typu sandwich mogą wytrzymać duże obciążenia. Ponadto na zdolność do odzyskiwania kanapek na bazie korka nie ma wpływu wielkość granulek ani metoda wytwarzania. Porównując kompozyty na bazie korka z ultrawydajnymi piankami, kompozyty typu sandwich na bazie modyfikowanych aglomeratów korkowych mają wyższą zdolność absorpcji i niższy próg uszkodzenia.

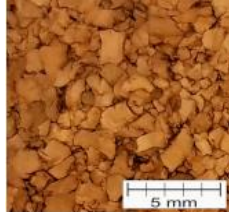
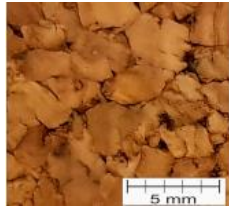
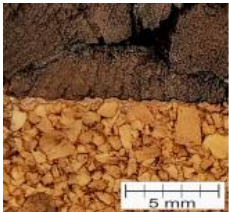
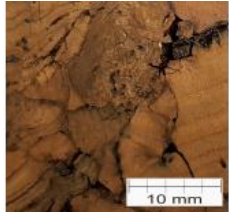
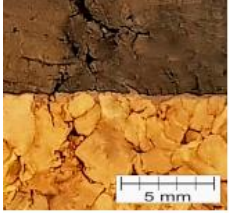
Tabela 5.3 Czynniki przygotowania aglomeratów korkowych.

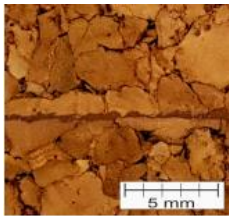
Typ aglomeratu korkowego	Procent żywicy wagowo	Ciśnienie aglomeracji [bar]	Masa granulatu korkowego [g]	Proces utwardzania
Mały (2/3)	24%	50	270	2 godziny (przy 80°C)
Duży (3/4)	24%	60	270	2 godziny (przy 80°C)
Mieszane (mieszane)	30%	15	150	2 godziny (przy 80°C)

### 5.2.1.1 Zmiany właściwości mechanicznych w zależności od temperatury

Kaczynski i zesp. [33] badali zmianę właściwości mechanicznych pod wpływem zmian temperatury. Do zbadania właściwości mechanicznych w różnych warunkach w tych testach użyto kilku kompozytów korkowych (Tabela 5.4). Eksperymentalnie przeanalizowano również zależność materiału od temperatury nastawy, pieca i azotowego złącza chłodzącego. Kawałki korka podgrzano do 100°C, a za pomocą azotu temperaturę obniżono do -30°C. Początkowa prędkość uderzenia wynosiła 9,2 m/s, a do testów zrzutowych użyto Instron Dynatup 9250HV. Badania przeprowadzono na trzech próbkach z każdego rodzaju korka. Średnica impaktora wynosi 50 mm, a masa całkowita to 11,2 kg. Wszystkie próbki miały pole przekroju poprzecznego 50 mm × 50 mm i wysokość 60 mm. Testy upadkowe zostały zarejestrowane za pomocą kamery Phantom V12, która ma szybkość klatek 10 000 fps wynoszącą 40 μs w temperaturach ujemnych i 50 μs w przypadku wysokich temperatur.

Tabela 5.4 Charakterystyka materiałów i wartości energii uderzenia materiałów korkowych w odniesieniu do różnych temperatur [33].

Nazwa korka Wielkość ziarna [mm] Gęstość [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Energia uderzenia [J]	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Sekcja
AC199A 199 0,5–2	100	24	
AC216 216 2-4	100 500	Za 100 J: 24 Za 500 J: -30; -15; 0; 24; 100	
EC159_AC199A nie nie	100	24	
EC159 159 4-10	100 500	Za 100 J: 24 Za 500 J: -30; -15; 0; 24; 100	
EC159_AC216 nie nie	100	24	

EC159_AC216 nie nie	100	24	
---------------------------	-----	----	---

Ponadto Kaczynski i zesp. [33] przeprowadzili badanie, aby zrozumieć interakcję między temperaturą, kompresją i charakterystyką komórek korka. Wszystkie ruchy próbek związane z wpływem kompresji zostały zarejestrowane i przeanalizowane za pomocą szybkiej kamery. Przewidywano, że ściany komórkowe korka wyginają się i potencjalnie zapadają na etapie kompresji. Próbkę kruszono w temperaturach od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $100^{\circ}\text{C}$ . Podczas procesu testowania pęknięcia były widoczne we wszystkich stopniach ściśnięcia z wyjątkiem  $-30^{\circ}\text{C}$ . Zgodnie z wynikami testów odporność korka na zderzenie jest bezpośrednio zależna od temperatury. W konsekwencji stwierdzili, że zwiększenie temperatury z  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $100^{\circ}\text{C}$  zmniejsza pochłanianie energii o mniej niż 25%. Dlatego materiały korkowe w miejscach bezpiecznych czy w sektorze lotniczym muszą być dostosowane do warunków środowiskowych. Właściwości kompozytów korkowych do pochłaniania energii i zmiany temperatury są ze sobą liniowo powiązane, co pozwala producentom zapewnić bezpieczeństwo dzięki odpowiednim obliczeniom danych. Innym ważnym aspektem jest wpływ wielkości ziarna na energię w różnych materiałach korkowych. Wyniki pokazują, że wielkość ziarna ma istotny wpływ na odporność korka na zderzenia. Powodem jest klej poliuretanowy, który jest techniką wiążącą. Zdaniem autorów ilość kleju zmienia się wraz z wielkością ziarna. W miarę wzrostu temperatury do  $100^{\circ}\text{C}$  lepkość korka wzrasta, przez co substancja traci swoje właściwości adhezyjne. Ponadto z tego powodu następuje separacja ziaren na poziomie mikrostruktury. Dlatego, jeśli rozmiar ziarna jest duży, warto zwrócić uwagę na niebezpieczeństwa związane ze wzrostem temperatury. Temperatura jest najbardziej wpływową zmienną, która znacząco wpływa na właściwości mechaniczne korka pod wpływem naprężeń dynamicznych. W rezultacie odkrycia te pokazują, że ocena materiału korkowego w różnych warunkach kompresji i temperatury przed użyciem go w produkcji jest krytycznym krokiem. Jeśli chodzi o zachowanie mechaniczne, istnieje badanie dotyczące wpływu zmiany temperatury na przedziały energetyczne aglomeratu między 120 J a 850 J w temperaturze  $21-50^{\circ}\text{C}$  [31], [34], [35].

### 5.3 Aktualne zastosowania korka w zastosowaniach lotniczych i kosmicznych

Właściwości materiałowe korka oraz fakt, że kompozyty korkowe można wytwarzać pożądanymi metodami, sprawiają, że ta grupa produktów nadaje się do stosowania w lotnictwie, a zwłaszcza w przemyśle lotniczym. Kompozyty korkowe są stosowane przede wszystkim w zastosowaniach, które są narażone na stosunkowo niewielkie obciążenia i gdzie poszukiwane są takie właściwości, jak izolacja cieplna lub wibracyjna, tłumienie uderzeń, lekkość i nieprzepuszczalność. Wykorzystanie materiału korkowego w sektorze

motoryzacyjnym i przemysłowym jest dobrze znane. Wykorzystanie kompozytów korkowych w przemyśle lotniczym zmieniało się na przestrzeni lat i wraz z trwającymi badaniami będzie ewoluować w coraz to nowe obszary. Najbardziej intensywnym zastosowaniem inżynierskim grupy materiałów z korka jest powlekanie korpusów i różnych części statków kosmicznych w celach termoizolacyjnych. Wiele projektów zostało wykonanych i jest realizowanych w celu wykorzystania materiałów korkowych w nadwoziach samolotów i innych obszarach lotnictwa. Dla przykładu ochronne osłony termiczne niektórych pocisków i promów kosmicznych są wykonane z korka. Ponadto ze względu na właściwości ognioodporne korka stosuje się go w okrętach wojennych oraz jako okładziny wewnętrzne okrętów podwodnych [36].

Komponenty systemów lotniczych są zwykle projektowane z myślą o niskiej wadze, wysokiej wytrzymałości i zwiększonej odporności na uszkodzenia. Osiągnięcie tych cech jest możliwe dzięki odpowiedniemu doborowi materiałów. Ostatnie postępy sprawiły, że materiały typu sandwich znalazły się na szczycie listy materiałów kandydujących do zastosowań lotniczych. Ponadto, elementy warstwowe, takie jak elementy zginane, ściskane i uderzane, mają większą sztywność i lepiej sprawdzają się w określonych warunkach obciążenia. Kompozyty wzmacniane włóknami na bazie polimerów są powszechnie stosowanymi materiałami do produkcji elementów typu sandwich i są one łączone z różnymi rodzajami materiałów rdzeniowych o niskiej gęstości, zazwyczaj z drewnem balsa, plastrami miodu i piankami polimerowymi. Zgodnie z oczekiwaniami, materiały rdzenia są wybierane przede wszystkim ze względu na ich niską gęstość, wysoki moduł sprężystości, maszyną wytrzymałość prostopadłą do powierzchni oraz dobrą izolacyjność termiczną i akustyczną. W tym przypadku, jako materiał naturalny, korek spełnia te wymagania ze względu na swoją wewnętrzną morfologię komórkową, co sugeruje, że aglomeraty na bazie korka można uznać za alternatywną opcję materiałową. Oczywiście wytrzymałość komórek korka jest porównywalna z niektórymi piankami syntetycznymi, a wytrzymałość właściwa korka jest znacznie wyższa. Ponadto ma niską przewodność cieplną, a także rozsądną wytrzymałość na ściskanie, co czyni go doskonałym wyborem do izolacji termicznej i do zastosowań z obciążeniami ściskającymi. Ponadto korek był od dawna stosowany w elementach poddawanych obciążeniom dynamicznym, ponieważ jego wyjątkowe właściwości tłumiące sprawiają, że idealnie nadaje się do tłumienia drgań. Podsumowując, ze względu na wiele właściwości, materiały korkowe typu sandwich są bardzo wygodne do stosowania w produkcji w sektorach lotniczym i kosmicznym. [8].

Materiał na bazie korka jest odpowiednim materiałem typu „sandwich” i rdzeniem dla lekkich konstrukcji. Materiał ten jest wykorzystywany w zastosowaniach lotniczych [37]. Porównując kompozyty typu sandwich z piankami o wysokiej wydajności, kompozyty z pewnością mają większą zdolność pochłaniania energii i lepszą odporność na zderzenia podczas obciążenia. Ponadto aglomeraty korkowe wykazują lepsze właściwości termiczne, co jest istotnym sposobem projektowania konstrukcji.

Wykorzystanie materiału korkowego w sektorze motoryzacyjnym i przemysłowym jest dobrze znane. Również przemysł lotniczy i wojskowy są jego znaczącymi użytkownikami. Na przykład ochronne osłony termiczne niektórych rakiet i promów kosmicznych są wykonane z korka. Ponadto ze względu na

właściwości ognioodporne korka stosuje się go w okrętach wojennych oraz jako okładziny wewnętrzne okrętów podwodnych [36].

Na pierwszy rzut oka, w porównaniu z alternatywnymi materiałami rdzenia, takimi jak pianki syntetyczne, można wykazać, że naturalny korek ma słabe właściwości mechaniczne. Jednak jego przewodność cieplna i wytrzymałość na ściskanie sprawiają, że jest to idealny materiał do zatrzymywania ciepła. Kompozytowe płyty warstwowe zyskały na znaczeniu w projektowaniu lotniczym ze względu na ich odporność na wyboczenie, podobnie jak blachy ze stopu aluminium.

Patent na ścianę warstwową autorstwa von Karmana i Stocka z 1924 r. Jest doskonałym przykładem zastosowania konstrukcji warstwowej w konstrukcjach lotniczych. W 1934 roku w fabryce Schneider-Creusot w Le Creusot we Francji firma SE Mautner po raz pierwszy zastosowała konstrukcję warstwową w istniejącym samolocie. W 1938 roku ten sam inżynier stworzył tani samolot jednoskrzydłowy ze skrzydłem typu sandwich o strukturze warstwowo-korkowej. Kompozyty korkowe były szeroko stosowane w przemyśle kosmicznym, ponieważ redukcja masy odgrywa jeszcze ważniejszą rolę w kontekście kosmicznym, co przynosi znaczne oszczędności kosztów. Ponadto materiały ablacyjne są jednym z najczęstszych zastosowań aglomeratów korkowych. Materiał, który powoduje ablację, rozprasza energię poprzez odparowanie zamiast absorpcji ciepła. Dzięki temu chroni konstrukcje przed źródłami wysokiej energii cieplnej.

Kompozyty wielowarstwowe w różnych konstrukcjach są wykorzystywane do budowy materiałów składowych, takich jak arkusze wierzchnie, rdzenie i kleje, w scenariuszach obciążeń quasi-statycznych i dynamicznych. Gdy rozważa się priorytetowe zastosowanie kompozytów warstwowych, ich podatność na uszkodzenia ciałami obcymi ma pierwszeństwo. W kilku przypadkach zaobserwowano zachowanie się konstrukcyjnych przekrojów warstwowych pod obciążeniem udarowym. Lokalne interakcje z drobnymi, ale potencjalnie ciężkimi przedmiotami, takimi jak upuszczone narzędzia, uderzenia ptaków, kamienie lub lód, mogą powodować uszkodzenia samolotów lub samolotów podczas załadunku i rozładunku towarów. Ponadto poziome powierzchnie, takie jak podłogi samolotów, mogą łatwo ulec uszkodzeniu [38], [39].

Istnieją dwa rodzaje aglomeratów korkowych: korki izolacyjne i korki kompozytowe. Ten pierwszy jest produkowany bez żadnych dodatkowych narzędzi i materiałów wiążących; dlatego nie można go nazwać materiałem kompozytowym. Ten ostatni jest wykonany z granulek, które zostały połączone z różnymi spoiwami syntetycznymi lub naturalnymi, takimi jak uretan, żywice fenolowe itp.

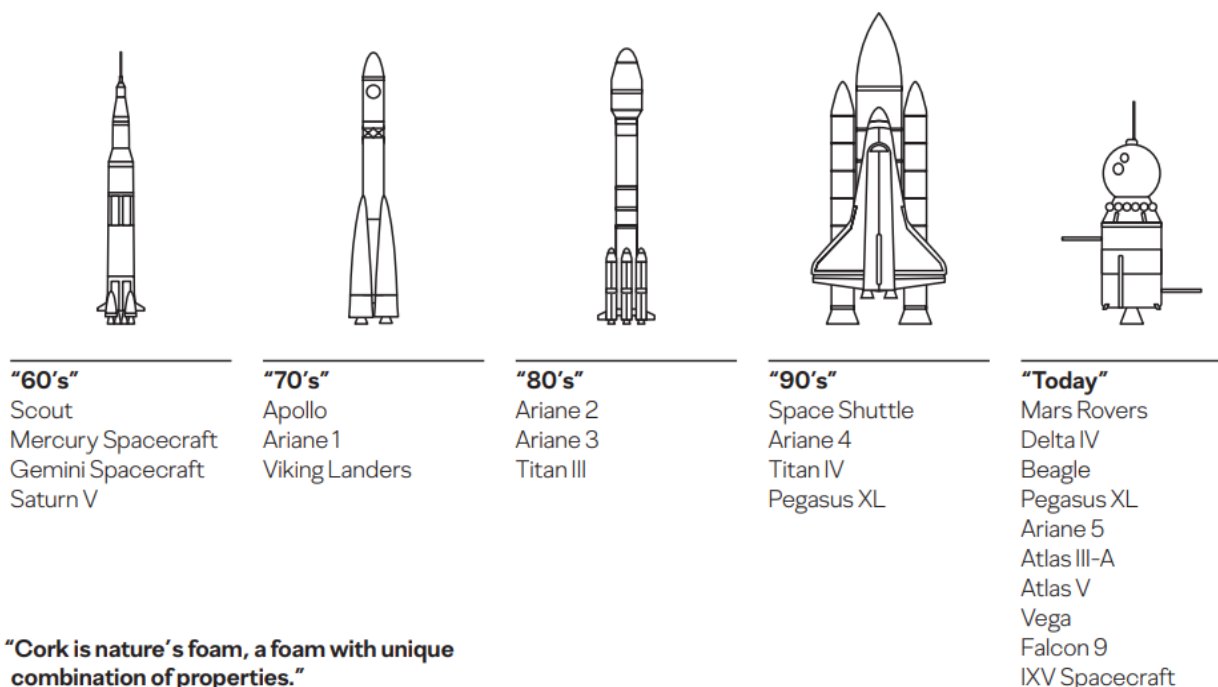
Prowadząc krótkie badanie wykorzystania kompozytów korkowych w sektorze lotniczym, firma Amorim Cork Composites (ACC) oferuje kilka produktów. Firma wyprodukowała dwa kompozyty korkowe (P45 i P50), które mogą być stosowane jako tarcze ochronne w różnych branżach. Różne charakterystyki tych typów przedstawiono w tabeli 5.5.

### 5.3.1 Komponenty strukturalne z korkiem w zastosowaniach kosmicznych

Sektor lotniczy najszerzej wykorzystuje materiały korkowe i kompozyty w korpusach i komponentach statków kosmicznych (rysunek 5.4). Materiały z korka były szeroko stosowane w statkach kosmicznych od wczesnych dni eksploracji kosmosu. Kompozyty korkowe są stosowane w wysokotemperaturowych układach napędowych statków kosmicznych, a także w takich elementach, jak zbiorniki paliwa, które wymagają izolacji termicznej. Oprócz zapewnienia izolacji termicznej, korek służy również jako warstwa ochronna na wypadek nagłej zmiany temperatury, ponieważ jest tańszy niż materiały high-tech. Ponieważ korek pali się bez płomienia lub zapłonu, będzie pierwszą warstwą, która pali się w wysokich temperaturach, chroniąc główny korpus i części statku kosmicznego przed ogniem.

Tabela 5.5 Niektóre właściwości kompozytów korkowych P45 i P50.

Właściwości	P45	P50	Jednostki
Wydłużenie	>30	>13	(%)
Ciepło właściwe	2.5	2.1	( $\frac{KJ \cdot K}{Kg}$ )
Wytrzymałość na rozciąganie	>0,86	>1,70	(MPa)
Wielkość cząstek korka	1/2	0,5/1	(mm)
Wymiar arkusza	1270x760	1270x760	(mm)
Przewodność cieplna	0,06	0,07	( $\frac{W}{m \cdot K}$ )
Gęstość przy 20	300-350	448-512	( $\frac{kg}{m^3}$ )



**"Cork is nature's foam, a foam with unique combination of properties."**

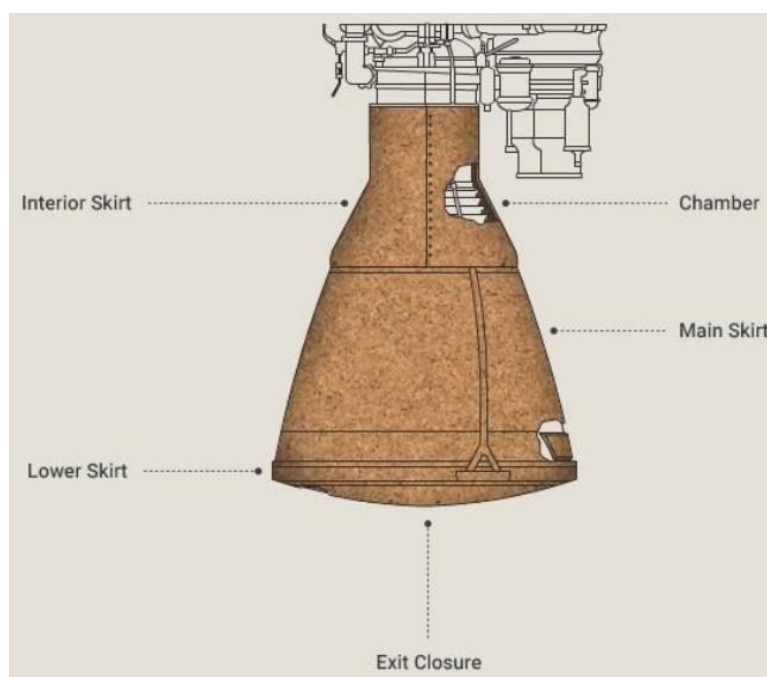
in NASA Technical Reports Server

Rysunek 5.4 Statek kosmiczny wykorzystujący materiały korkowe i kompozyty korkowe [40].

Kilka kluczowych cech stawia te kompozyty przed innymi w porównaniu z innymi odmianami. Po pierwsze, kompozyty korkowe są bardziej przyjazne dla procesu niż inne. Kompozyty na bazie korka można łatwo przymocować do większości materiałów podłoża przy użyciu standardowych technik klejenia. Przycinanie i obróbkę skrawaniem można przeprowadzić za pomocą wspólnych urządzeń i maszyn bez specjalnego wyposażenia ochronnego. „Kanapki” można łatwo włączyć; nie są wymagane żadne skomplikowane procesy dopasowania. Co więcej, materiały te sprawdziły się już jako przymiotnikowe osłony termiczne w zastosowaniach raketowych i wewnętrzną izolacją termiczną w ogrzewanych konstrukcjach podczas kilku misji. Na rycinie 5.5 demonstracja dotyczy ostrołukowej skorupy rakiety Vulcan, opracowanej przez United Launch Alliance.



Rysunek 5.5 Powłoka owiewki z ablacyjnym rozwiązaniem termicznym Amorim P50 [41].



Rysunek 5.6 Typowe zastosowanie kompozytów korkowych w raketach [42].

Warstwa korka pokrywa zewnętrzną powłokę cylindrycznej skorupy. Korek, przymocowany do zewnętrznej powłoki kompozytowej warstwy owiewki, chroni ją przed ciepłem wytwarzanym przez tarcie aerodynamiczne na zewnętrznej stronie osłony. Ponadto od lat 70. XX wieku kompozyty korkowe są stosowane w systemach ochrony termicznej sektorów lotniczych. Rysunek 5.6 pokazuje, w jaki sposób kompozyty korkowe są powszechnie stosowane jako pochłaniacze ciepła w kosmosie. Ponadto kompozyty korkowe można łatwo formować.



Oprócz lotów orbitalnych i pojazdów powrotnych, lotnicze systemy ochrony termicznej (TPS) również stanowią integralną część podstawowej struktury rakiet sondujących. W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat Mobile Rocket Base (MORABA) Niemieckiego Centrum Lotnictwa i Kosmonautyki (DLR) stosowała dwuskładnikowe powłoki termoutwardzalne na bazie żywic epoksydowych, aby zapewnić ochronę termiczną szerokiej gamy konstrukcji rakiet nośnych, w tym płetw, stożków dziobowych, adaptery stożkowe i osłony termiczne. Jest stosunkowo prosty w produkcji i może być natryskiwany na prawie każdą geometrię. Kluczowymi czynnikami wpływającymi na opracowanie nowego systemu ochrony termicznej przy użyciu specjalnych materiałów korkowych są jego szkodliwe opary, ograniczony okres przydatności do spożycia, duże wymagania dotyczące przechowywania oraz pozostałości, które pozostawia w pobliżu elementów ładunku. Podstawowa struktura rakiety sondującej - w tym płetwa, stożek nosowy, adapter stożkowy i zespół osłony termicznej - ma na celu ochronę rakiety przed promieniowaniem cieplnym. Widać to wyraźnie na rysunku 5.7. Materiałem systemu ochrony termicznej była ablacyjna, epoksydowa, dwuskładnikowa powłoka termoutwardzalna Mobilnej Bazy Raketowej (MORABA) Niemieckiego Centrum Lotnictwa i Kosmonautyki (DLR). sąsiednie elementy ładunku podczas ablacji przyczyniły się do wzrostu zapotrzebowania na nowy system ochrony termicznej.



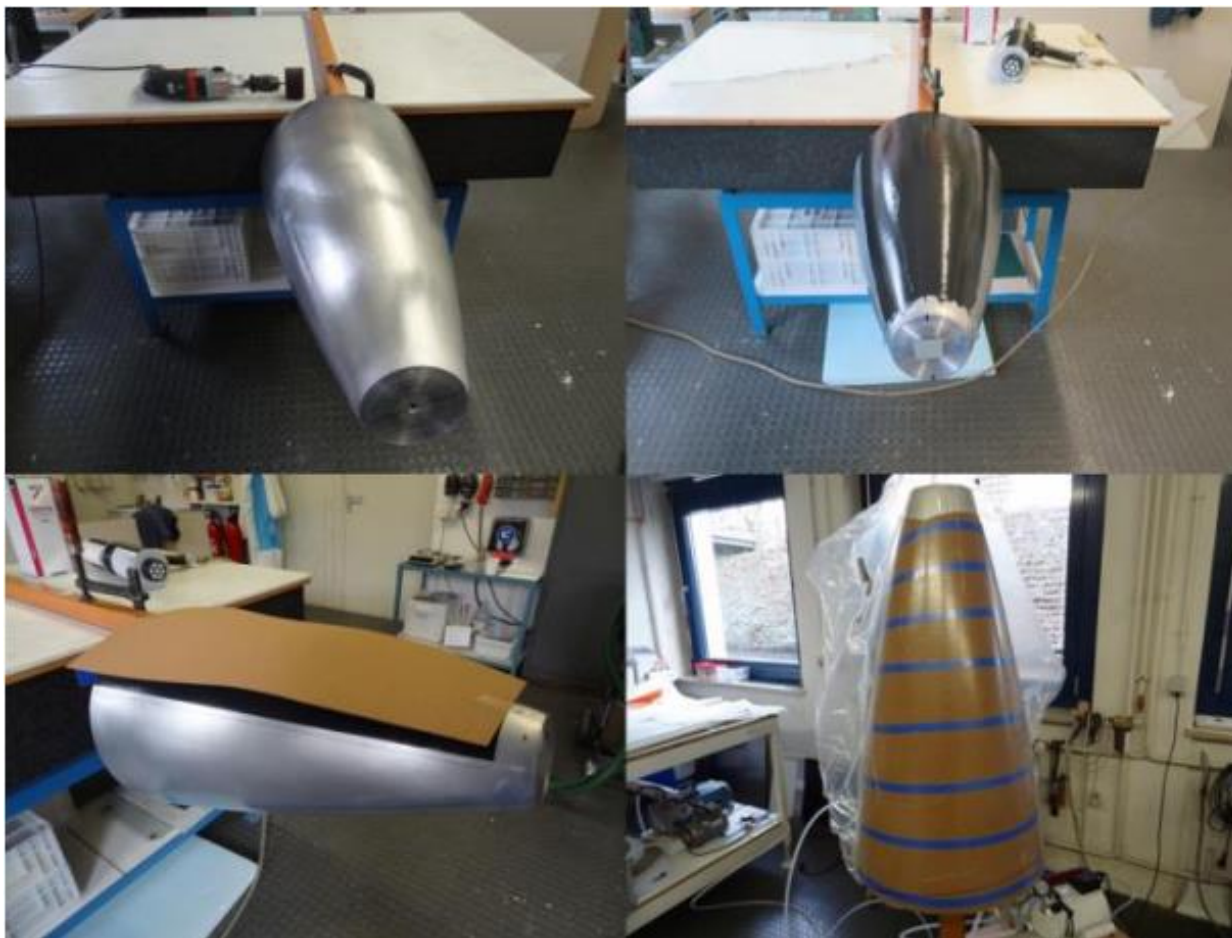
Rysunek 5.7 Udoskonalony pojazd Malemute (IM) z korkowym TPS na płetwie [43].

Jeśli chodzi o wybór materiału TPS, istnieją pewne preferencje, takie jak niska waga, formowalność, przyjazność dla środowiska, niskie koszty, niskie opłaty konserwacyjne i brak ograniczeń eksportowych. Dlatego infiltrowany korek został wybrany jako najbardziej użyteczny materiał TPS zgodnie z tymi

wymaganiami. W innych częściach naszych badań wyjaśnimy, czym jest NORCOAT LIEGE.

Niniejszym NORCOAT LIEGE jest głównym preferowanym produktem na rynku UE jako półprodukt. Proces produkcji elementów TPS z materiałów korkowych składa się z kilku zasadniczych etapów: przygotowania powierzchni, wykonania wiązania strukturalnego, aplikacji pokrycia TPS, pakowania próżniowego i utwardzania. Na rysunku 5.8 pokazano proces przygotowania struktury VSB-30 FNC przy użyciu NORCOAT LIEGE.

Po pomyślnym opracowaniu procesu produkcyjnego nadbudowy VSB-30 FNC zastosowano go w dodatkowych konstrukcjach związanych z TPS, takich jak zespoły osłon termicznych, adaptory silnika i płetwy (rysunek 5.9).



Rysunek 5.8 Struktura VSB-30 FNC z NORCOAT LIEGE [43].



Rysunek 5.9 Implementacja NORCOAT LIEGE do różnych części konstrukcji raketowych [43].

### **5.3.2 Projekty dotyczące wykorzystania korka w konstrukcjach lotniczych: projekt Aerocork**

Od początku XXI wieku przemysł winiarski ma tendencję do używania plastikowych i metalowych korków wraz z rozwojem technologicznym. Dlatego wykorzystanie materiałów korkowych stopniowo spada. Z tego powodu producenci korka rozpoczęli badania i opracowania, aby materiały i produkty z korka mogły być stosowane w alternatywnych obszarach. W 2008 roku Dyn'Aero Industrie (DAI), portugalski producent lekkich samolotów, zwrócił się do przemysłu i środowisk akademickich o pomoc w zastąpieniu komponentów ropopochodnych kompozytami korkowymi w swoich modelach samolotów. W rezultacie nawiązano współpracę, a pod koniec 2008 r. zatwierdzono grant badawczo-rozwojowy firmy QREN, który przyznano konsorcjum. Projekt ma na celu wycofanie jak największej liczby komponentów wykonanych z substancji ropopochodnych. Materiały i kule na bazie PCW to przykłady komponentów dostarczanych z olejem. Wyeliminowanie tych materiałów spowodowałoby znaczne oszczędności kosztów w całym procesie produkcyjnym. Ropopochodne komponenty mogą stać się droższe, ponieważ ceny ropy rosną wraz ze światowym popytem.

W samolotach DAI były dwa rodzaje materiałów, rdzeń PVC (kanapka) i kula (mikro kanapka). Materiały te pochodzą z ropy naftowej, a ich topologie to karbonowe arkusze wierzchnie. Firma ACC oświadczyła, że zastąpienie tych materiałów kanapkami na bazie korka jest możliwe, dlatego zainicjowała eksperymenty mające na celu osiągnięcie zrównoważonego rozwoju.

Podczas badań spodziewano się, że materiały i kompozyty korkowe zostaną użyte do stworzenia sekcji samolotu poddanych stosunkowo niewielkim obciążeniom i uznanych za dopuszczalne dla wyładowań atmosferycznych. Przetestowano takie jednostki, jak fotel pilota, krawędzie natarcia skrzydeł i struktury żeber. Części produkowane w ramach Projektu AEROCORK przedstawiono na poniższych rysunkach (Rys. 5.10-5.11).



Rysunek 5.10 Korkowy materiał kompozytowy AEROCORK [44].



Rysunek 5.11 Samolot MCR UL firmy Dyn'Aero [44].

#### **5.4 Potencjalne zastosowania kompozytów korkowych w konstrukcjach lotniczych/kosmicznych**

Proszek korkowy, kompozyty i inne produkty pochodne mogą być wykorzystywane w różnych formach do ochrony, odporności termicznej i przeciwdziałania uderzeniom w przemyśle lotniczym. W tej sekcji przeanalizowanych zostanie kilka możliwych zastosowań materiału korkowego.

##### ***5.4.1 Korek i kompozyt na osnowie ceramicznej w zastosowaniach lotniczych/kosmicznych***

Po pierwsze, połączenie korka i materiałów na osnowie ceramicznej jest jednym z wiodących tematów badawczych. Korek jest preferowany w zastosowaniach dzięki swojej nieliniowej elastyczności, wytrzymałości na złamanie i wyjątkowej zdolności do odzyskiwania wymiarów. Obecnie prowadzi się kilka badań związanych struktur warstwowymi powstałymi z kompozytu na osnowie ceramicznej C/C-SiC oraz materiału ablacyjnego na bazie korka. Powszechnie wiadomo, że klejenie jest najczęściej stosowaną metodą łączenia dwóch różnych rodzajów materiałów. Aby wytrzymać naprężenia cykliczne, naprężenia ścinające i odporność na zmęczenie, klejenie wykazuje dłuższą żywotność, trwałość i komfort niż mechaniczne techniki łączenia [45]. Materiał ablacyjny dla tej kombinacji jest wykorzystywany w programach

ponownego wejścia podczas procesu startu. NORCOAT LIEGE został zastosowany w 2003 roku na sondzie Beagle 2, która weszła w atmosferę Marsa, aw 1998 roku Atmospheric Re Entry Demonstrator ponownie wszedł na Ziemię [46]. To materiał z korka ablatorowego, który został przetestowany w kosmosie. Ponadto C/C-SiC został udoskonalony przez Niemieckie Centrum Lotnictwa i Kosmonautyki (DLR). Aby otrzymać SiC w tej matrycy, musimy wziąć produkt z reakcji resztkowego węgla i ciekłego krzemu. Jeśli chodzi o zapewnienie połączenia adhezyjnego C/C-SiC z NORCOAT LIEGE, można zastosować trzy komercyjne kleje nieorganiczne, aby zapewnić odporność do temperatury 1650°C. Kryteria wyboru tego kleju opierają się na wymaganiach temperaturowych klejonych powierzchni. Innymi słowy, ten ceramiczny materiał matrycowy z korka może być wykorzystany w przyszłych zastosowaniach lotniczych, aby zapewnić odporność na ciepło i pochłanianie uderzeń. Przed powszechnym zastosowaniem przemysłowym można przeprowadzić kilka rodzajów testów w celu sprawdzenia możliwości dostosowania warunków.

Innymi słowy, ten ceramiczny materiał matrycowy z korka może być wykorzystany w przyszłych zastosowaniach lotniczych, aby zapewnić odporność na ciepło i pochłanianie uderzeń. Przed powszechnym zastosowaniem przemysłowym można przeprowadzić kilka rodzajów testów w celu sprawdzenia możliwości dostosowania warunków. Schematyczną konfigurację kompozytów z korka i osnowy ceramicznej przedstawiono na rysunku 5.12.



Rysunek 5.12. Schematyczna konfiguracja kompozytów korka i osnowy ceramicznej [47].

#### **5.4.2 Izolacje kosmicznego systemu startowego**

Space Launch System, nowa rakieta NASA o dużym udźwigu, stoi w obliczu ogromnych zmian temperatury podczas podróży kosmicznych, od -423 stopni Fahrenheita do ponad 200 stopni Fahrenheita. Według NASA nowe modele zostały zaprojektowane przez naukowców dysponujących najnowocześniejszą technologią zapewniającą ochronę termiczną. Części tych nowych modeli składały się z materiałów przyjaznych dla środowiska, takich jak korki i mniejsze części wykonane przez drukarkę 3D. Części te można połączyć w statek kosmiczny ORION NASA, który musi być solidny do transportu astronautów na Księżyc i Marsa. Izolacja piankowa w sprayu i inne klasyczne materiały izolacyjne, takie jak korki, zapewnią ochronę termiczną wszystkim elementom rakiety. Space Launch System przyspiesza od 0 do 17 400 mil na godzinę

i leci na wysokość ponad 100 mil nad Ziemią w mniej niż 8 minut, a izolacja jest wystarczająco elastyczna, aby poruszać się wraz z rakieta, a jednocześnie wystarczająco twarda, aby wytrzymać naprężenia aerodynamiczne. Paliwo kriogeniczne napędzające rakieta składa się z ciekłego wodoru, a ciekły tlen musi pozostać bardzo zimny, aby pozostać w stanie ciekłym. Temperatura wodoru musi wynosić minus 423 stopnie Fahrenheita, podczas gdy temperatura tlenu musi wynosić minus 298 stopni Fahrenheita. Paliwo staje się gazem, jeśli temperatura za bardzo wzrośnie [48].

Lider zespołu systemu ochrony termicznej dla głównego etapu Space Launch System NASA, Michael Alldredge, opisał, że „Gdy Space Launch System leci, gromadzi ogromne ciepło. Bez izolacji ciepło z wystrzelenia wpłynęłoby na stabilność kriogeniczne paliwo, a integralność strukturalna rakiety zostałaby naruszona. NASA prosi ten wyjątkowy materiał piankowy, aby wykonał niesamowitą pracę ochrony krytycznych systemów raketowych, które różnią się od dużych struktur po elektronikę i przewody paliwowe, w bezlitosnym środowisku startowym z ekstremalnymi temperaturami i naciski”.

NASA zdecydowała się użyć pianki zamiast korka do tego pokrycia. Ponieważ piankę łatwiej nakładać ręcznie i łatwiej ją znaleźć wszędzie, do pozycjonowania awioniki wykorzystano formy wydrukowane w 3D. Chociaż korek jest gęstszy niż pianka, zapewnia większą trwałość podczas kilku zastosowań. Arkusze korka można zastosować w sekcji rdzenia silnika (rysunek 5.13).



Rysunek 5.13 Natryskiwana piankowa izolacja termiczna adaptera stopnia pojazdu startowego [48].

### 5.4.3 Korek w misji na Marsa

Korek połączono z innowacyjną inżynierią, aby stworzyć nową kapsułę powrotną na Ziemię dla Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) do przenoszenia próbek z Marsa na Ziemię. Konsorcjum utworzone przez Critical Materials, ISQ, PIEP i Amorim Cork Composites stworzyło kapsułę dla NASA. Wyzwaniem była koncepcja kapsuły powrotnej dla Ziemi, o optymalnych właściwościach termomechanicznych, aby zapewnić pasywne ponowne wejście w ziemską atmosferę. Nie będzie spadochronu ani innego pomocniczego systemu tłumienia uderzenia, gdy pojemnik z próbkami gleby z Marsa zetknie się z powierzchnią ziemi.

Powłoki stosowane do ochrony kapsuł przenoszonych w kosmos to kolejne krytyczne zastosowanie materiałów korkowych. Kiedy kapsuły kosmiczne wejdą w atmosferę planety, wylądują; i szybko nagrzać. Temperatury mogą sięgać 1600°C, szczególnie na powierzchni kapsuły. Materiały, które mogą wytrzymać wysokie temperatury, takie jak metal lub ceramika, będą znacznie cięższe niż korek. Ponadto materiały te nie wykazują wymaganej zdolności przewodzenia ciepła. Materiały z korka są odpowiednie do rozpraszania wysokich temperatur na powierzchni i zapobiegania przedostawaniu się ciepła do ciała.

Zastosowano tu unikalne rozwiązanie integracji różnych materiałów w projekcie i budowie kapsuły, wraz ze zdefiniowaną konfiguracją geometryczną, spełniając wszystkie specyfikacje ESA dotyczące jej programu eksploracji Marsa. Rozwiązanie oferuje wielofunkcyjny system, który jest w stanie wytrzymać wysokie obciążenia termiczne i dynamiczne związane z ponownym wejściem w atmosferę ziemską, spełniając jednocześnie wszystkie z góry określone wymagania. Poza zmniejszeniem masy w stosunku do początkowych warunków Europejskiej Agencji Kosmicznej, to nowe rozwiązanie eliminuje systemy pomocnicze i obniża koszty produkcji. Oczekuje się, że kapsuła powrotna przybędzie na Ziemię w 2026 roku, aby przetransportować próbki. Lądownik Marsa pokryty kompozytem korkowym pokazano na rysunku 5.14 [49].



Rysunek 5.14 Lądownik Mars pokryty kompozytem korkowym [49].

## 5.5 Wnioski

W niniejszym opracowaniu dokonano przeglądu właściwości mechanicznych i termicznych kompozytów korkowych oraz ich istniejących i potencjalne zastosowania w lotnictwie, wojsku i innych dziedzinach. Badania wykazały, że kompozyty korkowe były używane w promach kosmicznych i raketach jako izolatory cieplne ich skorup. Ponadto w tym rozdziale omówiono rozróżnienie materiałów piankowych, różnych form kompozytów oraz kompozytów korkowych. Chociaż „kanapki” korkowe są traktowane priorytetowo w zastosowaniach lotniczych, odkrycia mogą mieć znaczenie w przemyśle samochodowym. Brak informacji na temat potencjalnych zastosowań tego materiału w lotnictwie oraz wiedzy na temat obecnego wykorzystania korka jako izolatora termicznego wynika prawdopodobnie z polityki prywatności. Pomimo swoich ograniczeń, badanie przyczynia się do naszego zrozumienia korzystnych dla środowiska i zrównoważonych właściwości korka w produkcji lotniczej. Jeżeli w dalszych badaniach można by zbadać utwardzenie tej strony poprzez zmieszanie aglomeratów korkowych z dodatkowymi materiałami i produkcję kompozytów, należało by opracować lepsze doświadczenie w zakresie absorpcji siły. Te fragmenty wiedzy mogą być wykorzystane do opracowania ukierunkowanych interwencji mających na celu odnawialność w przemyśle i ustanowienie ekologicznego sposobu myślenia wśród producentów dzięki kompozytom korkowym dla lepszej przyszłości.

## Bibliografia

- [1] Pereira, H. (2007). *Cork: Biology, Production and Uses*. Elsevier.
- [2] Hooke, R. (1665). *Micrographia, or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses with Observations and Inquiries Thereupon*. London: Printed by J. Martyn and J. Allestry.
- [3] Jardim, R.T., Fernandes, F.A.O., Pereira, A.B., Alves de Sousa, R.J. (2015). Static and dynamic mechanical response of different cork agglomerates. *Materials & Design*, 68:121–126.
- [4] Santos, P.T., Pinto, S., Marques, P.A.A.P., Pereira, A.B., Alves de Sousa, R.J. (2017). Agglomerated cork: a way to tailor its mechanical properties. *Composites Structures*, 178:277–287.
- [5] Costas, M., Díaz, J., Romera, L.E., Hernández, S. (2013). Static and dynamic axial crushing analysis of car frontal impact hybrid absorbers. *International Journal of Impact Engineering*, 62:166–81.
- [6] Tay, Y.Y., Lim, C.S., Lankarani, H.M. (2014). A finite element analysis of high-energy absorption cellular materials in enhancing passive safety of road vehicles in side-impact accidents. *International Journal of Crashworthiness*, 19:288–300.
- [7] Sanchez-Saez, S., Barbero, E., Cirne, J. (2011). Experimental study of agglomerated-cork-cored structures subjected to ballistic impacts. *Materials Letters*, 65:2152–4.



- [8] Silva, J.M., Devezas, T.C., Silva, A., Gil, L., Nunes, C., Franco, N. (2010). Exploring the use of cork based composites for aerospace applications. *Materials Science Forum*, 636:260-265.
- [9] Put a Cork in It. Available: <https://www.labmanager.com/news/put-a-cork-in-it-material-now-shows-promise-in-new-applications-includng-aircraft-and-energy-16773/>
- [10] Gibson, L. J., Easterling, K. E., Ashby, M. F. (1981). The structure and mechanics of cork. *Proceedings of the Royal Society of London*, A377, 99–117.
- [11] Rosa, M. E and Fortes, M. A. J. (1991). Deformation and fracture of cork in tension. *Materials Sciences*, 26:341–348.
- [12] Fortes, M. A., Nogueira, M.T. (1989). The Poisson effect in cork. *Materials Sciences and Engineering*, A122, 227–232.
- [13] Rosa, M. E., Pereira, H., Fortes, M. A. (1990). Effects of hot water treatment on the structure and properties of cork. *Wood and Fiber Sciences*, 22: 149 – 164.
- [14] Rosa, M.E., Pereira, H. (1994). The effect of long term treatments at 100 – 150 °C on structure, chemical composition and compression behaviour of cork. *Holzforschung*, 48:226-232.
- [15] Vaz, M. F., Fortes, M. A. (1998). Friction properties of cork. *Journal of Materials Science*, 33: 2087-2093.
- [16] Silva, S.P., Sabino, M.A., Fernandes, E.M., Correlo, V.M., Boesel, L.F., Reis, R.L. (2005). Cork: properties, capabilities, and applications. *International Materials Reviews*, 50(6):345–365.
- [17] Mano, J.F. (2002). The viscoelastic properties of cork. *Journal of Materials Science*, 37(2):257–263.
- [18] Anjos, O., Rodrigues, C., Morais, J., Pereira, H. (2014). Effect of density on the compression behavior of cork. *Materials & Design*, 53:1089–1096.
- [19] Pereira, H., Graca, J., Baptista, C. (1992). The Effect of Growth Rate on the Structure and Compressive Properties of Cork. *IAWA Bulletin*, 13(4):389–396.
- [20] Pereira, H. (1998). The caliber and porosity as parameters of the technological quality of cork in plank. *Revista Florestal*, 2(XI), 46–50.
- [21] Gibson, L.J. (2005). Biomechanics of cellular solids. *Journal of Biomechanics*, 38:377-99.
- [22] Pereira, S.C., Soares, G.A.M., Oliviera, A.C., Rosa, M.E. (2006). Effect of fungal colonization on mechanical performance of cork. *International Biodeterioration and Biodegradation* 57(4): 244-250.
- [23] Faria, D.P., Fonseca, A.L., Pereira, H., Teodoro O.M.N.D. (2011). Permeability of cork to gases. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 59(8):3590–3597.
- [24] Lequin, S., Chassagne, D., Karbowski, T., Simon, J.M., Paulin, C., Bellat, J.P. (2012). Diffusion of

oxygen in cork. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 60(13):3348–3356.

[25] Abenojar, J., Barbosa, A.Q., Ballesteros, Y., Martinez, M.A. (2014). Effect of surface treatments on natural cork: surface energy, adhesion, and acoustic insulation. *Wood Science and Technology*, 48:207–224.

[26] Garcia, A., Anjos, A., Iglesias, C., Pereira, H., Martínez, J., Taboada, J. (2015). Prediction of mechanical strength of cork under compression using machine learning techniques. *Materials & Design*, 82:304–11.

[27] Gameiro, C.P., Cirne, J. (2007). Dynamic axial crushing of short to long circular aluminum tubes with agglomerate cork filler. *International Journal of Mechanical Sciences*, 49:1029–37.

[28] Paulino, M., Teixeira-Dias, F. (2011). An energy absorption performance index for cellular materials – development of a side-impact cork padding. *International Journal of Crashworthiness*, 16:135–53.

[29] Fernandes, F.A.O., Tavares, J.P., Alves de Sousa, R.J., Pereira, A.B., Esteves, J.L. (2014). Manufacturing and testing composites based on natural materials. *Procedia Manufacturing*, 13:227–34.

[30] Fernandes, F.A.O., Pascoal, R.J.S., Alves de Sousa, R.J. (2014). Modelling impact response of agglomerated cork. *Materials & Design*, 58:499–507.

[31] Ptak, M., Kaczynski, P., Fernandes, F.A.O. (2017). Assessing impact velocity and temperature effects on crashworthiness properties of cork material. *International Journal of Impact Engineering*, 106:238–48.

[32] Castro, O., Silva, J.M., Tessaleno, D., Silva, A., Gil, L. (2009). Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. *Materials & Design*, 31:425–432.

[33] Kaczynski, P., Ptak, M., Wilhelm, J., Fernandes, F.A.O., Alves de Sousa, R.J. (2019). High-energy impact testing of agglomerated cork at extremely low and high temperatures. *International Journal of Impact Engineering* 126:109-116.

[34] Moreira, R.A.S., Dias Rodrigues, J.F. (2010). Static and dynamic characterization of composition cork for sandwich beam cores. *Journal of Materials Science*, 45(12):3350–3366.

[35] Gil, L. (2007). Cork as a building material. Technical manual. Associação Portuguesa da

Cortiça. [36] Gil, L., Moiteiro, C. (2003). Cork. In Ullmann's Encyclopedia of Chemical Technology.

[37] Hoff, N.J., Mautner, S. E. (1944). Sandwich construction, *Aeronautical Engineering Review*.

[38] Hildebrand, M. (1996). A comparison of FRP-sandwich penetrating impact test methods. Espoo: VTT publications 281.

[39] Christopherson, J., Mahinfalah, M., Jazar, G., Aagaah, M. (2005). An investigation on the effect of small mass impact on sandwich composite plates. *Composite Structures*, 67(3):299–306.

- [40] Amorim Cork Composites. Available: [https://amorimcorkcomposites.com/media/1095/brochura\\_aerospace\\_en\\_digital.pdf](https://amorimcorkcomposites.com/media/1095/brochura_aerospace_en_digital.pdf)
- [41] Amorim Cork Composites. Available: [www.amorimcorkcomposites.com/en-us/about-us/news/ablative-thermal-solution-p50-in-next-generation-launch-rockets/](http://www.amorimcorkcomposites.com/en-us/about-us/news/ablative-thermal-solution-p50-in-next-generation-launch-rockets/)
- [42] Amorim Cork Composites. Available: [www.amorimcorkcomposites.com/en-us/materials\\_applications/aerospace/](http://www.amorimcorkcomposites.com/en-us/materials_applications/aerospace/)
- [43] Drescher, O., Hörschen-Eggers, M., Pinaud, G., Podeur, M. (2017). Cork based thermal protection system for sounding rocket applications-development and flight testing. 23<sup>rd</sup> ESA Symposium, Sweden.
- [44] New Atlas. Available: <https://newatlas.com/aerocork-sustainable-aircraft-materials/15649/>
- [45] Marques, E.A.S., Silva L.F.M., Banea M.D., Carbas R. (2015). Adhesive joints for low and high temperature use: an overview. *Journal of Adhesion*, 91:556-85.
- [46] Bouilly, J.M., Francine Bonnefond, F., Dariol F., Jullien P., Leleu F. (2006). Ablative thermal protection systems for entry in Mars atmosphere. A presentation of materials solutions and testing capabilities. In: Proceedings of 4<sup>th</sup> international planetary probe workshop, Pasadena, California, USA.
- [47] Triantou, K., Perez, B., Marinou, A., Florez, S., Mergia, K., Vekinis, G., Barcena, J., Rotarmel, W., Zuber, C., Montburn, A. (2016). Performance of cork and ceramic matrix composite joints for re-entry thermal protection structures. *Composites Part B: Engineering*, 108:270-278.
- [48] NASA, Available: <https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/multimedia/tps-on-lvsa.html>
- [49] Amorim Cork Composites. Available: <https://amorimcorkcomposites.com/en/about-us/news/cork-on-mission-to-mars/>