

# Prirodni kompoziti

---

**Tucman, Ines**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:880501>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-17**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering  
and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Ines Tucman**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ana Pilipović, dipl. ing.

Student:

Ines Tucman

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj mentorici, doc. dr. sc. Ani Pilipović na ideji, savjetima i velikoj pomoći pri pisanju ovog rada.

Zahvaljujem svojim prijateljima i kolegama na podršci i potpori.

Veliko hvala mojim roditeljima i sestri na savjetima, podršci i potpori te svemu što su učinili za mene tijekom studiranja i pisanja ovog rada.

Ines Tucman



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i roboti

|                                                              |         |
|--------------------------------------------------------------|---------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |         |
| Datum:                                                       | Prilog: |
| Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3                                 |         |
| Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -                                   |         |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ines Tucman**

Mat. br.: 0035208456

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku: **Prirodni kompoziti**

Naslov rada na  
engleskom jeziku: **Natural composites**

Opis zadatka:

Kompozitni materijali su materijali koji se sastoje od dva ili više različitih materijala s ciljem postizanja specifičnih svojstava kakva ne posjeduju niti jedan sastojak sam za sebe. U novije vrijeme sve je veća primjena prirodnih kompozita zbog njihove ekološke prirode i održivosti. Najveću primjenu pronašli su u automobilske industriji. Trenutni nedostaci prirodnih kompozita su lošija mehanička svojstva u usporedbi s ostalim kompozitima, nekompatibilnost vlakana i matrica i njihova prerada, te geografska dostupnost.

U radu je potrebno obraditi vrste prirodnih kompozita, od ojačavala (agava, bambus, juta, konoplja, lan, banana, itd.) do njihovih kompatibilnih matrica. Zatim je potrebno opisati postupke prerade prirodnih kompozita, od miješanja u slučaju prirodnih kompozita u obliku čestica, do klasične prerade prirodnih kompozita u obliku vlakana. Također je potrebno navesti područja primjene prirodnih kompozita.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
15. svibnja 2020.

Datum predaje rada:  
**2. rok (izvanredni):** 1. srpnja 2020.  
**3. rok:** 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:  
**2. rok (izvanredni):** 3.7.2020.  
**3. rok:** 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Ana Pilipović

Prof. dr. sc. Branko Bauer

# SADRŽAJ

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| 1. UVOD.....                                        | 1  |
| 2. KOMPOZITNI MATERIJALI KROZ POVIJEST .....        | 3  |
| 3. PODJELA KOMPOZITA .....                          | 5  |
| 3.1. Prema materijalu matrice .....                 | 5  |
| 3.1.1. Kompoziti s keramičkom matricom .....        | 5  |
| 3.1.2. Kompoziti s polimernom matricom .....        | 5  |
| 3.1.3. Kompoziti s metalnom matricom .....          | 6  |
| 3.1.4. Ugljik – ugljik kompoziti .....              | 7  |
| 3.2. Prema obliku ojačavala .....                   | 8  |
| 3.2.1. Vlaknima ojačani kompoziti .....             | 8  |
| 3.2.2. Kompoziti ojačani česticama .....            | 11 |
| 3.2.3. Strukturni kompoziti .....                   | 12 |
| 4. PRIRODNI KOMPOZITI .....                         | 15 |
| 5. PRIRODNA OJAČAVALA.....                          | 16 |
| 5.1. Prirodna vlakna .....                          | 16 |
| 5.1.1. Prirodna vlakna životinjskog porijekla ..... | 19 |
| 5.1.2. Prirodna vlakna biljnog porijekla .....      | 21 |
| 5.1.3. Mineralna vlakna.....                        | 39 |
| 5.2. Prirodne čestice .....                         | 40 |
| 5.2.1. Ljuske jajeta .....                          | 40 |
| 5.2.2. Ljuske (školjke) od kokosa .....             | 40 |
| 5.2.3. Drvno brašno .....                           | 41 |
| 5.2.4. Ljuska od riže .....                         | 41 |
| 5.2.5. Ljuske od badema.....                        | 42 |
| 6. PRIRODNE MATRICE .....                           | 43 |
| 6.1. Škrobni biopolimer.....                        | 43 |
| 6.2. Celulozni biopolimeri.....                     | 44 |
| 6.3. Sojin protein .....                            | 44 |
| 6.4. PHA .....                                      | 45 |
| 6.5. PHB .....                                      | 45 |

---

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 6.6. PLA .....                           | 45 |
| 7. SINTETIČKE MATRICE .....              | 46 |
| 7.1. Epoksidna smola .....               | 46 |
| 7.2. Fenolna smola .....                 | 47 |
| 7.3. Polietilen (PE) .....               | 47 |
| 7.4. Polipropilen (PP) .....             | 48 |
| 7.5. Poli (vinil-klorid) (PVC) .....     | 48 |
| 7.6. Polistiren PS .....                 | 49 |
| 8. PROIZVODNJA PRIRODNIH KOMPOZITA ..... | 50 |
| 9. PRIMJENA PRIRODNIH KOMPOZITA .....    | 56 |
| 10. ZAKLJUČAK.....                       | 67 |

## POPIS SLIKA

|                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 2.1. Mongolski luk [3].....                                                                                                                                                              | 3  |
| Slika 2.2. <i>Chevrolet Corvette</i> [5] .....                                                                                                                                                 | 4  |
| Slika 3.1 Klipnjača napravljena od legure aluminija ojačane $Al_2O_3$ česticama [1] .....                                                                                                      | 6  |
| Slika 3.2. Aluminijski blok motora [8] .....                                                                                                                                                   | 7  |
| Slika 3.3. Orijentacija vlakana: a) kontinuirana usmjerena vlakna, b) slučajno usmjerena<br>diskontinuirana vlakna, c) ortogonalni raspoređena vlakna, d) višesmjerno<br>usmjerena vlakna..... | 8  |
| Slika 3.4. Utjecaj volumnog udjela vlakana na rasteznu čvrstoću i modul rasteznosti [7].....                                                                                                   | 9  |
| Slika 3.5. Viskeri [9] .....                                                                                                                                                                   | 10 |
| Slika 3.6. Žicom ojačana cijev [1].....                                                                                                                                                        | 10 |
| Slika 3.7. Staklena, aramidna i ugljična vlakna [10].....                                                                                                                                      | 11 |
| Slika 3.8. Shematski prikaz konstrukcije koja se sastoji od površinskih slojeva i jezgre u<br>obliku pčelinjeg saća [7].....                                                                   | 13 |
| Slika 3.9. Slaganje ojačanih slojeva različito usmjerenim vlaknima kod laminatnih<br>konstrukcija [1].....                                                                                     | 14 |
| Slika 5.1. Podijela prirodnih vlakana [12].....                                                                                                                                                | 17 |
| Slika 5.2. Svila [16].....                                                                                                                                                                     | 20 |
| Slika 5.3. Plantaža agave u Meksiku [18] .....                                                                                                                                                 | 22 |
| Slika 5.4. Unutrašnjost lista agave [19].....                                                                                                                                                  | 23 |
| Slika 5.5. Vlakna agave [foto: A. Pilipović] .....                                                                                                                                             | 24 |
| Slika 5.6. Plantaža ananasa [22].....                                                                                                                                                          | 26 |
| Slika 5.7. Vlakno ananasa [22].....                                                                                                                                                            | 26 |
| Slika 5.8. Vlakna abake [24] .....                                                                                                                                                             | 27 |
| Slika 5.9. Cvijet lana [26].....                                                                                                                                                               | 28 |
| Slika 5.10 Donji dijelovi automobila ojačani lanenim vlaknima [28] .....                                                                                                                       | 29 |
| Slika 5.11. Vlakna ramije [31] .....                                                                                                                                                           | 30 |
| Slika 5.12. Jutena vlakna [34] .....                                                                                                                                                           | 31 |
| Slika 5.13. Razgradive vrećice od jute [35] .....                                                                                                                                              | 31 |
| Slika 5.14. Plantaža kenafa u Indiji [37] .....                                                                                                                                                | 32 |
| Slika 5.15. Električni automobil od biorazgradivog materijala na bazi konoplje [40] .....                                                                                                      | 33 |



|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 5.16. Brodski pod od drveno plastomernog kompozita [42] .....                                     | 34 |
| Slika 5.17. Pamuk [44] .....                                                                            | 35 |
| Slika 5.18. Berba pamuka u Teksasu [45] .....                                                           | 36 |
| Slika 5.19. Kapok [48] .....                                                                            | 38 |
| Slika 5.20. Pšenična slama [50] .....                                                                   | 38 |
| Slika 5.21. Azbestna vlakna [52] .....                                                                  | 39 |
| Slika 5.22. Prah dobiven usitnjavanjem ljuske jajeta [53] .....                                         | 40 |
| Slika 5.23. Ljuske od kokosa, oraha i riže [58] .....                                                   | 42 |
| Slika 5.24. Prah od ljuska kokosa, oraha i riže [58] .....                                              | 42 |
| Slika 8.1. Ručno polaganje [68] .....                                                                   | 50 |
| Slika 8.2. Jednpužni ekstruder [69] .....                                                               | 51 |
| Slika 8.3. Zone pužnog vijka [70] .....                                                                 | 52 |
| Slika 8.4. Pultrudiranje [68] .....                                                                     | 53 |
| Slika 8.5. RTM postupak [68] .....                                                                      | 55 |
| Slika 9.1. Panel automobilskih vrata [72] .....                                                         | 56 |
| Slika 9.2. Unutrašnjost automobila <i>Lotus Eco Elise 2009</i> [73] .....                               | 57 |
| Slika 9.3. Vanjski izgled <i>Lotus Eco Elise 2009</i> [73] .....                                        | 57 |
| Slika 9.4. <i>SunBeam Tiger Concept</i> [74] .....                                                      | 58 |
| Slika 9.5. Krovni okvir automobila od prirodnih vlakana [75] .....                                      | 59 |
| Slika 9.6. Tepih u automobilu <i>Fordu Lincolnu</i> od kompozita ojačanog vlaknima banane [76]<br>..... | 59 |
| Slika 9.7. Bicikl <i>LOOK 765</i> [78] .....                                                            | 60 |
| Slika 9.8. Bicikl od bambusa [79] .....                                                                 | 61 |
| Slika 9.9. Fasada stanice za prihvata plina [80] .....                                                  | 62 |
| Slika 9.10. Fasada stanice za prihvata plina [80] .....                                                 | 62 |
| Slika 9.11. Prvi nizozemski sklopi most od prirodnih kompozita [81] .....                               | 63 |
| Slika 9.12. Pješački most od prirodnih kompozita [81] .....                                             | 63 |
| Slika 9.13. Prva kuća izgrađena od konoplja i betona u SAD-u [82] .....                                 | 64 |
| Slika 9.14. Biorazgradivi kabinet [83] .....                                                            | 64 |
| Slika 9.15. Vrata od prirodnog kompozita [84] .....                                                     | 65 |
| Slika 9.16. Lampa od MYX materijala [85] .....                                                          | 66 |
| Slika 9.17. Skijaš na skijama od vlakna lana [86] .....                                                 | 66 |

**POPIS TABLICA**

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 5.1. Kemijski sastav pojedinih prirodnih vlakana [13] .....    | 18 |
| Tablica 5.2. Mehanička svojstva pojedinih prirodnih vlakana [14] ..... | 18 |
| Tablica 7.1. Mehanička svojstva materijala matrice [61] .....          | 49 |

## POPIS KRATICA

| <b>KRATICA</b> | <b>opis</b>                     |
|----------------|---------------------------------|
| AFC            | <i>Agro Cluster Food</i>        |
| CCC            | ugljik-ugljik kompozit          |
| CMC            | kompozit s metalnom matricom    |
| PE-HD          | polietilen visoke gustoće       |
| PE-LD          | polietilen niske gustoće        |
| MMC            | kompozit s metalnom matricom    |
| Nabasco        | <i>Natural Based Composites</i> |
| PA             | poliamid                        |
| PBSA           | poli(butilen-sukcinat)          |
| PCL            | polikaprolakton                 |
| PE             | polietilen                      |
| PEEK           | poli(eter-eter-keton)           |
| PGA            | poliglikolid                    |
| PHA            | poli(hidroksi – alkanoat)       |
| PHB            | poli(3-hidroksi - butirat)      |
| PLA            | poliaktid                       |
| PMC            | kompozit s polimernom matricom  |
| PP             | polipropilen                    |
| PPS            | poli(fenilen-sulfid)            |
| Pr. n. e.      | prije nove ere                  |
| PS             | polistiren                      |

|       |                                                                      |
|-------|----------------------------------------------------------------------|
| PTAT  | poli(tetrametilen adipat-ko-tereftalat)                              |
| PVC   | poli(vinil-klorid)                                                   |
| RTM   | injekcijsko-posredno prešanje kapljevite smole s uložnim predoblikom |
| SAP   | kompozit s aluminijem i aluminijevim trioksidom                      |
| TEC   | trietil citrat                                                       |
| TriAc | triacetin                                                            |
| WPC   | drvno plastomerni kompozit                                           |

**POPIS OZNAKA**

| <b>Oznaka</b> | <b>Jedinica</b>      | <b>Opis</b>             |
|---------------|----------------------|-------------------------|
| $E$           | $\text{N/mm}^2$      | modul elastičnosti      |
| $R_m$         | $\text{N/mm}^2$      | rastezna čvrstoća       |
| $T_g$         | $^{\circ}\text{C}$   | temperatura staklišta   |
| $V$           | %                    | volumni udio            |
| $\alpha$      | $1/^{\circ}\text{C}$ | toplinska rastezljivost |
| $\varepsilon$ | %                    | istezanje               |
| $\rho$        | $\text{g/cm}^3$      | gustoća                 |
| $\sigma$      | MPa                  | naprezanje              |

## **SAŽETAK**

Proizvodnja kompozitnih materijala, naročito prirodnih, je u sve većem porastu kao i njihova primjena u raznim granama industrije. U prvom dijelu završnog rada opisana je povijest nastanka kompozita te njihova svojstva i podjela s obzirom na vrstu matrica i ojačavala. Drugi dio završnog rada odnosi se isključivo na prirodne kompozite odnosno prirodne materijale ojačavala i matrica. Također, opisana je njihova proizvodnja, prednosti i nedostaci u usporedbi s konvecionalnim kompozitnim materijalima te njihova sve šira primjena.

Ključne riječi: kompoziti, prirodni kompozit, prirodna ojačavala, prirodne matrice

## **SUMMARY**

The production of composite materials, especially natural ones, is growing up and they have been used in different industries. The first part of the paper describes the history of composites and their properties. Furthermore it is described their division due to the type of matrices and reinforcements. The second part of the paper refers exclusively to natural composites, that is natural materials of reinforcements and matrices. Also, their production, advantages and disadvantages in comparison with conventional composite materials and their increasing application are described.

Key words: composites, natural composites, natural reinforcement, natural matrix

## 1. UVOD

Kompozitni materijali ili ukratko kompoziti proizvedeni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala s jasnom granicom između njih i s različitim svojstvima s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Tim putem mogu se postići neobične, odnosno kod drugih materijala neuobičajene kombinacije svojstava, kao što su krutost, čvrstoća, masa, ponašanje pri visokim temperaturama, kemijska postojanost (antikorozivnost), tvrdoća ili vodljivost (električna i toplinska). [1]

Kompoziti se sastoje od dva osnovna konstituenta, matrice i ojačavala.

Zadaća matrice je da: [1]

- drži ojačavala zajedno,
- štiti ojačavala od vanjskih utjecaja,
- prenosi opterećenja na ojačavalo,
- daje vanjski oblik kompozitne tvorevine.

Zadaća ojačavala je da: [1]

- budu nosivi element kompozita,
- imaju visoku čvrstoću i krutost,
- imaju dobru otpornost na trošenje.

Ukupno ponašanje kompozita ovisi o: [1]

- svojstvima matrice i ojačavala,
- veličini i rasporedu konstituenata,
- volumnom udjelu konstituenata,
- obliku konstituenata,
- prirodi i jakosti veze među konstituentima.

Primjena kompozitnih materijala: [1]

- elektrotehnika (električna izolacija, poklopci, vjetrenjače, kućišta)
- građevinarstvo (betonske konstrukcije, vrata, unutarnji zidovi, dimnjaci)
- automobilska industrija (dijelovi karoserije, volani, branici, sjedišta, navlake)



- zrakoplovstvo (konstrukcijski dijelovi putničkih zrakoplova, diskovi kočnica zrakoplova, propeleri, svemirske letjelice)
- sport (reketi za tenis, skvoš ili padel, štapovi za pecanje, skije, lukovi i strijele, zaštitne kacige, oprema za golf)
- vojna industrija, brodogradnja, medicina, farmacija, itd.

## 2. KOMPOZITNI MATERIJALI KROZ POVIJEST

Kompozitni materijali počeli su se primjenjivati i razvijati puno godina prije nove ere. Prva primjena kompozitnih materijala potječe iz Mezopotamije oko 3400. godine pr. n. e. Lijepljenjem drvenih traka pod različitim kutevima izrađivale su se prve šperploče. U razdoblju između 2181. i 2055. godine pr. n. e. Egipćani su počeli upotrebljavati slojeve lana i papirusa umočene u gips za izradu maska koje su primjenjivali u obredima. Oko 1500. godine pr. n. e. graditelji i obrtnici počinju upotrebljavati slamom ojačane cigle od blata, brodove i keramičko posuđe. Oko 25. godine pr. n. e. u deset knjiga o arhitekturi opisane su i istaknute konkretne upotrebe različitih tipova vapna i morta. Daljnjim istraživanjem uspjelo se demonstrirati da je cement opisan u tim knjigama sličan, a u nekim karakteristikama i bolji od cementa koji se danas primjenjuje.

Oko 1200. godine, Mongoli su proizveli kompozitni luk izrađen od kombinacije drva, bambusa, kosti, tetiva, rogova goveda i svile, povezan s borovom smolom. Time je dobiven mali, ali vrlo moćan i iznimno precizan luk (slika 2.1) koji je postao najopasnije oružje na svijetu sve do 14-tog stoljeća odnosno do pojave vatrenog oružja. [2]



Slika 2.1. Mongolski luk [3]

Od 1800. godine počinje kemijska revolucija kojom se još više ubrzavao razvoj kompozita. Razvija se polimerizacija, nastanak novih materijala kao što je plastika, sintetičke smole, itd. Međutim, plastika sama po sebi nije bila dovoljno čvrsta za strukturnu primjenu. Da bi se postigla dovoljna čvrstoća bila su potrebna su ojačavala. Owens Corning je 1935. godine predstavio prvo stakleno vlakno. Staklena vlakna u kombinaciji s polimerom stvaraju izuzetno

čvrstu strukturu koja je istovremeno vrlo lagana. Time je započeo razvoj industrije temeljen na polimerima ojačanim vlaknima. Zbog Drugog svjetskog rata kompozitna industrija je bila u punom jeku. Jedan od najboljih primjera upotrebe kompozitnih materijala u vojne svrhe je izrada aviona. Vojni avioni su trebali biti lagani, brzi i imati odlična svojstva, a to je bilo omogućeno upotrebom kompozitnih materijala koji imaju znatno manju masu u usporedbi s materijalima koji su se do tada koristili (tj. čelika). [2] Čak i poslije rata, kompoziti se nastavljaju razvijati. 1947. godine cijelo tijelo automobila je bilo izrađeno od kompozitnih materijala i testirano. To je dovelo do razvijanja *Corvette*-a 1953. godine prikazanog na slici 2.2. To je bio maleni sportski dvosjed s karoserijom ojačanom staklenim vlaknima. [4]



Slika 2.2. *Chevrolet Corvette* [5]

Osim u automobilskoj industriji, kompozitni materijali počeli su se primjenjivati i u brodogradnji. 1946. godine predstavljen je prvi komercijalni trup broda. U tom periodu Brandt Goldsworthy kojega su nazivali "djed kompozita", razvio je nove proizvodne postupke i nove proizvode uključujući i prvu dasku za surfanje izrađenu od staklenih vlakna, koja je revolucionirala sport. Goldsworthy je izumio proizvodni postupak pod nazivom pultrudiranje. Proizvodni postupak koji se i danas primjenjuje za izradu ručki alata, cijevi, podova vlakna, medicinskih uređaja i mnogih drugih proizvoda. 1970-ih industrija kompozita počela je sazrijevati. Razvijene su bolje polimerne smole i nova ojačavala u obliku vlakna. *DuPont* je razvio aramidna vlakna koja su poznatija pod nazivom *kevlar*. Ta vlakna su zbog svoje čvrstoće postala standardna u izradi zaštitnih prsluka. Kompozitna industrija se i dalje razvija i svakim danom se sve više širi. Zbog sve većeg fokusa na zaštitu okoliša razvija se jedna nova grana kompozita – a to su prirodni kompoziti. [6]

### 3. PODJELA KOMPOZITA

Kompozitni materijali se u većini slučaja dijele na dva osnovna načina. Prvi način je podjela prema vrsti materijala od kojeg je načinjena matrica kompozita, a druga podjela je prema obliku ojačavala.

#### 3.1. Prema materijalu matrice

Podjela kompozita prema materijalu matrice:

- kompoziti s keramičkom matricom (CMC)
- kompoziti s polimernom matricom (PMC)
- kompoziti s metalnom matricom (MMC)
- ugljik – ugljik kompoziti (CCC)

##### 3.1.1. Kompoziti s keramičkom matricom

Kako proizlazi iz naslova radi se o kompozitima kod kojih je matrica keramika. Takvi kompoziti se primjenjuju u uvjetima koji zahtijevaju postojanost pri vrlo visokim temperaturama. Matrica može biti od oksidne keramike ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ) i takve matrice imaju bolju kemijsku i toplinsku stabilnost. Osim oksidne keramike matrice mogu biti od neoksidne keramike ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) koja ima bolja mehanička svojstva. Prednosti koje vrijede za keramičke kompozite su: stabilnost pri ekstremno visokim temperaturama, postojanost na toplinske šokove, postojanost na kemijske utjecaje (antikorozivnost), visoka tvrdoća i otpornost na trošenje, mala masa. [1] Najveći nedostatak je krhkost odnosno niska žilavost. Rješenje se pronašlo u povišenju žilavosti razvojem nove generacije kompozita koja se temelji na ideji da se keramička ojačavala ugrade u matricu koja je od druge vrste keramike. Na taj način se žilavost povisuje oko 10 puta. Keramički kompoziti proizvode se postupcima vrućeg prešanja, vrućeg izostatičkog prešanja i sinteriranjem kapljevite faze. Ovakvi materijali se najčešće primjenjuju kao rezni alati. [7]

##### 3.1.2. Kompoziti s polimernom matricom

Kompoziti s polimernom matricom se nadalje dijele na kompozite kod kojih se kao materijal matrice primjenjuju plastomeri ili duromeri. Oko 95 % plastomernih matrica je od

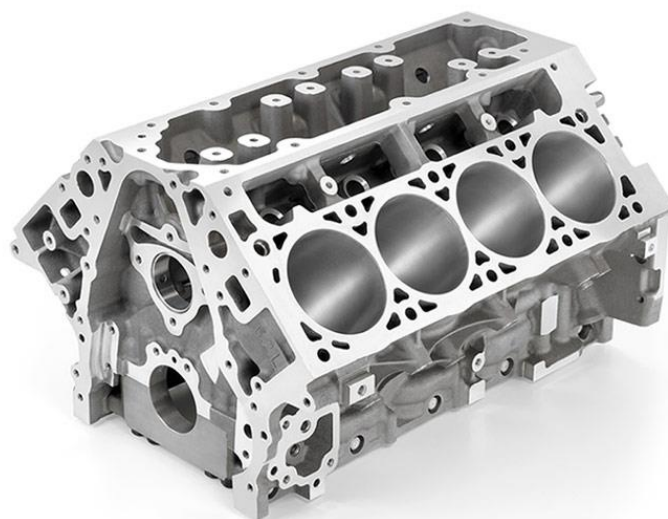
polipropilena (PP), a upotrebljavaju se još i poliamid (PA), polietilen (PE), akrilonitril/butadien/stirenska plastika (ABS), poli(vinilklorid) (PVC), poli(eter-eter-keton) (PEEK), poli(fenilen-sulfid) (PPS). Od plastomernih matrica češće su duromerne matrice: poliesterske, epoksidne, vinil esterske, fenolne smole, itd. Prednosti kompozita s polimernom matricom su dobra žilavost i obradljivost, odlična korozijska postojanost i visok omjer čvrstoća/masa. Za razliku od kompozita s keramičkom matricom ovaj tip kompozita ima loša svojstva pri visokim temperaturama, no to se isto tako može riješiti primjenom polimera koji su stabilni pri visokim temperaturama, kao npr. PEEK. [7]

### **3.1.3. Kompoziti s metalnom matricom**

Kao materijal matrice primjenjuju se superlegure (Ni-Co) koje su postojane pri ekstremno visokim temperaturama, legure aluminijske zbog jednostavne proizvodnje i niske cijene u odnosu na ostale materijale, legure magnezija zbog niske gustoće, legure titana zbog dobrih mehaničkih svojstava i postojanosti pri višim temperaturama i legure bakra koje karakterizira dobra toplinska vodljivost i mala toplinska rastezljivost. Glavni nedostaci kompozita s metalnom matricom su komplicirana proizvodnja, visoka cijena i loša recikličnost. Primjeri primjene: klipnjača napravljena od legure aluminijske ojačane  $\text{Al}_2\text{O}_3$  česticama, ima puno bolja mehanička svojstva i otpornost na zamor uz manju masu od čelične klipnjače (slika 3.1). U posljednje vrijeme neki proizvođači automobila uvode u proizvodnju dijelove motora od legure aluminijske ojačane  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i ugljičnim vlaknima i takav motor je lagan, otporan na trošenje i toplinski postojan (slika 3.2). [7]



Slika 3.1 Klipnjača napravljena od legure aluminijske ojačane  $\text{Al}_2\text{O}_3$  česticama [1]



Slika 3.2. Aluminijski blok motora [8]

#### **3.1.4. Ugljik – ugljik kompoziti**

Jedan od najnaprednijih i najperspektivnijih inženjerskih materijala je ugljik ojačan ugljičnim vlaknima. Kako mu i samo ime govori, radi se o matrici i o ojačavalu od ugljika. Ovi materijali su relativno novi i vrlo skupi što onemogućava njihovu široku primjenu. Svojstva ovih materijala su visok rastezni modul i rastezna čvrstoća, koji se ne mijenjaju pri temperaturama višim od 2000 °C, otpornost na puzanje te relativno visoka žilavost.

Osim toga ovi kompoziti imaju nisku toplinsku rastezljivost i visoku toplinska provodnost, što u kombinaciji s visokom čvrstoćom u određenoj mjeri rješava problem velike osjetljivosti prema toplinskom šoku. Glavni nedostatak ovih materijala je sklonost oksidaciji pri visokim temperaturama. To se može riješiti dodavanjem inhibitora oksidacije. Ovi kompoziti se upotrebljavaju kod izrade raketnih motora zbog otpornosti na trošenje, kod izrada dijelova turbina i na konstrukcijama suvremenih vojnih zrakoplova. [7]

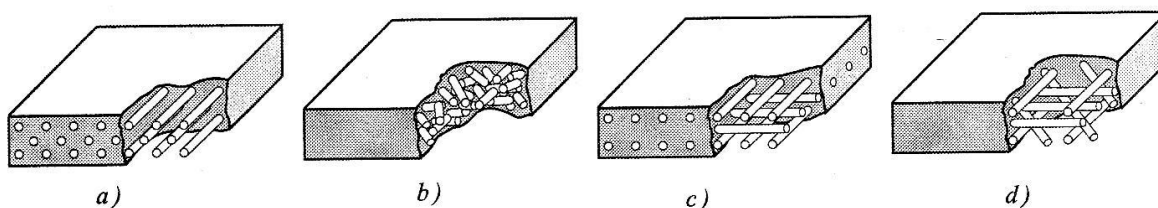
### 3.2. Prema obliku ojačavala

Uz ranije navedenu podjelu kompozita prema materijalu matrice od kojeg je građen, druga podjela je prema obliku ojačavala koji se nalaze unutar matrice:

- vlaknima ojačani kompoziti:
  - viskeri
  - žice
  - vlakna
- kompoziti ojačani česticama:
  - kompoziti ojačani velikim česticama
  - kompoziti ojačani disperzijom čestica
- strukturni kompoziti
  - sendvič konstrukcije
  - laminati

#### 3.2.1. Vlaknima ojačani kompoziti

Kod vlaknima ojačanih kompozita dolazi do izražaja poboljšanje čvrstoće, žilavosti, krutosti te povećanja omjera "čvrstoća/gustoća" uslijed ugradnje čvrstih, krutih i krhkih vlakana u mekaniju, duktilniju matricu. Vlakna mogu biti kontinuirana i diskontinuirana, usmjerena ili neusmjerena. Orijentacija vlakana prikazana je na slici 3.3.



Slika 3.3. Orijentacija vlakana: a) kontinuirana usmjerena vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna

[7]

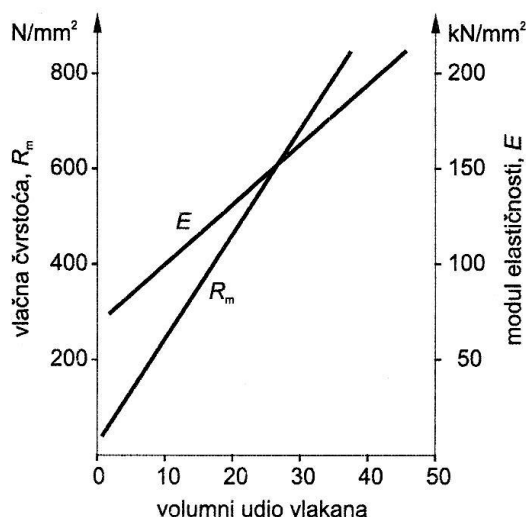
Pri konstruiranju vlaknima ojačanih kompozita potrebno je uzeti brojne faktore, a to su:

### Omjer "duljina/promjer"

Kontinuirana vlakna imaju najbolja svojstva, ali se teško proizvode i teško ugrađuju u matricu. Diskontinuirana vlakna s velikim omjerom "duljina/promjer" znatno se lakše ugrađuju u matricu dovodeći tako do materijala visoke krutosti i čvrstoće. [7]

### Volumni udio vlakana

Viši volumni udio vodi do povišenja čvrstoće i krutosti kompozita. Gornja granica od 40 % određena je sposobnošću, odnosno mogućnošću da se vlakna okruže materijalom matrice. Utjecaj volumnog udjela vlakana na rasteznu čvrstoću i modul rasteznosti prikazan je na slici 3.4. [7]



Slika 3.4. Utjecaj volumnog udjela vlakana na rasteznu čvrstoću i modul rasteznosti [7]

### Usmjerenost vlakana

Jednosmjerna vlakna imaju optimalnu krutost i čvrstoću kada je opterećenje paralelno s vlaknima. Vlakna se mogu polagati i ortogonalno ili pod nekim kutem, čime se smanjuje čvrstoća, ali se postižu jednoličnija svojstva. Vlaknima ojačani kompoziti se smatraju anizotropnim materijalima budući da imaju znatno bolja svojstva u smjeru vlakana. [7]

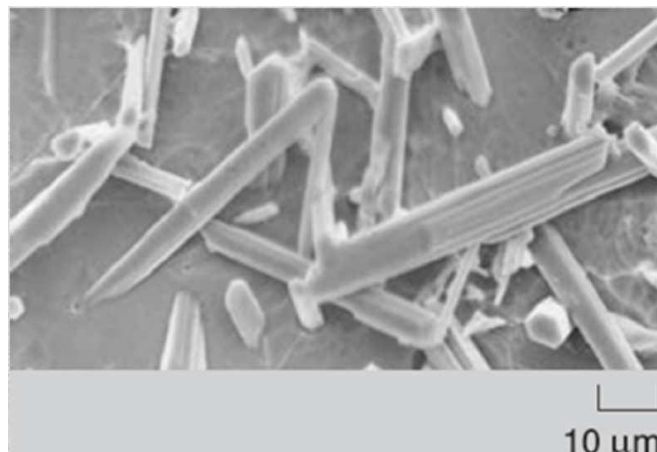
Vlaknima ojačani kompoziti se dalje dijele na viskere, vlakna i žice:

**Viskeri** (slika 3.5) su sićušni monokristali koji imaju ekstremno veliki omjer "duljina/promjer". Posljedica malih dimenzija je veliki udio pravilnosti kristalne građe zbog čega gotovo nema mogućnosti tečenja što dovodi do izuzetno visoke čvrstoće. Usprkos svoje



visoke čvrstoće ne primjenjuju se zbog komplicirane proizvodnje, visoke cijene i teško ih je ugraditi u matricu.

Viskeri se grade od grafita (ugljika), silicijeva nitrida i aluminijske oksida. [7]



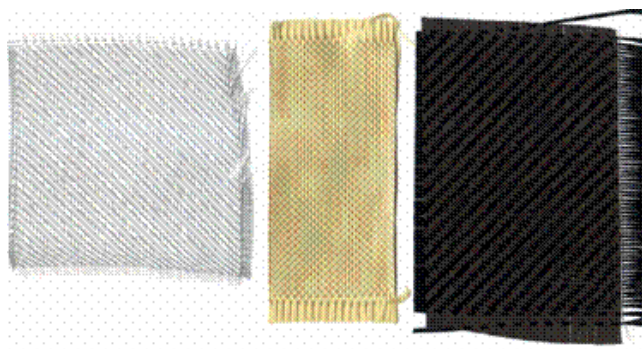
Slika 3.5. Viskeri [9]

**Žice** su relativno velikog promjera, tipični materijali žice su čelik, molibden i volfram. Primjenjuju se pri radijalnom čeličnom ojačavanju (armiranju) automobilske gume, pri namotavanju čahura/košuljica, te kod žicama omotanih visokotlačnih cijevi. Primjer primjene žica prikazan je na slici 3.6. [7]



Slika 3.6. Žicom ojačana cijev [1]

**Vlakna** su ili polikristalna ili amorfna te imaju mali promjer. Vlaknasti materijali mogu biti polimerni ili keramički (aramid, staklo, ugljik, bor, aluminij-oksidi i silicij-karbid (slika 3.7). [7]



Slika 3.7. Staklena, aramidna i ugljična vlakna [10]

### **3.2.2. Kompoziti ojačani česticama**

S obzirom na veličinu čestica i način na koji te čestice utječu na svojstva kompozita, kompoziti ojačani česticama se dijele u dvije skupine: kompozite s disperzijom i kompozite s velikim česticama. Kod kompozita s disperzijom upotrebljavaju se čestice promjera do  $0,1\ \mu\text{m}$ , a kod kompozita s velikim česticama upotrebljavaju se čestice promjera od  $1,0\ \mu\text{m}$ . Osim s obzirom na promjer, moguće ih je podijeliti i prema volumnom udjelu. Ukoliko je volumni udio  $V = 0,15$  radi se o kompozitima s disperzijom, a kod volumnih udjela viših od  $V = 0,20$  o kompozitima s velikim česticama. [7]

#### **3.2.2.1. Kompoziti s disperzijom**

Budući da je kod ove vrste kompozita veličina čestica vrlo mala te male čestice sprječavaju gibanje dislokacija i tako dovode do ojačavanja. Potrebna je mala količina dispergirano materijala kako bi se postiglo ojačanje – do 15 %. [7]

Pri sobnoj temperaturi disperzijom ojačani kompoziti nisu čvršći od dvofaznih metalnih legura, no njihova prednost je u tome što porastom temperature, zrna i povećanjem disperzirane faze ne dolazi do naglog omekšavanja kao kod dvofaznih metalnih legura nego se čvrstoća smanjuje postepeno. Osim toga postojanost prema puzanju veća je od one kod precipitacijski očvrnutih legura. [7]

Svojstva disperzijom ojačanih kompozita mogu se optimirati uzimanjem u obzir sljedećih smjernica: [7]

1. Disperzirana faza treba biti djelotvorna zapreka klizanju (smicanju).
2. Materijal koji služi kao disperzija treba biti optimalne veličine, oblika, raspodjele i udjela.
3. Disperzirani materijal treba biti male rastvorljivosti u materijalu matrice. Slaba rastvorljivost može doprinijeti dobrim i čvrstim vezama.
4. Ne smije doći do kemijskih reakcija između dispergenata i matrice.
5. Između matrice i raspršenog materijala treba postojati dobra povezanost.

Klasični primjer kompozita s disperzijom je "SAP" – kompoziti. Ovaj kompozit se sastoji od aluminijske matrice ojačane s do 14 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Kompozit se proizvodi sinteriranjem, prah aluminija i aluminijske trioksida miješa se, kompaktira tlačenjem te sinterira. [7]

### *3.2.2.2. Kompoziti s velikim česticama*

Ovi kompoziti sadrže više udjele velikih čestica koje ne djeluju na sprječavanje gibanja dislokacija pa se takvi kompoziti proizvode u cilju postizanja takvih kombinacija svojstava kojima nije prvenstvena svrha osiguranje čvrstoće. [7]

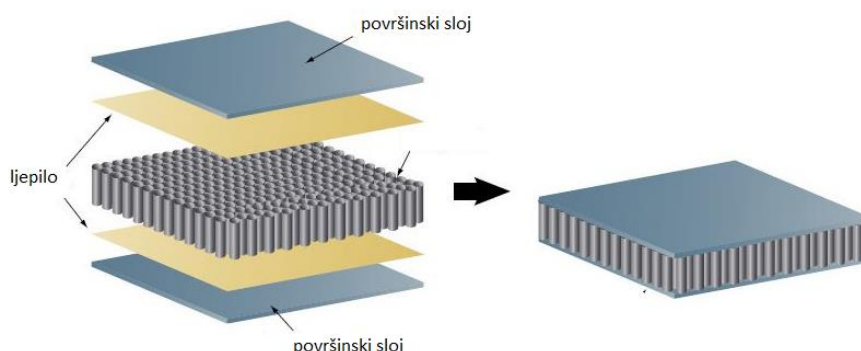
### **3.2.3. Strukturni kompoziti**

Strukturni kompoziti se uobičajeno sastoje od homogenog i kompozitnog materijala, a njihova konačna svojstva ne ovise samo o svojstvima materijala koji čine kompozit, nego i o geometrijskom dizajnu različitih strukturnih elemenata. Dvije najčešće grupe koje se pojavljuju unutar strukturnih kompozita su laminarni kompoziti i sendvič konstrukcije. [7]

#### *3.2.3.1. Sendvič konstrukcije*

Sendvič konstrukcije sastoje se od spojenih, ali i razdvojenih tankih vanjskih slojeva, s materijalom za popunjavanje male mase. (slika 3.8) Niti materijali za popunjavanje, niti vanjski slojevi ne trebaju biti čvrsti i kruti, a sendvič konstrukcija će posjedovati oba ta

svojstva. Najjednostavniji i najpoznatiji primjer je karton. Karton se sastoji od valovite jezgre koja je sa svake strane vezana za slojeve debelog papira. Niti valovita jezgra, niti površinski slojevi papira nisu kruti, ali ipak njihova kombinacija jest. Drugi najznačajniji primjer su strukture u obliku pčelinjeg saća koje se primjenjuju u zrakoplovstvu. Tanki limovi, trake ili folije od aluminija oblikuju se u šesterokutne ćelije s osi koja je usmjerena okomito na ravninu površinskih slojeva. Materijal od kojeg su načinjene ćelije u obliku pčelinjeg saća može biti sličan materijalu površinskih slojeva. Ako se npr. sa svake strane tog saća nalijepi aluminijev lim, dobije se vrlo postojan, krut, čvrst i izuzetno lagan sendvič. [7]

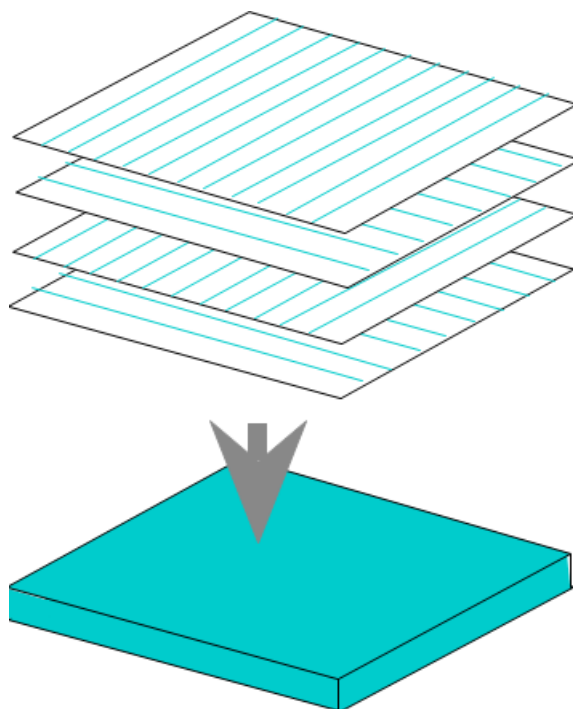


Slika 3.8. Shematski prikaz konstrukcije koja se sastoji od površinskih slojeva i jezgre u obliku pčelinjeg saća [7]

### 3.2.3.2. Laminati

Laminati ili slojeviti kompoziti (slika 3.9) sastavljeni su od dvodimenzionalnih slojeva s preferiranim smjerom visoke čvrstoće (drvo, ili usmjerenim vlaknima ojačani polimerni materijali). Slojevi su složeni i dodatno međusobno čvrsto povezani, a svojstva variraju s obzirom na orijentaciju vlakana u pojedinim slojevima (zbog toga se slojevi slažu različito usmjereni).

Laminati se proizvode različitim metodama pri čemu se primjenjuju različiti postupci koji uključuju različite postupke deformiranja i spajanja kao što su povezivanje valjanjem, spajanje eksplozijom, koekstrudiranje i lemljenje. [7]



Slika 3.9. Slaganje ojačanih slojeva različito usmjerenim vlaknima kod laminatnih konstrukcija [1]

S obzirom na to da prirodna vlakna i matrice postižu sve veću pozornost primjene u polimernim kompozitima zbog svoje ekološke prirode i održivosti u sljedećim poglavljima težište će biti na prirodnim kompozitima, odnosno vlaknima i matricama koja se upotrebljavaju u prirodnim kompozitima, njihovoj primjeni i proizvodnji.

#### 4. PRIRODNI KOMPOZITI

Proizvodnja sirovina, materijala i proizvoda, njihova uporaba i odlaganje imaju značajan gospodarski i ekološki utjecaj. Iskoristivost sirovina i ekološka prihvatljivost može se povećati zatvaranjem kruga, tj. stvaranjem oporabljivoga i trajnoga proizvoda, ali isto tako i primjenom obnovljivih izvora sirovina. Zbog toga je upotreba prirodnih kompozita u neprestanom rastu.

Prirodni kompoziti su kompozitni materijali načinjeni od: [1]

1. Prirodnih ojačavala i sintetičkih matrica (najčešće polimernih)
2. Prirodnih matrica (biopolimera) i sintetičkih ojačavala
3. Prirodnih ojačavala i prirodnih matrica

U slučaju da je kompozit načinjen i od prirodnih ojačavala i od prirodne matrice onda se takva vrsta kompozita naziva zeleni kompozit.

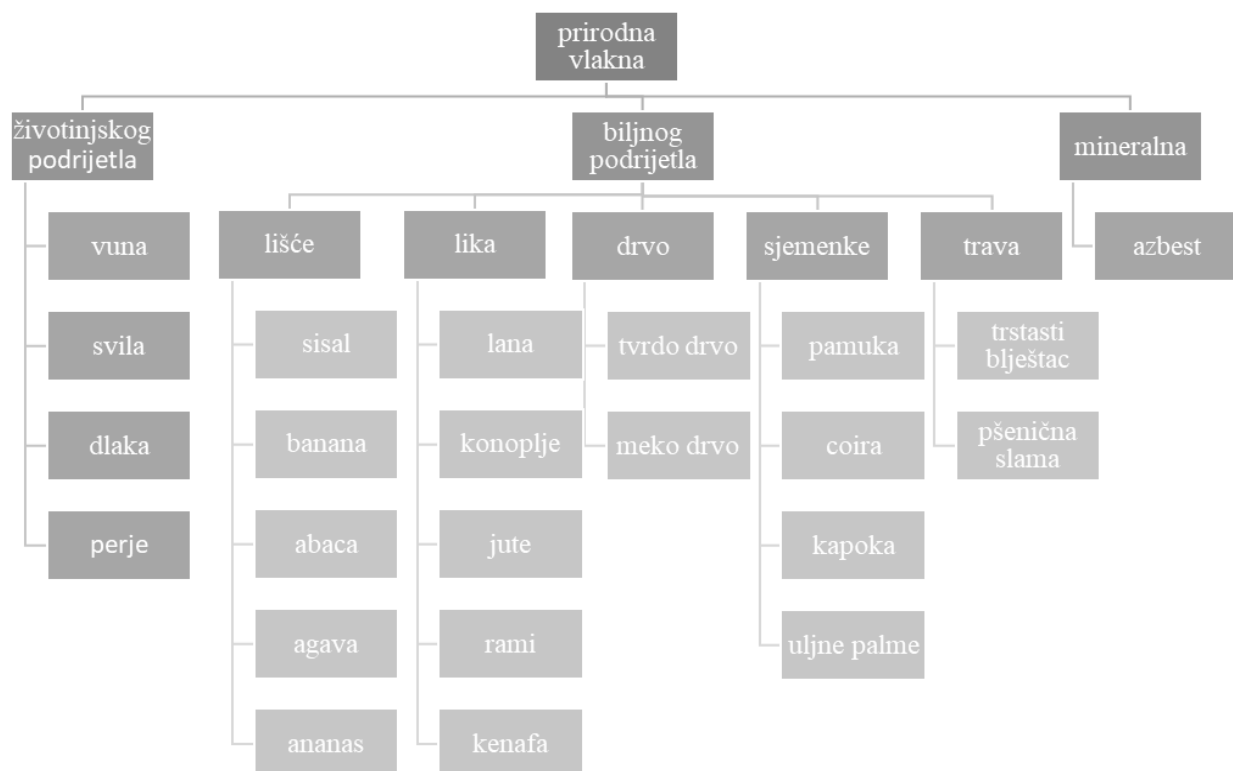
U nastavku će biti dan pregled prirodnih ojačavala koja mogu biti u obliku vlakana i čestica, te prirodnih, ali i sintetičkih matrica.

## 5. PRIRODNA OJAČAVALA

### 5.1. Prirodna vlakna

Prirodna tekstilna vlakna proizvod su prirodnih procesa žive (biljni i životinjski svijet) i nežive prirode (minerali). U prirodi se nalaze u obliku u kojem se mogu izravno upotrijebiti kao tekstilna sirovina (npr. pamuk, vuna) ili u takvu stanju da je njihova uporaba moguća nakon fizikalno-mehaničkih zahvata (npr. lan, juta, svila). Tri su glavne skupine prirodnih vlakana prikazane na slici 5.1, a to su: biljna vlakna građena od celuloze, životinjska vlakna građena od bjelančevina, te mineralna vlakna silikatnog minerala krizotila. Biljna vlakna mogu izrasti iz sjemenka, biti sastavni dio kore stabljike, plodova, lišća, itd. Životinjska su vlakna dlačni pokrivač (runo) nekih životinja (ovca, koza, kunić, deva, ljama, alpaka, vikunja i dr.), ili ih proizvode gusjenice svilenih prelaca pri začahurivanju i tvorbi kukuljice, u fazi pripreme za preobrazbu u leptira. U prirodi ima više vrsta svilenih prelaca (svilaca), a najvažniji je dudov svilac, koji proizvodi najkvalitetniju svilu. Vlakna drugih svilenih prelaca nazivaju se tusah, eria, anafe i dr., ovisno o vrsti svilenoga prelca. Jedini je predstavnik prirodnih mineralnih vlakana azbest. [11]

Prilikom razvoja bilo koje industrijske grane potrebno je imati na umu dugoročnu dostupnost sirovina. Kako bi se osigurala trajna opskrba prirodnim vlaknima, nužno je poticati razvoj poljoprivredne proizvodnje i zdravih ekosustava. Takva poljoprivreda označava ravnotežu između očuvanja prirodnih dobara i njihove primjene, kako na lokalnom tako i na globalnom planu. To pretpostavlja trajni uzgoj biljaka s prirodnim vlaknima, skrb o primjeni poljoprivrednih dobara i očuvanje ekosustava. [11]



Slika 5.1. Podijela prirodnih vlakana [12]



U tablicama 5.1 i 5.2 prikazan je kemijski sastav i mehanička svojstva nekih prirodnih vlakana.

Tablica 5.1. Kemijski sastav pojedinih prirodnih vlakana [13]

| Vlakno         | Celuloza (w%) | Hemiceluloza (w%) | Lignin (w%) | Vosak (w%) |
|----------------|---------------|-------------------|-------------|------------|
| Bambus         | 26-43         | 30                | 21-31       | -          |
| Lan            | 71            | 18,6-20,6         | 2,2         | 1,5        |
| Kenaf          | 72            | 20,3              | 9           | -          |
| Juta           | 61-71         | 14-20             | 12-13       | 0,5        |
| Konoplja       | 68            | 15                | 10          | 0,8        |
| Ramija         | 68,6-76,2     | 13-16             | 0,6-0,7     | 0,3        |
| Abaka          | 56-63         | 20-25             | 7-9         | 3          |
| Sisal          | 65            | 12                | 9,9         | 2          |
| Kokos          | 32-43         | 0,15-0,25         | 40-45       | -          |
| Uljna palma    | 65            | -                 | 29          | -          |
| Ananas         | 81            | -                 | 12,7        | -          |
| Pšenična slama | 38-45         | 15-31             | 12-20       | -          |

Tablica 5.2. Mehanička svojstva pojedinih prirodnih vlakana [14]

| Vlakno    | Gustoća<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Duljina<br>(mm) | Prekidno<br>istezanje (%) | Rastezna čvrstoća<br>(MPa) | Rastezni modul<br>(GPa) |
|-----------|---------------------------------|-----------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Ramija    | 1,5                             | 900-1200        | 2-3,8                     | 400-938                    | 44-128                  |
| Lan       | 1,5                             | 5-900           | 1,2-3,2                   | 345-1830                   | 27-80                   |
| Konoplja  | 1,5                             | 5-55            | 1,6                       | 550-1110                   | 58-70                   |
| Juta      | 1,3                             | 1,5-120         | 1,5-1,8                   | 393-800                    | 10-55                   |
| Agava     | 1,5                             | 900             | 2-2,5                     | 507-855                    | 9,4-28                  |
| Pamuk     | 1,5                             | 10-60           | 3-10                      | 287-800                    | 5,5-13                  |
| Kokos     | 1,2                             | 20-150          | 15-30                     | 131-220                    | 4-6                     |
| Svila     | 1,3                             | Neprekidna      | 15-60                     | 100-1500                   | 5-25                    |
| Vuna      | 1,3                             | 38-152          | 13,2-35                   | 50-315                     | 2,3-5                   |
| Meko drvo | 1,5                             | -               | -                         | 1000                       | 40                      |
| Perje     | 0,9                             | 10-30           | 6,9                       | 100-203                    | 3-10                    |

### **5.1.1. Prirodna vlakna životinjskog porijekla**

#### **5.1.1.1. Svila**

Svila (slika 5.2) se dobiva iz različitih izvora pa tako i njena svojstva variraju ovisno o njima. Neke vrste insekata, ličinka, paukova i većina leptira tijekom svoje preobrazbe proizvode svilu. Najviše istraživane i korištene su svila proizvedena od dudova svilca i paukova svila. Svila ima veliki potencijal zahvaljujući izvanrednim svojstvima i strukturi. Svila od dudovog svilca sastoji se dvije važne komponente, vlakna i sericina. Sericin se nalazi na vlaknu te se u proizvodnji skida s vlakna pa upotrebljava za kozmetiku i u zdravstvene svrhe. Vlakna su izdržljiva pri niskim i visokim temperaturama, postojana su na mnoge kemikalije, netopiva su u većini alkohola i acetona, postojana su na blage kiseline i apsorbiraju vodu. Rastezna čvrstoća svile je viša od većine biljnih vlakana. Njome su ojačane razne vrste PE-HD (polietilena visoke gustoće), PE-LD (polietilena niske gustoće) i prirodnih guma. Ima dobru biokompatibilnost, podržava proliferaciju stanica i ima mehaničku stabilnost pa se stoga upotrebljava i u tkivnom inženjerstvu. S obzirom na svoju čvrstoću vlakna svile usporediva su s nekim sintetičkim vlaknima. Rastezna čvrstoća im je kao i kod čelika visoke čvrstoće, s mnogo manjom gustoćom i višom istezljivošću što čini ova vlakna jedinstvenim. No najveći nedostatak ovih vlakana je nemogućnost proizvodnje u velikim količinama. Iako vlakna svile imaju odlična svojstva kao kompozitno ojačanje, visoka cijena i niska dostupnost onemogućuju njihovu širu primjenu. [15]



Slika 5.2. Svila [16]

#### 5.1.1.2. Vuna

Vuna je prirodno tekstilno vlakno dobiveno od ovaca, koza, deva, zečeva, ljama i drugih sisavaca pa se prema tome i njihova svojstva razlikuju. Vuna je građena od bjelančevine keratina koji je manje podložan kemijskim oštećenjima i nepogodnim vanjskim uvjetima od celuloze. Vuna ima složenu molekularnu strukturu, a vanjski dio prekriven je ljuskama. Oblik ljusaka i način prekrivanja površina vlakana može se znatno razlikovati ovisno o vrsti ovce pa se prema tome vuna dijeli na finu i grubu. Vlakna su najčešće blijedo žuta, ali prirodno mogu biti sive, crne i smeđe boje te su kovrčava i sjajna. Nedostatak vune je niska čvrstoća u usporedbi s ostalim prirodnim vlaknima i poroznost zbog koje vlakna upijaju veliku količinu vlage. Usprkos tim nedostacima vuna je izuzetno visoke istezljivosti. Osim u tekstilnoj industriji najviše se upotrebljava kao izolacijsko sredstvo jer zadržava zrak i toplinu. Tekstilna industrija vune proizvodi mnogo otpada pa se stoga vlakna iskorištavaju kao ojačavala u kompozitima. [15]

#### 5.1.1.3. Perje

Perje se prodaje po veoma niskoj cijeni jer ostaje kao otpad u prehrambenoj industriji. Perje karakterizira niska gustoća i dobra toplinska i zvučna izolaciju, ali ima nižu rasteznu čvrstoću u odnosu na druga prirodna vlakna. Može se primjenjivati kao cijelo pero ili zasebno izvučena

keratinska vlakna. Perjem ojačan polipropilen ima višu rasteznu čvrstoću, modul elastičnosti i savojnu čvrstoću od obrađenih pernih vlakana. Kompoziti ojačani pernim vlaknima mogu se primjenjivati za tiskane pločice. [15]

### **5.1.2. Prirodna vlakna biljnog porijekla**

#### **5.1.2.1. Agava**

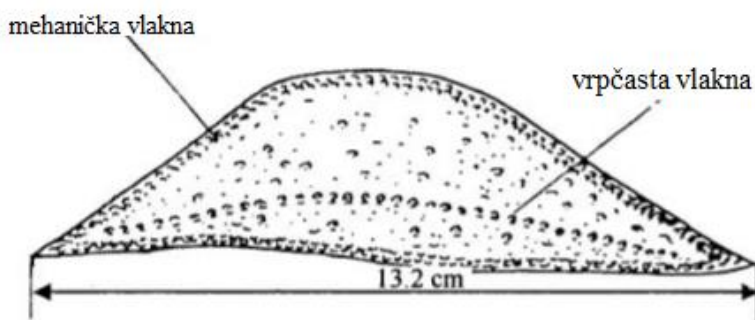
Agava je trajna biljka iz porodice šparogovka (*Asparagales*). Listovi su skupljeni u prizemnoj rozeti, zelenoplavičaste su boje, narastu do dva metra dužine, oštrog su vrha i bodljikavog, nazubljenog ruba. Najviše plantaža agava se nalaze u Meksiku (slika 5.3). Više se vrsta kultivira u vrtovima i parkovima toplijih krajeva. Stabljika im je uglavnom kratka ili je uopće nema. Listovi agave su veliki, tvrdi, trajni, mesnati i većinom s bazalnim rozetama. Cvjetovi su regularni, u metličastim i klasastim cvatovima smješteni na visoku batvu koja se razvija iz centra rozete. Neke vrste cvatu svaku godinu, neke u većim intervalima, a neke samo jednom, nakon čega se čitava biljka osuši i uvene. Plod je duguljasti tobolac s mnogo sitnih, plosnatih i crnih sjemenki. Najveća kolekcija agava nalazi se u botaničkom vrtu Kew Garden u Engleskoj.

Agave se često kvalificiraju po lišću (rub i vrh). Prvu agavu otkrio je Kristofor Kolumbo na bahamskom otoku Guanzani. Obična agava (*A. americana*) podrijetlom je iz tropskog dijela Amerike. Vrlo je proširena i u Sredozemlju. Stabljike gotovo nema. Lišće je jedan i pol metar dugačko i do 20 cm široko, debelo, sočno i sivozeleno, prema gore blago savinuto i tvori snažnu rozetu. Cvjetno batvo može biti i do 12 metara visoko. Cvjetovi su veliki, sa žutozelenim segmentima. Ugibanje agave može se spriječiti rezanjem cvjetnog batva prije nego se razvije cvijet. Često se uzgaja u posudama kao ukrasna vrsta. [17]



Slika 5.3. Plantaža agave u Meksiku [18]

Agavama je u domovini porijekla ekonomska vrijednost velika. Iz lišća mnogih vrsta dobiva se vlakno. Najvažnije su u tom pogledu *A. sisalana*, *A. cantala* i *A. fourcroydes*. List *A. sisalana* dug je do 2 metra i težak do 1 kilogram. Iz starih dozrelih listova dobiva se vlakno koje je do 150 cm dugo, trajno, bijelo ili žućkasto, čvrsto i žilavo. Vlakna se mogu podijeliti u tri vrste: mehanička, vrpčasta i xylem. Mehanička vlakna su uglavnom izvađena iz periferije lista. (slika 5.4) Imaju oblik potkove te su grubo zadebljane strukture. Ovakav tip vlakana se najviše upotrebljava u komercijalne svrhe. Vrpčasta vlakna nalaze se u središnjem dijelu lista. Imaju provodnu struktura tkiva što im daje značajna mehanička svojstva, poput visoke čvrstoće. U usporedbi s mehaničkim vlaknima duža su i pravilnijeg oblika pa se zato mogu lakše podijeliti i odvojiti tijekom izvlačenja. Suprotno vrpčastim vlaknima, xylem vlakna imaju nepravilan oblik i sastoje se od stanica s tankim stijenkama i zbog toga se lako lome tijekom postupka izvlačenja. [19]



Slika 5.4. Unutrašnjost lista agave [19]

Agava se upotrebljava za grube proizvode kao što su vreće, tepisi, viseći kreveti, četke, ljetni šeširi, konopi i užad. Vlakno *A. americana* prikladno je za fino pletivo, posebno čipku. Na otoku Hvaru agave su časnim sestrama benediktinkama služile kao sirovina za dobivanje niti u izradi čipki koje su jedinstvene u svijetu. Hvarska čipka od agavinih niti uvrštena je na listu zaštićenih nematerijalnih kulturnih dobara. U južnoj Italiji iz obične agave dobiva se posebno vlakno zabbara koje služi za vezanje drva, sijena ili za pletenje stolaca i šešira. U Meksiku se alkoholno piće tequila radi od agava. Tequila je u gradu Tequili prvi put proizvedena u 16. stoljeću, no Asteci su pravili fermentirano piće od agave koje su zvali octli (kasnije je dobilo popularnije ime *pulque*) još prije nego su došli španjolski osvajači 1521. godine. Tequila se počela proizvoditi ranih 1800-ih u Guadalajari (Meksiko), a kroz prošlo je stoljeće postala popularna diljem svijeta. Polja plave agave i drevne destilerije u okolici Tequile danas su na popisu svjetske baštine. Latinsko ime roda *Agave* potječe od grčke riječi *Agauos*, što znači uzvišen, vrijedan divljenja. Na engleskom jeziku poznata je pod nazivom Century plant (stoljetna biljka), zbog toga što cvjeta samo jednom i to nakon vrlo dugog vremena. Agava se spominje i u grčkoj mitologiji kao mitska kraljica Tebe, kćer tebanskog kralja Kadma i Harmonije. [17]

Postoje dva načina kako se vlakna agave izvlače iz listova: mehaničkim procesom i kemijskim procesom. Mehanički proces se sastoji od raskomadanja lišća pomoću stroja koji se naziva Raspadors i odvija se ispod mlaza vode. Nedostatak ovog procesa je visoka cijena zbog potrošnje velikih količina vode i energije. Uz to raskomadanjem lišća i odvajanjem vlakna može doći do promjene mehaničkih svojstava vlakana. Kemijski proces se sastoji od umakanja lišća u morsku vodu (hidroliza u morskoj vodi) kako bi se celuloza oko vlakana

otopila omogućavajući lakše izvlačenje vlakana. Ovim procesom se rješavaju problemi trošenja puno vode i energija, ali nedostatak je dugo trajanje koje zahtjeva namakanje listova barem tri mjeseca. U novije vrijeme se i taj problem uspio riješiti tretiranjem vlakna natrijevim hidroksidom, koji uklanja vlagu iz vlakna i povisuje njihovu čvrstoću, nakon čega se vlakna ispiru vodom pa otopinom dioksana. Ovom metodom se dobivaju čista i neoštećena vlakna u manje od 48 sati. Nakon što su vlakna izvučena ostali dijelovi lista agave se mogu iskoristi u kozmetičke svrhe kao dodatak raznim kremama ili sapunima. Poznat je i agavin sirup koji je sladak i zamjenjuje šećer. [17] Na slici 5.5 prikazana su vlakna agave.



Slika 5.5. Vlakna agave [foto: A. Pilipović]

Kompoziti ojačani vlaknima agave dijele se s obzirom na materijal matrice:

- agavinim vlaknima ojačani duromeri
- agavinim vlaknima ojačani plastomeri
- agavinim vlaknima ojačana guma/elastomeri
- agavinim vlaknima ojačan cement i gips.

Istraživanja su pokazala da su se u početku najviše primjenjivale matrice od cementa i gipsa, ali danas se primjenjuju matrice polietilena, poliestera i epoksidne smole. Kombinacija navedenih matrica i agavinih vlakna daje bolja svojstva u odnosu s agavinim vlaknima

ojačani cement i gips. Najčešći postupak dobivanja ovih kompozita je podtlačnim oblikovanjem. Prilikom izrade hibridnih kompozita vlakna agave najbolja mehanička svojstva daju u kombinaciji sa staklenim vlaknima i matricom PE-HD. [19]

#### 5.1.2.2. Ananas

Ananas (*Ananas comosus*) je biljka iz porodice Bromeliaceae. Porijeklom je iz Amerike, ali se danas uzgaja diljem svijeta kao voće, uglavnom u tropskim krajevima. Plantaža ananasa prikazana je slikom 5.6. Ananas daje krupne, mesnate plodove, koje se primjenjuju svježi ili se konzerviraju. Riječ ananas potječe iz gvarani jezika (naná) što znači isto. U komercijalnom uzgoju cvjetanje se može izazvati umjetno, kako bi se omogućila rana berba prvog ploda, a to može potaknuti razvoj drugog usjeva sitnijih plodova. Izrezani vrh ananasa, dobiven tijekom čišćenja može se posaditi u zemlju te će izrasti nova biljka. [20]

Ananas jedno od najpoznatijih i najraširenijih tropskih voća uz bananu i nakon branja plodova njegovo lišće ostaje neiskorišteno. Kako bi se izbjeglo paljenje i bacanje lišća ananasa ona se sve češće počinju primjenjivati kao izvor vlakana. Vlakna su prikazana slikom 5.7. Konvencionalna metoda izvlačenja vlakana iz listova je ručna metoda koja se sastoji se od nekoliko koraka. List ananas se postavlja na ravnu podlogu te se pomoću alata za struganje, koji se naziva Ketam, struže gornji sloj. Zatim se list okreće pa se struže donji sloj i nakon toga se ručno izvlače vlakna. Vlakna se onda ispiru vodom i suše na suncu. Nedostatak ove metode je što se prilikom izvlačenja vlakna mogu oštetiti i time oslabiti neka mehanička svojstva. [20]

Kako bi se izbjegao loš utjecaj na svojstva, razvijen je stroj za izvlačenje vlakana iz listova. Stroj se sastoji od tri valjka. Prvi valjak služi za pravilno raspoređivanje listova te dovođenje do drugog valjka. Drugi valjak se naziva valjak za struganje. Kako i sam naziv kaže on struže gornji sloj listova te uklanja mokri voštani sloj. Zatim listovi dolaze do trećeg odnosno zadnjeg valjka koji je nazubljen s puno sitnih oštrica koje služe da se naprave ulazi pomoću kojih bi se uklonili mikrobi i nečistoće. Na kraju se listovi, odnosno u ovom koraku već su vlakna, uranjaju u vodu u kojoj se nalaze tvari koje uklanjaju nečistoće, mikrobe, zemlju i slično. Nakon tog procesa se mehanički razdvajaju vlakna i suše na suncu. Istraživanja su pokazala da se kompoziti ojačani vlaknima od listova ananasa najbolje slažu s polimernim matricama kao što su matrice na bazi polietilena, polipropilen, polikarbonata i poliestera. [21]





Slika 5.6. Plantaža ananasa [22]



Slika 5.7. Vlakno ananasa [22]

#### 5.1.2.3. Abaka

Abaka (*Musa textilis*) se još naziva i filipinska konoplja. Najveći proizvođač abake su Filipini gdje se godišnje proizvede oko 57 000 tona vlakana od abake (slika 5.8). Uz Filipine, Ekvador proizvede oko 10 000 tona. Vlakna od abake su kao i većina vlakana od lišća, sastavljena od elementarnih vlakana. Najčešće služe za izradbu užadi. Posebno su bila cijenjena za brodsku užad, ribarske mreže i slično budući da su postojana na utjecaj morske vode i zadržavaju dobru savitljivost. Na suncu izbijeje, ali ne gube na čvrstoći. Lokalno se upotrebljavaju za izradu laganih, čvrstih tkanina od kojih se izrađuje odjeća, šeširi i cipele. U Europi se vlakna

abake najviše primjenjuju u automobilskoj industriji, *Mercedes Benz* je zamijenio unutarnje dijelove auta koji su bili rađeni od staklenih vlakana abakinim u polipropilenskoj matrici. Time se postiglo smanjenje mase, a zadržala čvrstoća i omogućilo lakše recikliranje dijelova automobila. Osim u automobilskoj industriji abaka se primjenjuje kao papir (filteri za cigarete, vrećice čajeva, papir za pisanje, papirnati pribor za jelo). [23]



Slika 5.8. Vlakna abake [24]

#### 5.1.2.4. Lan

Lan (*Linum usitatissimum*) je prehrambena i tekstilna biljka, danas pretežno korištena za proizvodnju vlakana i lanenog ulja. Laneno se vlakno dobiva od jednogodišnjih zeljastih biljaka iz roda *Linum*, koji obuhvaća više od 200 vrsta. Biljke se uzgajaju u umjerenom klimatskom pojasu u čitavom svijetu. Za dobivanje vlakna najkorisniji je običan ili pravi lan (*Linum usitatissimum*) prikazan na slici 5.9. Udio vlakana u stabljici iznosi od 20 do 30 %. U kori je smješteno do četrdesetak svežnjeva vlakana, koji se protežu uzduž cijele stabljike i s njom su čvrsto vezana ljepljivim tvarima, tzv. vanjskim pektinima. Svaki se svežanj sastoji od otprilike 2000 elementarnih vlakana koja se po duljini, jedna na druga nadovezuju, a slijepljena su unutrašnjim pektinima. Svežanj slijepljenih elementarnih vlakana naziva se i



tehničko vlakno. Za izdvajanje vlakna iz stabljike potrebno je razgraditi vanjski pektin, što se može provesti biološkim, kemijskim i toplinsko-mehaničkim postupkom. Proces se provodi u mokroj sredini, pa se naziva močenje. Već prema uvjetima provedbe (temperatura, voda, rosa, dodatak kemikalija, enzima i dr.) močenje može trajati od 3 dana do nekoliko tjedana. Nakon močenja stabljike se suše, a zatim lome propuštanjem između rebrastih valjaka. Drvenasti se dio stabljike lako uklanja vijanjem i grebenanjem. Grebenanjem se vlakna i paraleliziraju pa se istodobno odvajaju dugačka od kratkih. Dugačka se vlakna vežu u svežnjiće, od kojih se načine pletenice i slažu u bale. Dobivena su vlakna nešto kraća od stabljike i dosežu duljinu do 900 mm. Produljenim se močenjem ona mogu dijeliti i cijepati u finija vlakna. Duljina tako stanjenih vlakana treba biti pogodna za pređenje i najčešće iznosi od 300 do 600 mm. Lanena se vlakna ubrajaju među najčvršća prirodna vlakna. Dugotrajnom upotrebom vlakna se i dalje stanjuju, tako da lanene tkanine postaju prozirne, zadržavajući još uvijek dovoljnu čvrstoću. Međutim, velika krutost i sklonost gužvanju ograničava njihovu prikladnost za odjevne predmete, ali se zato puno upotrebljavaju za izradbu postelnog platna, stolnjaka, ubrusa i krpa za brisanje. [25]



Slika 5.9. Cvijet lana [26]

Istraživanja su pokazala da upotrebom epoksidne matrice i lana kao ojačavala dobiva se kompozit više krutosti čija vrijednost iznosi oko 40 GPa i rastezne čvrstoće oko 280 MPa. Visoka rastezna čvrstoća prirodnih vlakana lana doprinosi povišenju rastezne čvrstoće kompozita povećavanjem volumnog udjela vlakana. Opaženo je da se rastezna čvrstoća i modul rasteznosti povisuju s povećanjem volumnog udjela vlakana ( 0 %, 10 %, 18 %, 20 % i

30 %). Charpyev test pokazao je da bi se uporabom vlakana lana značajno povisila žilavost kompozita. Ispitivanja su pokazala da su karakteristike proizvoda za sportske aktivnosti na snijegu znatno poboljšane uporabom lanenog vlakna. Lanena vlakna kao ojačavalo u biokompozitima rabljena su već tijekom Drugog svjetskog rata u izgradnji aviona tipa *Spitfire*. Danas takvi biokompoziti nalaze široku primjenu na području automobilske, avio i građevinske industrije. Mnogi proizvođači automobila ugrađuju biokompozite s lanenim vlaknima u svoje automobile. Ovi kompoziti posebno su prikladni za izradu unutarnjih dijelova automobila, npr. zamjenjuju staklena vlakna u kompozitima od kojih su izgrađeni unutarnji paneli vrata, pregradne police, nasloni sjedala, pokrov rezervne gume te ostale unutarnje presvlake. *Mercedes Benz* je staklenim vlaknima ojačane donje dijelove automobila zamijenio kombinacijom epoksidne smole i lanenih vlakana kao što je prikazano na slici 5.10. [27]



Slika 5.10 Donji dijelovi automobila ojačani lanenim vlaknima [28]

#### 5.1.2.5. Ramija

Ramijino se vlakno prikazano na slici 5.11 dobiva od ramije (*Boehmeria nivea*), biljke iz porodice kopriva koja raste pretežno u krajevima s toplijom klimom. Biljka potječe i najviše se uzgaja u Kini i Tajvanu, a u azijskim se krajevima ramijino vlakno zove kineska trava. Ono

što je lan za umjereni klimatski pojas i zapadnu polutku, to je ramija za istočnu polutku. Dobivanje vlakana naziva se dekortifikacija. Jednostavno se provodi mehaničkim struganjem ili tučenjem suhih stabljika, a napredniji je postupak obradba u otopini sode. Tehnička ramijina vlakna duga su oko 2 m. U toj se duljini prerađuju na prelačkim strojevima za svilu, a kao kraća vlakna na strojevima za preradu lanenog vlakna, vune, pa i pamučnog vlakna. Vlakna se skraćuju rezanjem ili grebenanjem i iščešljavanjem. Ramijina su vlakna bijela, sjajna, lako preradiva, te male elastičnosti. Smatraju se najčvršćim prirodnim vlaknima, a sastoji se od čiste celuloze. Od pamučnoga je čvršće oko osam puta, od lanenoga četiri puta, a od konopljina gotovo tri puta. Zbog visoke čvrstoće i trajnosti ramijina se vlakna upotrebljavaju za izradbu teške industrijske tkanine za namještaj i radnu odjeću, a od njih se izrađuju i ribarske mreže i čvrsti šivaći konac. [29]

Ramijinim vlaknima ojačani kompoziti imaju izuzetno visoku čvrstoću, a najbolja svojstva se postižu kombinacijom ramijinih vlakna i polipropilenske matrice ili epoksidne smole, od biopolimera najbolja svojstva se postižu u kombinaciji s polilaktičnom kiselinom (PLA). [30]



Slika 5.11. Vlakna ramije [31]

#### 5.1.2.6. Juta

U obliku vlakna dolazi u osam tipova, međutim, dvije vrste se najviše ističu. To su: *Corchorus olitorius* (tossa juta) i *Corchorus capsularies L.* (bijela juta). Najveći su proizvođači Indija, Pakistan i Bangladeš. Iako je juteno vlakno slabo, proizvodi se u velikim količinama u siromašnim krajevima (slika 5.12). Juta zahtijeva vruću i vlažnu klimu i doseže

visinu do 4,5 m, pa i više. Dobivanje vlakna slično je kao za lan i vlakna su građena poput lanenih, no puno su kraća, u prosjeku su duga između 1,5 i 120 mm. Jutena vlakna sadrže mnogo lignina (do 20 %), pretežno su gruba, krta i nesavitljiva. Najčešće se primjenjuju za proizvodnju vreća za transport, a u novije vrijeme i vreća za namirnice (slika 5.13). Osim za vreće, jutena se tkanina upotrebljava i kao podložna tkanina za izradbu višeslojnih jeftinih materijala kao što su linoleum i jeftini sagovi. Užad od jutenih vlakana nije tako čvrsta kao od ostalih vlakana. Od finijih se vlakana u malim količinama izrađuju tkanine za kućanstvo. [32] U kompozitima jutena vlakna najčešće zamjenjuju staklena vlakna kad nije temeljni zahtjev na materijal visoka čvrstoća. Prednosti tih kompozita su izuzetno niska cijena i gustoća, velika dostupnost materijala i mala potrošnja energije prilikom proizvodnje. [33]



Slika 5.12. Jutena vlakna [34]



Slika 5.13. Razgradive vrećice od jute [35]



#### 5.1.2.7. Kenaf

Kenaf (*Hibiscus cannabinus*) je jednogodišnja zeljasta biljka i ima do 3 m visoku stabljiku, prstaste gornje listove i velike žute ili crvene cvjetove. Raste u tropskoj Africi i Indiji (slika 5.14), a zbog vlakana, poznatih pod imenom javanska juta, gambo konoplja ili bombajska konoplja, uzgaja se u Indiji, Kini i Rusiji. Vlakno kenafa jače je od vlakna jute pa se često rabi mjesto nje. U kompozitima se najčešće upotrebljavaju kao ojačavalo kompozita s polimernom matricom, a može se upotrebiti i kao ojačavalo kod sendvič konstrukcija. Prije primjene vlakna se trebaju namakati u otopini natrijeva hidroksida pa zatim sušiti. Prilikom pripreme sendvič konstrukcije vlakna se umeću između filmova od poliestera i potrebno je napraviti pet takvih slojeva. Dobiveni kompozit ima izuzetno visoku rasteznu čvrstoću i modul elastičnosti. [36]



Slika 5.14. Plantaža kenafa u Indiji [37]

#### 5.1.2.8. Konoplja

Konoplja (*Cannabis sativa*) je poznata kao biljka za proizvodnju vlakana od prije oko 5 000 godina, a znatno kasnije kao ljekovita biljka za korištenje hašiša. Potječe iz srednje Azije. Nastala je od divlje konoplje koja je prevedena u kulturnu biljku. Ne ograničavaju ju klimatski uvjeti jer se izvanredno dobro prilagođava tlu i klimi mijenjanjem svojih morfoloških i fizioloških osobina. Konopljino se vlakno odlikuje visokom čvrstoćom,

elastičnošću, dugotrajnošću i postojanošću na vodu pa se upotrebljava za proizvodnju užadi, konopca, jedara, platna, izradu odjeće i obuće, cerada, šatora, ribarskih mreža, vatrogasnih cijevi i opreme, vreća, konjske sprežne opreme, itd. Muške biljke imaju veći postotak vlakna i vlakno im je bolje kakvoće od vlakna ženskih biljaka. Nakon dobivanja vlakna ostaje drvenasti dio stabljike koji se primjenjuje za izradu papira, celuloze, izolacijskog materijala te se upotrebljava i za ogrjev. [38]

Kanadska tvrtka *Motive Industries* 2010. godine je predstavila *Kestrel EV*, prototip električnog automobila s karoserijom izrađenom od biorazgradivog materijala na bazi konoplje (slika 5.15). Njegova snažna, a s druge strane vrlo lagana karoserija mogla bi biti revolucionarna za električna vozila. U usporedbi s automobilom slične veličine kao što je *Ford Fusion* koji teži oko 1800 kg, *Kestrel* teži samo 1100 kg uključujući bateriju. Mala masa automobila omogućuje jačanje učinkovitosti goriva za 25 do 30 %. [39]



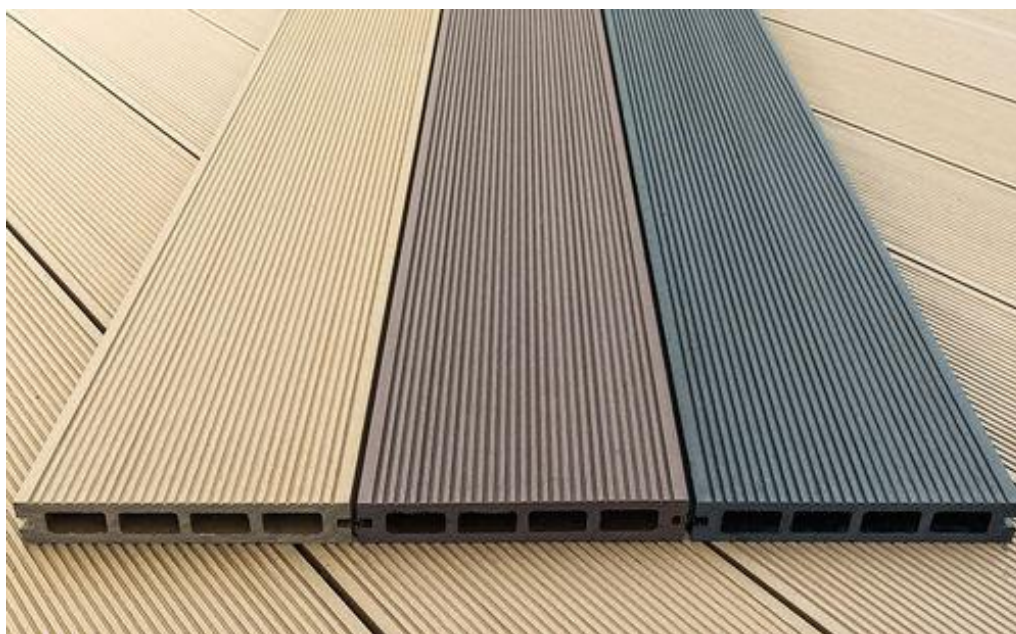
Slika 5.15. Električni automobil od biorazgradivog materijala na bazi konoplje [40]

#### 5.1.2.9. Drvo

Drvo se dijeli na dvije vrste ojačanja meko drvo (golosjemenjače) i tvrdo drvo (kritosjemenjače). Prednost vlakana je viša krutost, a nedostaci su smanjena otpornost na udarce i teže vezanje s polimerom. Da bi se poboljšala mehanička svojstva, odnosno dobio



drveno plastomerni kompozit (WPC) visokih performansi primjenjuju se drvena vlakna s većim omjerom dužina/debljina. Dužina drvnih vlakana varira u zavisnosti od vrste drveta. Kod listopadnog drveća se kreće oko 1 do 1,5 mm, a kod četinjarskog oko 3 do 3,5 mm. Dodavanjem vlakana umjesto drvnog brašna značajno se poboljšavaju mehanička svojstva (rastezna čvrstoća i žilavost). Međutim, probleme izrade WPC primjenom drvnih vlakana kao ojačavala predstavljaju otežano raspoređivanje vlakana u polimernoj matrici i smanjena mogućnost tečenja vlaknima ispunjenog polimernog materijala pri daljnjoj preradi. Drvena vlakna najčešće se dobivaju nekom od metoda mehaničkog ili kemijskog razdvajanja drveta. Drvo kao ojačavalo kod plastomera privuklo je pažnju svojom niskom cijenom i ekološkom prihvatljivošću, ali postoje neka ograničenja. Prvo se ograničenje odnosi na niže temperature prerade kao kod većine prirodnih vlakana granična temperatura razgradnje kreće se oko 200 °C. Moguće je postići i više temperature, ali kroz kraće vrijeme. To je ujedno i ograničenje za moguće upotrebljive plastomere. Izbor je uglavnom sveden na polipropilen (PP), poli(vinil-klorid) (PVC), polietilen (PE) i polistiren (PS). Ovi plastomeri čine približno 70 % ukupne proizvodnje polimera pa troše i značajne količine punila i ojačavala. Drugo ograničenje je upijanje vode prirodnih vlakana, njihova higroskopnost. Upijanje vode može uzrokovati bubrenje vlakana, što rezultira slabu dimenzijsku stabilnost. No kada je drveno vlakno omotano polimerom upijanje je vode minimalno. Primjena drveno plastičnih kompozita je široka, a najviše se upotrebljavaju u građevini, izradi namještaja, automobilske industriji, brodskim dijelovima, itd. [41] Primjer primjene prikazan je na slici 5.16.



Slika 5.16. Brodski pod od drveno plastomernog kompozita [42]

#### 5.1.2.10. Pamuk

Pamuk (*Gossypium sp.*) je biljka iz porodice sljezova (*Malvaceae*), koja obuhvaća 49 vrsta raširenih u tropskom i suptropskom području. Na slici 5.17 prikazana je biljka pamuk. U tropskim područjima pamuk je višegodišnja biljka, dok je u umjerenom klimatskom pojasu jednogodišnja. Najznačajnija je vrsta *G. hirsutum*, od koje se dobiva više od 90 % pamučnoga vlakna u svijetu. Ona potječe iz Meksika, a poznata je i kao srednjoamerički ili uplandski pamuk. Vodeći su proizvođači pamuka u svijetu: Kina, SAD, Indija, Pakistan, Uzbekistan, Turska, Brazil i Egipat. Prve četiri zemlje daju oko 66 % ukupne svjetske proizvodnje. U Europi se pamuk uzgaja u Grčkoj, Španjolskoj, Bugarskoj i Albaniji. Najveće prinose sirovoga vlakna ostvaruju: Izrael, Sirija, Grčka i Turska. [43] Slika 5.18 prikazuje berbu pamuka u Teksasu.



Slika 5.17. Pamuk [44]



Slika 5.18. Berba pamuka u Teksasu [45]

Na biljci se razlikuju neplodne i plodne grane. Količina sirovoga pamuka (vlakna i sjemeni) u jednom tobočku iznosi 3 do 11 g, ovisno o odlici i uvjetima uzgoja. Kod vrste *G. hirsutum* iskorištenje je vlakna 35 do 40 %. Srednja je duljina vlakna između 20 i 35 mm. Pamuk je biljka kratkoga dana, traži mnogo topline i sunčane svjetlosti te rahlo tlo. Svi plodovi pamuka ne sazrijevaju istodobno pa se zreo pamuk bere u više navrata, obično tri puta. Kako bi se smanjio udjel nečistoća i povećala učinkovitost strojne berbe, usjev se prije berbe tretira kemijskim sredstvima (defolijantima), koja uzrokuju sušenje i otpadanje listova. Pamučno se vlakno u većine raširenih vrsta pamuka sastoji od dviju vrsta dlačica: kratkih, duljine nekoliko milimetara (e. *linters* ili *fuzz*), i dugih, duljine više centimetara (e. *lint*). Iznimku čini vrsta *G. barbadense*, koja nema kratkih dlačica, nego samo dugačke. Pamuk daje odmah gotovo vlakno pa treba samo strojno odvojiti vlakanca od sjemenki (egreniranje). Da bi se to obavilo, pamuk ne smije zadržavati više od 10 % vlage. Najprije se skida dugačko vlakno, a zatim, kemijskim postupkom ili posebnim strojevima kratko vlakno. Od 100 kg sirovoga pamuka dobiva se oko 32 kg dugoga vlakna, 1 kg kratkoga vlakna i 67 kg sjemeni. Sjeme pamuka sadrži 18 do 20 % ulja, koje se upotrebljava za izradbu sapuna, stearina i glicerina, a rafinirano se upotrebljava kao jestivo ulje, ulje za konzerviranje te za proizvodnju margarina i majoneze. Nakon ekstrakcije ulja ostaju pogače i sačma, koje se upotrebljavaju kao koncentrirano krmivo za goveda. U svijetu je 2003. bilo proizvedeno 56 097 000 tone sjemeni pa je ono po količini jedno od najvažnijih sirovina za proizvodnju biljnih ulja. [43]

Pojedinačno vlakno pamuka čini jedna izdužena stanica, koja izbija iz epidermalnoga sloja ljuske sjemenca. Osnovni je dio vlakna celuloza. Vrijednost pamuka određuje se prema duljini i jednoličnosti vlakna, promjeru (širini), finoći, elastičnosti, gipkosti, vijugavosti, zrelosti, čvrstoći, sjaju, boji i drugim svojstvima. Za upotrebu pamuka kao tekstilnog vlakna najvažnija je duljina i širina, odnosno finoća vlakna. Vlakno je najčešće dugo između 20 i 40 mm. Najduže je kod pamuka vrste *G. barbadense*, a najkraće kod vrsta *G. herbaceum* i *G. arboreum*. Promjer je vlakna između 12 i 20  $\mu\text{m}$ . O zrelosti vlakna ovisi njegova jačina, vijugavost, finoća i boja. Sazrijevanje vlakna traje oko 25 dana i završava otvaranjem tobolca. Tijekom zrenja vlakno gubi vodu, postaje plosnato i uvija se oko svoje osi oblikujući vijuge po cijeloj duljini. Ako su u vrijeme stvaranja i odlaganja celuloze, odnosno sazrijevanja vlakna, vanjski uvjeti bili nepovoljni, vlakno ostaje tankih stijenki, ravno i bez vijuga. Takvo vlakno smatra se nezrelim i "mrtvim", a veće količine takvih vlakana u masi pamuka negativno utječu na kakvoću proizvoda (nejednoličnost pređe i boje, mala čvrstoća, čvorići u pređi i dr.). Zbog toga se debljina stijenki i vijugavost vlakna uzimaju kao obilježja njegove zrelosti. [43]

Prilikom proizvodnje kompozita najčešće se proizvode kompoziti s poliesterskom matricom zato što je poliester jeftin, lako se obrađuje i očvršćuje i ima dobra mehanička svojstva kada je ojačan vlaknima i punilima. Dodatak pamučnih vlakana u polimere snižava granicu razvlačenja, prekidnu istezljivost i žilavost, a povisuje modul elastičnosti. Međutim, nedostatak ovih kompozita je loša adhezija između vlakana i matrice zbog hidrofilnosti vlakana što može rezultirati lošijim svojstvima, ali to se sprječava primjenom raznih kompatibilizatora ili kemijskim procesima. Kompoziti ojačani vlaknima pamuka se najviše upotrebljavaju u automobilske industriji kao unutrašnjost automobila, kabinama kamiona, dijelovima opreme, ploče vrata i sl. Također se upotrebljavaju za termo-akustičnu izolaciju. [46]

#### 5.1.2.11. Kapok

Kapok (*Ceiba pentandra*) je drvo iz porodice *Bombacaceae*, visoko do 30 m (slika 5.19). Potječe iz tropske Amerike, a uzgaja se u tropskoj Africi, Novoj Gvineji, na Javi, u Indiji i Šri Lanki. Stablo kapok daje stotine plodova s crnim sjemenkama iz kojih idu žuta vlakna. Prosječne duljine vlakana kapoka su između 130 i 160 mm. Vlakna kapoka sastoje se od 38,09 % celuloze, 14,09 % lignina i 2,34 % voska. U usporedbi s pamučnim vlaknima, vlakna kapoka su puno mekanija i lakša. Kompoziti ojačani vlaknima kapoka isto kao i kod



pamučnih vlakana najčešće imaju polimerne matrice, a najbolja svojstva daju s epoksidnom smolom i polipropilenom. [47]



Slika 5.19. Kapok [48]

#### 5.1.2.12. Pšenična slama

Pšenična (*Triticum aestivum* L.) vlakna su obilan i najjeftiniji resurs za proizvodnju kompozita. U cilju smanjenja odlaganja i problema širenja ugljikovog dioksida bilo je potrebno pronaći rješenje iskorištavanja pšenice u potpunosti, a ne samo njezinog gornjeg dijela odnosno klasa. Pšenična slama (slika 5.20) je bogat izvor vlakana, koji se sastoje od celuloze i lignina. Iako je sadržaj celuloze u pšeničnoj slami manji nego u drvenim vlaknima, istraživanja su pokazala da se slama ipak može primijeniti kao alternativa drvenim i ostalim prirodnim vlaknima u kompozitima s polimernim matricama u slučaju želje za ekonomičnijim pristupom. [49]

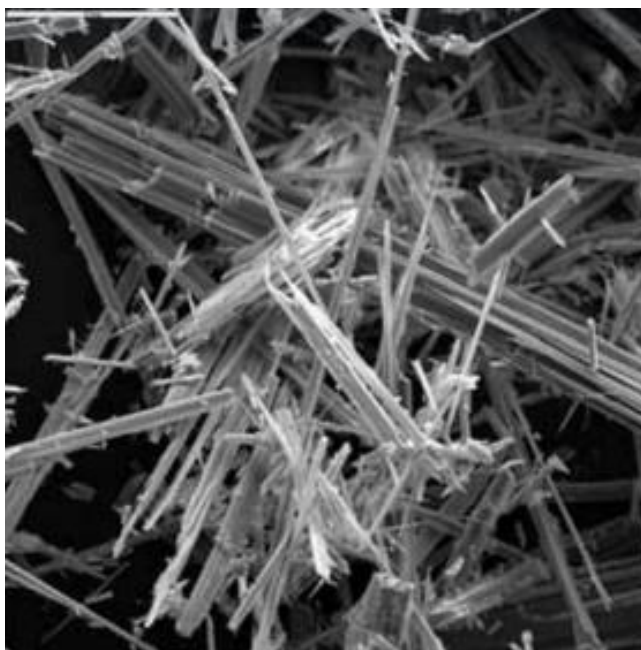


Slika 5.20. Pšenična slama [50]

### 5.1.3. Mineralna vlakna

#### 5.1.3.1. Azbest

Azbest je grupa minerala (silikata) koji izgledaju poput tankih vlakana. Riječ azbest potječe iz grčkog jezika, a znači negasivo ili neuništivo. Ova vlakna su sitna i igličasta (slika 5.21) i mogu se vidjeti samo mikroskopom. Ako se azbestna vlakna nađu u zraku, mogu se udahnuti i ući u pluća, te pri dugotrajnom izlaganju izazvati rak pluća i druge plućne bolesti. Azbest se može nalaziti u prirodi i u proizvodima koje stvara čovjek. U prirodi azbest je mineral koji je dio stijena i tla, a ukoliko dospije u zrak (primjerice vremenskim prilikama ili kod gradnje) može postati prijetnja po zdravlje. Međutim, ukoliko se prirodni azbest „ne dira“ i ne dospije u zrak, on je praktički bezopasan. S obzirom da je azbest dobar izolator elektriciteta, mehaničkih sila, zraka, topline i postojan je na koroziju, toplinu i većinu kemikalija, smatra se da svoju primjenu nalazi u oko 3.000 proizvoda (npr. žbuka s azbestom, izolacija cijevi, azbestne pločice, azbestno-cementne vodovodne cijevi, protupožarna vrata, azbestne brtve). Bilo koja zgrada sagrađena prije 2000. godine (kuće, škole, tvornice, bolnice, itd.) može sadržavati azbest. Azbest se upotrebljavao kao ojačavalo kod automobilskih kočnica, spojki i brtvi, ali ih u novije vrijeme zamjenjuju aramidni kompoziti jer je u nekim državama zabranjena primjena azbesta. [51]



Slika 5.21. Azbestna vlakna [52]

## 5.2. Prirodne čestice

### 5.2.1. Ljuske jajeta

Jedna od velikih ekoloških nepravilnosti, koja je univerzalno rasprostranjena je ljuska pilećih jaja. To je nusproizvod u uzgoju, posebno u onim zemljama u kojima je proizvodnja jaja dobro razvijena. Oko 150 000 tona ovog materijala ostavlja se na odlagališta samo u Sjedinjenim Američkim Državama. Ljuska jaja sadrži oko 95 % kalcijevog karbonata u obliku kalcita i 5 % organskih materijala poput kolagena tipa X, sulfata polisaharida i drugih proteina. Ljuske jajeta karakterizira mala masa i gustoća, osim toga imaju nisku cijenu i lako su dostupne pa se zbog toga primjenjuju kao ojačavala u kompozitima u automobilske industriji, kamionima, dijelovima namještaja, itd. Prije proizvodnje kompozita ljuske jaja se skupljaju, peru i suše na suncu da bi se uklonile membrane. Zatim se usitnjavaju pa nakon toga prolaze kroz skup sita kako bi se dobio prah odnosno sitne čestice prikazane na slici 5.22. Kao matrice najviše se primjenjuje polipropilen i epoksidna smola. [53]



Slika 5.22. Prah dobiven usitnjavanjem ljuske jajeta [53]

### 5.2.2. Ljuske (školjke) od kokosa

Kokosov prah dobiva se od školjke kokosa - ljuske organske prirode. Budući da ima dobra svojstva kao što su trajnost, visoku žilavost i otpornost na abraziju, pogodan je za dugotrajnu upotrebu. Kemijski sastav ljuske sličan je kemijskom sastavu tvrdog drveta, iako je sadržaj lignina veći, a sadržaj celuloze manji. Da bi se proizveo prah od kokosove ljuske, ljuske potpuno sazrelih plodova prvo se očiste od prijanjajuće jezgre i slome u male komadiće. Ti se

komadići zatim podvrgavaju mljevenju u mlinovima za mljevenje, a mljevena masa nakon toga prolazi vibracijska sita s mrežicom od fosforne bronce. Kokosov se prah kao ojačavalo primjenjuje u polimernim matricama, kao na primjer matrici od polietilena visoke gustoće. Istraživanja su pokazala da se tvrdoća kompozita povisuje s povećanjem sadržaja praha, a žilavost, duktilnost i gustoća kompozita se smanjuju. [54]

### **5.2.3. Drvno brašno**

Drvno brašno ili piljevina najviše se upotrebljava prilikom proizvodnje drvno plastomernih kompozita. Priprema drvnog brašna od drvnog otpada se sastoji od usitnjavanja, širenja i sušenja, kako bi postalo pogodno za sjedinjavanje s polimerom. Materijal koji se najviše primjenjuje za ovaj postupak dolazi iz industrije namještaja i predstavlja strugotinu koja je usitnjena u mlinovima. Veličina čestice su od 250 do 400  $\mu\text{m}$ . [55]

### **5.2.4. Ljuska od riže**

Riža (*Oryza sativa L.*) primarni je izvor hrane u svijetu. Pokriva oko 1 % zemljine površine i statistički podaci pokazuju da je u razdoblju od 2010. do 2013. prosječna godišnja globalna proizvodnja riže iznosila 10 milijuna tona, a samo u Aziji proizvedeno je preko 90 % ukupne globalne proizvodnje riže. Svaka tona riže ima oko 0,23 tone ljusaka. [56]

Ljuska od riže prirodni je omotač koji se formira oko zrna riže tijekom njegova rasta. Može se primijeniti kao ojačavalo u kompozitnim materijalima s različitim polimernim matricama. Ljuska od riže u polimernim matricama daje povoljne karakteristike kao što su biorazgradivost, mala masa, dobra žilavost i postojanost na vremenske uvjete, a također čini konačne proizvode ekonomski prihvatljivijima u usporedbi sa sintetičkim česticama. U odnosu na kompozite s drvnim brašnom, polimerni kompoziti punjeni ljuskom od riže imaju veću postojanost na termite i biološki napade. Još jedna prednost je bolja dimenzionalna stabilnost nakon izlaganja vlazi. Zbog ovih svojstava ovi se kompoziti sve više primjenjuju u građevinarstvu (okviri za prozore i vrata, klizni zidovi, palube, unutarnje ploče, itd.) te u automobilskoj industriji za dijelove interijera poput ploča vrata. Nedostatak primjene ljuska od riže je loša interakcija između ljusaka i materijala matrice što rezultira lošom adhezijom između čestica i matrice. [56]



### 5.2.5. Ljuske od badema

Ljuske badema su prirodni ligno-celulozni materijali koji tvore ljusku ploda badema koji se odvaja u procesu vađenja jestivog dijela. Prilikom vađenja bademovih sjemenki, koje se primjenjuju u prehrambene i kozmetičke svrhe, ljuske se odbacuju ili spale i nisu industrijski značajne (imaju nisku kalorijsku vrijednost). Iz tog razloga ljuske se usitnjavaju i primjenjuju kao ojačavala u kompozitnim materijalima. Ojačavanjem epoksidne smole česticama bademovih ljuski dolazi do porasta žilavosti i smanjenja gustoće kompozitnog materijala. Osim ljusaka badema, mogu se primijeniti i ljuske lješnjaka i oraħa. [57]

Na slici 5.23 su prikazane ljuske od kokosa, oraħa i riħe, a na slici 5.24 prah dobiven usitnjavanjem tih ljusaka.



Slika 5.23. Ljuske od kokosa, oraħa i riħe [58]



Slika 5.24. Prah od ljuska kokosa, oraħa i riħe [58]

## 6. PRIRODNE MATRICE

Kao prirodne matrice najčešće se upotrebljavaju smole i polimeri na prirodnoj bazi (biopolimeri). Zbog visokih cijena sirove nafte i želje da se izbjegne zagađivanje odlaganjem, razvoj polimera iz obnovljivih izvora posljednjih godina postoje sve popularniji i daje mu se sve veći značaj. Tipični izvori iz kojih se dobivaju polimeri i smole na prirodnoj bazi su prirodna ulja i škrob. Najveći pokazatelj brzine širenja i primjene prirodnih polimera i smola je to što je na tržištu tijekom 2012. godine bilo oko 1,4 milijuna tona, a 2017. više od 6,2 milijuna tona prirodnih polimera. Važno je napomenuti da biorazgradivi polimeri nisu isto što i biopolimeri. Naime biorazgradivi polimeri se dijele u dvije skupine: prirodni polimeri koji se dobivaju iz prirodnih izvora i sintetski polimeri koji se dobivaju iz nafte. To znači da ako je polimer biorazgradiv ne znači nužno da je i prirodan dok prirodni polimer je uvijek biorazgradiv. [59]

Nadalje prirodni polimeri se dijele na: [60]

- Prirodni polimeri izravno izdvojeni iz prirodne mase: polisaharidi (škrob, celuloza, vlakna, hitin i hitozan) i polipeptidi (pšenični gluten, protein soje, kolagen i želatina)
- Prirodni polimeri proizvedeni direktno iz prirode ili genetski modificiranih organizama: mikrobnj poliesteri (PHA, PHB, PCL), prirodni polimeri sintetizirani iz bio-derivatnih monomera (PLA, PGA) i bakterijska celuloza.

### 6.1. Škrobni biopolimer

Škrob se kao prirodni materijal može dobiti iz kukuruza, riže, krumpira, pšenice te se upotrebljava kod proizvodnje prirodnih polimera zbog svoje niske cijene i lake dostupnosti. Polimeri na bazi škroba su osjetljivi na vodu, veoma krhki te imaju lošu toplinsku stabilnost. Na te nedostatke se može lako utjecati hidrofobnom modifikacijom (npr. acetilacijom) i primjenom plastifikatora. Acetelacijom se smanjuje lomljivost, a povisuje istezljivost i čvrstoća. Za plastificiranje se upotrebljava hidroksipropil za stvaranje dugih alkilnih lanaca (unutarnje plastificiranje) ili triacetin (TriAc) i trietil citrat (TEC) (vanjska plastifikacija). Tako se smanjuje osjetljivost na vodu, smanjuje temperatura staklenog prijelaza ( $T_g$ ) i omogućuje se lakše obrađivanje škroba. Škrobni biopolimeri imaju nisku čvrstoću u odnosu na polipropilen ili polietilen, stoga se ne mogu upotrebljavati za proizvodnju kod koje se

zahtijevaju dobra mehanička svojstva proizvoda. Iz tog razloga se u škrobne polimere dodavaju prirodna vlakna. [59]

## 6.2. Celulozni biopolimeri

Celuloza je najrašireniji organski spoj u prirodi. Prisutna je u svim biljkama i čini njihovu kompletnu strukturu. Mekši dijelovi biljnih tijela uglavnom se sastoje od celuloze, a upravo zahvaljujući njoj biljke su savitljive. Gotovo sve zelene biljke proizvode celulozu, koja se sastoji od skoro istih elemenata kao i šećer, tj. od ugljika, vodika i kisika, odnosno od tvari koje se nalaze u vodi i u zraku. Celuloza je bijela vlaknasta tvar, koja nije topljiva u vodi i organskim otapalima, glavni sastojak staničnih stijenki biljaka. Udio celuloze u drvu je od 40 do 50 %, a pamuk i laneno vlakno sadrže preko 90 % celuloze. Za izradu polimera na bazi celuloze se zapravo upotrebljava bijeli prah dobiven acetilcelulozom, esterifikacijom celuloze smjesom octene kiseline i acetanhidrida. [59]

## 6.3. Sojin protein

Sojin protein se u prirodi može pronaći u velikim količinama, ima nisku cijenu te kao obnovljiv izvor biopolimera ima veliki potencijal zamijeniti petrokemijske polimere u različitim primjenama. Sojin protein je komercijalno dostupan u tri oblika koncentracije te se u prehrambenoj industriji, ovisno o sadržaju proteina, dijeli na: sojino brašno, koncentrat soje i sojin izolat. Najznačajnija primjena zrna soje je u prehrambenoj industriji jer služi kao izvor ulja, dok se protein soje koncentrira i izolira odmah u industrijskoj proizvodnji ulja kao dodatni produkt. Sojin protein je netopiv te ga je nemoguće obraditi u obliku plastomera ukoliko se ne primjeni dovoljna količina plastifikatora kao što su npr. voda, glicerol, etilen, glikol, sorbitol, itd. Uporabom veće količine plastifikatora mogu se postići niske vrijednosti mehaničkih svojstava polimera od sojinog proteina. Kada plastifikatori ishlape iz polimera sa sojinim proteinom tijekom skladištenja ili uporabe, materijal postaje vrlo krhak. Štoviše, djelovanje plastifikatora dovodi do niske postojanosti na vlagu polimera temeljenog na sojinom proteinom. Miješanjem sojinog proteina s biorazgradivim polimerima je rješenje kojim se savladava prethodno spomenuti nedostaci. Polikaprolakton (PCL), polilaktična kiselina (PLA), polibutilen sukcinat (PBSA) i poli(tetrametilen adipat-ko-tereftalat) (PTAT) predstavljaju biorazgradive polimere koji se najčešće upotrebljavaju u kombinaciji sa sojinim proteinom. [60]

#### 6.4. PHA

PHA ili poli(hidroksi – alkanoat) se dobiva bakterijskom fermentacijom ugljikohidrata i lipida. Postoji preko 90 različitih vrsta PHA koji se sastoje od različitih monomera. Neki PHA se ponašaju slično konvencionalnoj plastici kao što su polietilen i polipropilen, dok su drugi elastomeri. PHA ima obećavajući potencijal za primjenu kao ambalažni materijali za pakiranje hrane, ali s obzirom na visoke troškove proizvodnje, samo nekoliko dobavljača postoji na tržištu. Osim za ambalažu primjenjuju se za izradu ortopedskih pomagala, umjetnih kukova i ligamenata. [60]

#### 6.5. PHB

PHB ili poli(3-hidroksi-butirat) pripada kratko lančanim PHA s monomerima koji sadrže 4 - 5 ugljikova atoma. Trenutna tehnologija proizvodnje nije u mogućnosti da proizvede PHB koji bi bio konkurentan konvencionalnim plastikama kao što su polietilen, polipropilen ili polistiren, te je stoga primjena PHB kao ekološki prihvatljivog materijala za pakiranje još uvijek nerealna. Zbog toga se PHB miješa s drugim polimerima, enzimima i raznim ojačavalima te tako mogu rezultirati novim svojstvima i novim primjenama PHB-a. PHB ima malu toksičnost, zbog toga što se razgrađuje u kiselinu, koja je normalni sastojak ljudske krvi. Istraživanja usmjerena na primjenu ovih polimera uključuju kontrolirano otpuštanje lijeka, umjetnu kožu i srčane zaliske kao i industrijsku primjenu medicinskog potrošnog materijala. [60]

#### 6.6. PLA

PLA ili poliaktid biorazgradivi je plastomerni poliester. U zadnjih nekoliko desetljeća intenzivno se istražuje da bi zamijenio klasične polimere dobivene iz fosilnih goriva, s jednakim ili boljim kemijskim, mehaničkim i biološkim svojstvima. Budući da se ubraja u skupinu poliestera, dakle biorazgradivu plastiku koja ima potencijalno hidrolizirajuće veze, PLA može konkurirati petrokemijski dobivenim polimerima. Laktidi iz kojih se proizvodi PLA mogu se dobiti mikrobiološkom fermentacijom poljoprivrednih nusproizvoda, uglavnom iz tvari koje su bogate ugljikovodicima. [60]

## 7. SINTETIČKE MATRICE

Iako se teži postići primjena kompozita ojačanih prirodnim ojačalima umetnutih u prirodne matrice, nažalost te kombinacije nisu dovoljno dobro istražene i ispitane pa se najčešće kombiniraju prirodna vlakna i sintetičke matrice. To su najčešće biološki nerazgradivi polimeri nastali derivacijama nafte, duromeri (epoksidna smola, fenolna smola) i plastomeri (PE, PP, PVC, PS).

### 7.1. Epoksidna smola

Epoksidne smole se primjenjuju kao matrice u kompozitima zbog jednostavne primjene, relativno niske cijene, zbog svojih izvrsnih mehaničkih svojstava, dobre kemijske postojanosti, te zadržavanja dobrih mehaničkih svojstava i dimenzija pri povišenoj temperaturi i vlazi. Nadalje, dobro reagiraju (ostvaruju dobru adheziju) s većinom vrsta vlakana tako i prirodnim. Budući da pri proizvodnji prolaze kroz period vrlo niske viskoznosti, to omogućava da se mogu prerađivati mnogim postupcima prerade. Epoksidi su najčešće dvokomponentni, pri čemu se u procesu proizvodnje dodaje umreživalo koji postaje sastavni dio strukture matrice. Nakon miješanja epoksida i umreživala, pod djelovanjem topline dolazi do očvršćivanja, što se događa nekoliko sati. Konačna svojstva epoksidne matrice pokazuju izrazitu krhkost, što dovodi do znatne osjetljivosti obzirom na pojavu pukotina. Još neki nedostaci su viša cijena proizvodnje u odnosu na npr. poliestere (posebice specijalne vrste epoksida koje se primjenjuju u zrakoplovstvu), osjetljivost na vlagu, spora polimerizacija, mala postojanost na neke organske spojeve (npr. organskim kiselinama i fenolima) te relativno niska temperatura primjene. Glavne prednosti epoksida jesu mogućnost modificiranja svojstava prema postavljenim zahtjevima, mogućnost kontrole žilavosti te lagana i sigurna proizvodljivost zbog male količine štetnih tvari koje se pri tome oslobađaju, dobra kemijska postojanost te dobra dimenzijska i toplinska stabilnost. Epoksidi se primjenjuju u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji, na primjer kod zrakoplovnih dijelova izloženih visokim temperaturama i vlazi kao što su APU vrata i aerodinamičko kućište motora, odnosno gondola oko motora poznatija kao "engine nacell". [61]

## 7.2. Fenolna smola

Fenolne smole nastaju polimerizacijom fenola uz pomoć npr. formaldehida pod posebnim uvjetima. Ovi polimeri iskazuju dobru postojanost visokim temperaturama kao i postojanost pri gorenju, koja je posljedica ablativnih svojstava ovih smola (pri gorenju, izgaraju slojevi materijala određenom brzinom stvarajući sloj ugljika, što im i jest najveća prednost pri upotrebi). Nedostaci su visoki tlakovi kod proizvodnje, potrebni za polimerizaciju kao i velik postotak šupljina, što znatno snižava mehanička svojstva. Fenolne smole imaju zadovoljavajuća svojstva i čine 95 % panela u interijeru zrakoplova, a primjenjuju se i za električne sustave. [61]

## 7.3. Polietilen (PE)

PE je jedan od prvih sintetiziranih polimera koji se dobiva iz monomera etilena, a etilen se dobiva rafinacijom nafte u petrokemijskoj industriji te se zbog toga ovaj polimer svrstava u tradicionalne polimere na osnovi petrokemikalija. PE ima najjednostavniju strukturu od svih polimera te se smatra najjednostavnijim poliugljikovodikom. To je žilav materijal, voskastog izgleda i nepotpune prozirnosti s velikim modulom elastičnosti. PE se danas svakodnevno upotrebljava, najviše u obliku filmova i folija (vrećice), kao ambalažni materijal, za izradu cijevi, dječjih igrački i mnogih drugih proizvoda s kojima smo stalno u doticaju pa iz tog razloga ima veliki udio u svakidašnjem otpadu. Polietilen se može prerađivati svim glavnim postupcima prerade plastomera. Najviše se primjenjuje ekstrudiranje, puhanje, injekcijsko prešanje i rotacijsko lijevanje. Temperatura prerade polietilena obično je u rasponu od 180 do 280°C. Najveći nedostatak polietilena kao materijala je njegovo svojstvo trajnosti kada postaje otpad, a ujedno je to i njegova najveća prednost kada se komercijalno primjenjuje kao ambalažni materijal, ali i u ostalim područjima. PE se jako sporo razgrađuje i to predstavlja problem nakon odlaganja. Naime, metode odlaganja takvog materijala su ograničavajuće: spaljivanje takve plastike uzrokuje zagađenje zraka, a zadovoljavajuća odlagališta imaju svoje ograničene kapacitete koji se polako popunjuju. Danas je ekološki prihvatljivo jedino recikliranje (najčešće mehaničko), ali ovaj je ne omogućuje zbrinjavanje velike količine plastike odjednom. Ovaj problem je moguće riješiti tako da se tradicionalna plastika učini biorazgradivom određenim postupcima. Osim petrokemijskog polietilena sve više se proizvodi polietilen na bioosnovi s istim kemijskim, fizičkim i mehaničkim svojstvima. Također, polietilen na bioosnovi nije biorazgradiv, ali je pogodan za mehaničko recikliranje. Polietilen na bioosnovi može se proizvesti od šećerne trske ili od kukuruznog škroba, pšenice ili drugih žitarica. Sok dobiven mljevenjem šećerne trske ima oko 12 % saharoze i fermentira

se u etanol bez prisustva kisika. Dobiveni etanol se destilira te se dobiva hidroetanol koji se dehidrira pri visokim temperaturama uz katalizatore kako bi se dobio etilen, monomer za proizvodnju polietilena. Ovaj postupak proizvodnje polietilena je pogodan uslijed porasta cijene nafte i smanjenja izvora nafte za proizvodnju polietilena na osnovi petrokemikalija. [62]

#### 7.4. Polipropilen (PP)

Polipropilen (PP) je dobiven polimerizacijom propilen monomera. PP je jedan od najčešće rabljenih polimera koji ima nekoliko prednosti, uključujući dobra mehanička svojstva, dobru korozijsku postojanost, postojanost na vremenske uvjete, malu masu i nisku cijenu. Mala masa i dobra mehanička svojstva PP, čine ga idealnim materijalom u automobilske industriji. Međutim, PP nije biorazgradiv i zbog toga je on značajan dio otpada koji izaziva povećanu štetu za okoliš. Uporabom prirodnih vlakana i PP u ulozi matrice čini ovaj polimerni kompozit ekološki prihvatljivijim u usporedbi s čistim polipropilenom. Prirodna vlakna kao što su vlakna lana i konoplja odlično zamjenjuju staklena vlakna u PP matricama. Osim njih bambusova vlakna se također primjenjuju u polipropilenskoj matrici s ciljem da se proizvede jako lagan kompozit. Mala masa takvih kompozita prikladna je za primjenu u proizvodnji ploča za pokrivanje krovova i profila za građevinsku industriju gdje je smanjenje mase jedan od glavnih konstrukcijskih zahtjeva. Kompozit napravljen od bambusovih vlakana kao ojačavala i polipropilenske matrice ima niz prednosti uključujući visoku savojnu čvrstoću, visoka akustična svojstva i dobro prigušenje zvuka. [63]

#### 7.5. Poli (vinil-klorid) (PVC)

Svojstva PVC-a mogu se mijenjati ugradnjom drugih monomera tijekom polimerizacije, npr. vinil-acetata ili viniliden-klorida ili dodatkom različitih stabilizatora, omekšavala (plastifikatora) i punila. Tako je poznato više od stotinu modifikacija PVC-a u širokom rasponu svojstava, među kojima su kruti i savitljivi poli(vinil-klorid) dvije temeljne vrste. Zahvaljujući širokoj primjeni potrošnja mu stalno raste. Kruti poli(vinil-klorid) je proziran, tvrd, žilav i teško prerađljiv materijal, vrlo postojan na utjecaj atmosfere i kemikalija. Izrazito je krto, što se otklanja kopolimerizacijom, npr. s vinil-acetatom, a potom miješanjem s drugim polimerima, npr. poliakrilatima. Savitljivi poli(vinil-klorid) sadrži 20 do 30 % omekšavala (najčešće estera dikarboksilnih kiselina, npr. dioktil-ftalata) i lako se prerađuje. S povećanjem udjela omekšavala smanjuju se prekidna čvrstoća, modul elastičnosti i staklište, a povećava se prekidno istezanje i udarna žilavost te poboljšavaju ukupna mehanička svojstva pri nižim

temperaturama. Poli(vinil-klorid) se najviše prerađuje ekstrudiranjem i kalandriranjem te injekcijskim prešanjem, puhanjem i podtlačnim oblikovanjem. Ima mnogostruku primjenu, ponajprije u građevinarstvu za izradbu prozorskih okvira, oluka, roleta, tapeta, podnoga linoleuma, odvodnih cjevovoda, boca, ambalaže za lijekove i kozmetiku, a zbog male propusnosti na vlagu i plinove rabi se u obliku folija za pakiranje živežnih namirnica. Dobrih je električnih izolacijskih svojstava pa u elektroindustriji služi za izradbu kućišta, a najviše za izolaciju električnih kabela. Od prirodnih vlakana najčešće se koriste konoplja i to sitno narezana u PVC matricama i od takvog kompozita se mogu napraviti dijelovi namještaja, stalci, vaze, posude itd. [64]

## 7.6. Polistiren PS

Dobiva se radikalskom polimerizacijom stirena. Svojstva polistirena: vrlo je inertan, otporan je na kiseline i lužine, lako se otapa u kloriranim i aromatskim organskim otapalima, ima visoku čvrstoću (46 – 55 MPa), nisku elastičnost (isteže se 3 – 4%), dobra toplinska postojanost, dobra električna izolacijska svojstva, veliku optičku prozirnost, dobru prerađljivost i nisku cijenu. Zbog dobre postojanosti ima široku primjenu: ambalaža, posuđe, građevinarstvo, automobilska industrija, itd. Glavni nedostaci su to što je lomljiv i niske žilavosti. To se može ispraviti miješanjem s drugim polimerima, dodatkom punila ili stabilizatora. Osim toga svojstva polistirena, odnosno kompozita s matricom od polistirena se poboljšavaju dodavanjem prirodnih vlakana, ali često i prirodnih čestica. Dodatak čestica u krhku matricu polistirena omogućuje uporabu tog kompozita i uz udarna opterećenja. [65]

Usporedba svojstava nekih od navedenih materijala matrice dana je u tablici 7.1.

Tablica 7.1. Mehanička svojstva materijala matrice [61]

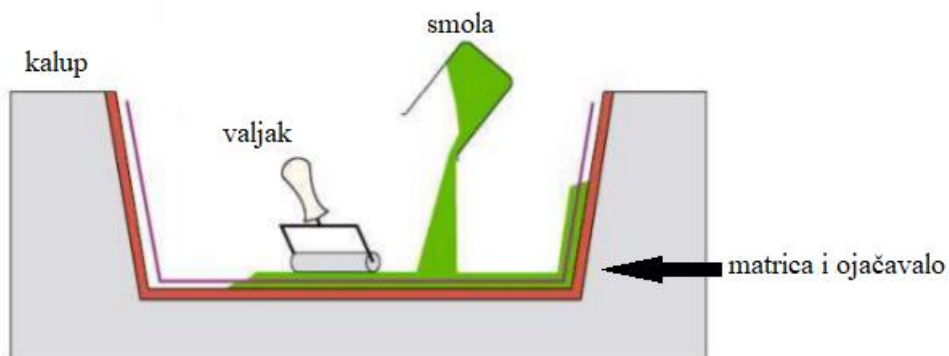
| Tip matrice | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $E$ (Gpa) | $\sigma$ ( Mpa) | $\varepsilon$ (%) | $\alpha$ (10 <sup>-6</sup> /°C) | $T_g$ (°C) |
|-------------|-----------------------------|-----------|-----------------|-------------------|---------------------------------|------------|
| Epoksid     | 1400                        | 6         | 130             | 8,5               | 70                              | 250        |
| PS          | 1240                        | 2,5       | 70-75           | 50-100            | 56-100                          | 190        |
| PP          | 900                         | 1-1,4     | 25-38           | 300               | 110                             | -20 – (-5) |
| PE          | 1500                        | 4,5       | 90              | 5                 | 200                             | 110        |



## 8. PROIZVODNJA PRIRODNIH KOMPOZITA

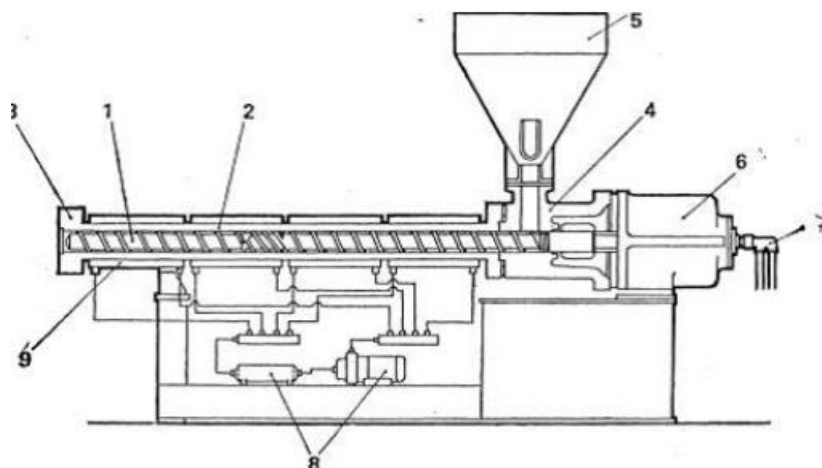
U plastičarskoj industriji kao dodatak polimerima pretežno se rabio talk, kalcijev karbonat, tinjac te staklena i ugljikova vlakna. Godišnje se trošilo oko 2,5 milijuna tona tih dodataka i ojačavala. Postojao je svojevrсни otpor prerađivača prema uporabi prirodnih vlakana, ponajviše zbog njihove velike nasipne gustoće, niske toplinske postojanosti i sklonosti prema upijanju vode, te neprikladnosti opreme za preradbu kompozita s prirodnim vlaknima. Do značajne je promjene došlo zadnjih desetak godina. Veće je poznavanje svojstava prirodnih vlakana u plastičarskoj industriji, razvijena je nova oprema za preradbu polimera ojačanih prirodnim vlaknima, a postoje i bolja veziva. Sve je to povećalo interes plastičarske industrije za preradbu tih kompozita.

Najjednostavniji i najstariji postupak proizvodnje kompozita općenito je ručno polaganje prikazano slikom 8.1. Vlakna povezana u tkanja različitog oblika stavljaju se u donju polovicu kalupa. Na njih se nanosi smola koja se impregnira u ojačavala pomoću valjaka ili kistova. Do skrućivanja dolazi pri atmosferskim uvjetima. Prednosti su ovog postupka su jednostavnost, mali trošak izrade alata (jer postoji samo donja polovica kalupa), veliki izbor vrsti materijala (moguće je preraditi sve vrste matrica i vlakana) i dobavljača, udio vlakana je veći i vlakna su dulja nego u slučaju polaganja naštrcavanjem. Nedostaci su: kvaliteta postupka u velikoj mjeri ovisi o spretnosti radnika, teško je proizvesti kompozite s malim udjelom smole bez pukotina, smole koje se ručno polažu obično imaju manju molekularnu masu, što znači da mogu biti štetnije od proizvoda s većom molekularnom masom, upotrebljava se smole male viskoznosti što loše utječe na mehanička svojstva, završna površina je lošije kvalitete. [66, 67]



Slika 8.1. Ručno polaganje [68]

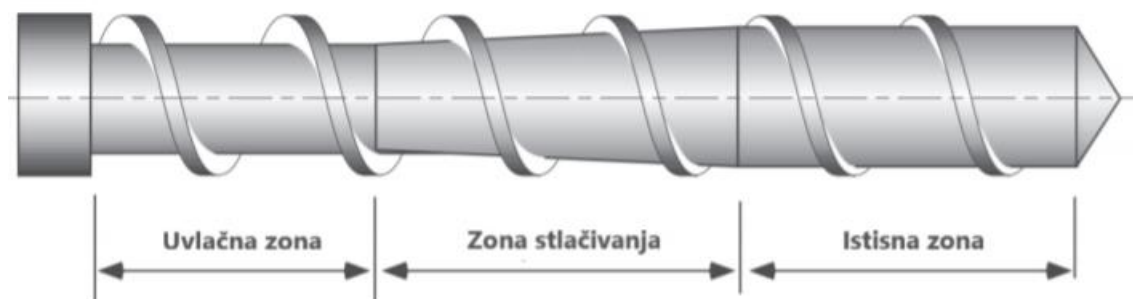
Preradba plastomernih kompozita ojačanih prirodnim vlaknima obično se provodi u dva koraka. Prvo se sastojci smješavaju, a zatim se od smjese oblikuje pripremak ili konačni proizvod. Smješavanje komponenata može se obaviti kontinuirano u ekstruderu, s time da se drvo može dodati zajedno s plastomerom ili u plastomernu taljevinu. Moguće je cikličko smješavanje komponenata u miješalicama, ali se mogu pojaviti odstupanja u kvaliteti od šarže do šarže. Za proizvodnju plastomernih kompozita primjenjuje se ekstrudiranje, injekcijsko prešanje, kalandriranje, toplo oblikovanje i pultrudiranje. Za proizvodnju plastomernih kompozita najviše se primjenjuje ekstrudiranje, i to za razne pune i šuplje profile. Postoje razni tipovi ekstrudera. To može biti ekstruder s jednim pužnim vijkom ili dvopužni ekstruder. Osi dvopužnog ekstrudera mogu biti paralelne ili pod kutom. U nekim postupcima primjenjuju se ekstruderi u tandemu: prvi za smješavanje, a drugi za protiskivanje taljevine. Voda iz vlakana koja čini njihovu mokrinu odstranjuje se u ekstruderu tijekom preradbe. Injekcijsko se prešanje primjenjuje rjeđe, i to za oblikovanje proizvoda složenijih oblika. Sastojci se prvo smješavaju, a zatim se od smjese oblikuje pripremak ili konačni proizvod. Osim smješavanja u miješalici, smješavanje se može provesti ekstrudiranjem nakon čega se pravi granulat. Tako pripravljen granulat injekcijski se preša. Prednosti ekstrudiranja u odnosu na injekcijsko prešanje su manja osjetljivost na mokrinu materijala i dobivanje gotovoga proizvoda u jednom koraku jer se smješavanje komponenata može obaviti u istom ekstruderu u kojim se oblikuje profil. No to zahtijeva ekstruder s dva pužna vijka. Princip rada ekstrudera s dva paralelna pužna vijka je takav da vijci rotiraju u cilindru u istom ili suprotnom smjeru što omogućava miješanje i kapacitet homogenizacije puno bolji nego kod jednopužnih ekstrudera. Nedostatak je to što je njegova cijena viša od jednopužnoga. [66]



Slika 8.2. Jednopužni ekstruder [69]

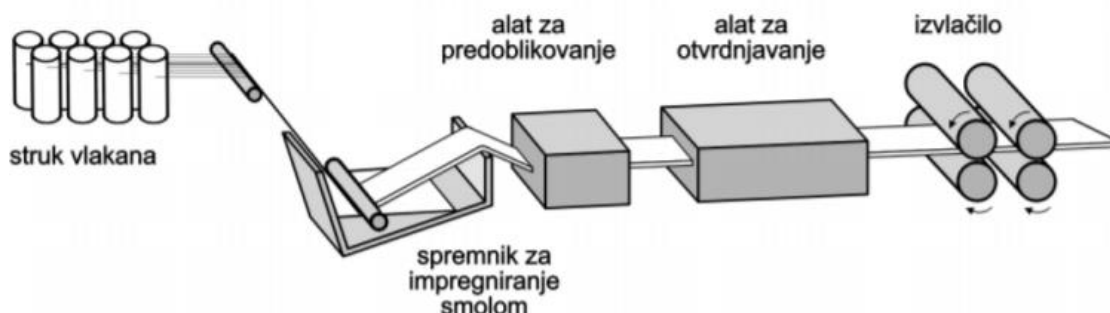
Danas se najčešće u industriji plastike primjenjuje tip jednupužnog ekstrudera. Na slici 8.2 shematski je prikazan jednupužni ekstruder sa svojim osnovnim elementima. U svom najjednostavnijem obliku ekstruder se sastoji od lijevka, otvora za doziranje sirovine (4), cilindra (7) u kojem se kreće rastopljena masa i u kojem je smješten pužni vijak (6), koji ima zadatak da transportira masu duž cilindra do otvora (1) na koji se postavlja alat za dobivanje željenog proizvoda. Za pogon se upotrebljava motor koji preko sistema prijenosnika i reduktora (5) vrši okretanje pužnog vijka (6). Za grijanje cilindra primjenjuje se električni grijači (8), dok za temperiranje i hlađenje sustav cirkulacije vode ili zrak (3). Pri preradi nekih tipova plastomera primjenjuje se sustav za degazaciju i izvlačenje vlage pomoću podtlaka (2), dok se za ispravan rad pužnog vijeka, naročito djela koji se spaja s reduktorom, primjenjuju specijalni ležajevi (9), radi sprječavanja eventualnih vibracija, a vrši se i temperiranje i hlađenje tog djela pužnog vijka. [69]

Pužni vijci su najčešće trozonski, dakle pužni vijak se dijeli na tri zone. Svaka zona obavlja svoju specifičnu funkciju. Prva zona se naziva uvlačna zona i ona ima zadaću uvlačenja polimernog materijala (granulata, praha, itd.) te daljnjeg transporta polurastaljenog materijala prema idućoj zoni, zoni stlačivanja. U zoni stlačivanja pužni vijak stlači polimer i pretvara ga u taljevinu radi povećanja jezgre. U posljednjoj, istisnoj zoni zadaća pužnog vijka je da jednoliko izmiješa te toplinski i mehanički homogenizira polimernu taljevinu. [70] Skica takvog pužnog vijka s označenim zonama prikazana je na slici 8.3.



Slika 8.3. Zone pužnog vijka [70]

Također se primjenjuje kalandriranje s toplim oblikovanjem i pultrudiranje, ali u znatno manjem opsegu. Kalandriranjem se najviše proizvode ploče koje se koriste za oblaganje u građevinarstvu. Pultrudiranjem se proizvode razni puni profili provlačenjem kroz matricu. Suhi struk vlakana ili tkanina provlači se kroz kupelj smole s umreživalom. Neke od prednosti ovog postupka su brzina i ekonomičnost, mogućnost izrade kompliciranih profila i moguća primjena hibridnih ojačavala. Postupak pultrudiranja prikazan je slikom 8.4. [66]



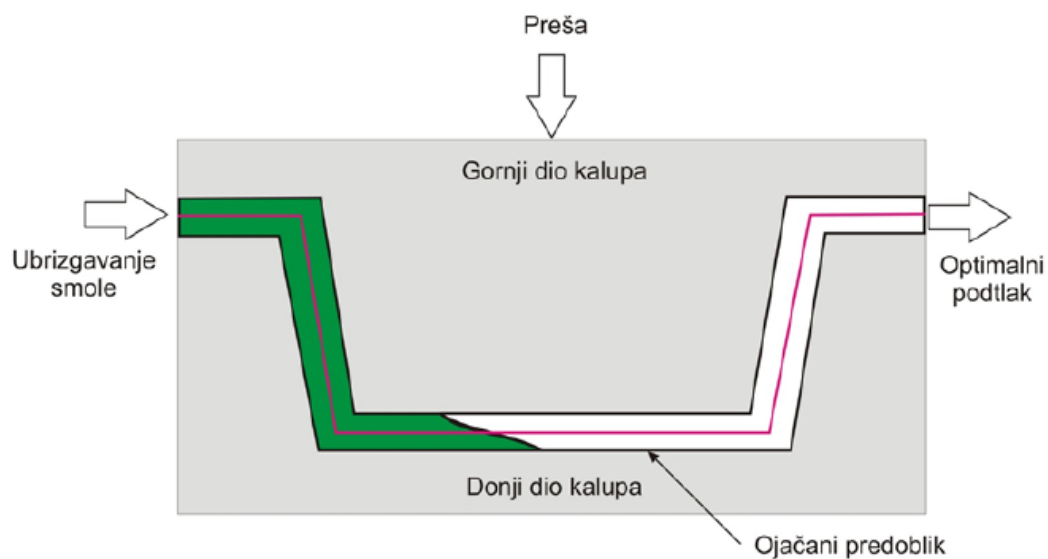
Slika 8.4. Pultrudiranje [68]

Šuplji profili ograničenih duljina mogu se proizvesti namatanjem na jezgru s posmakom. Prednosti namatanja na jezgru su to što je taj postupak vrlo brz i ekonomičan, može se regulirati udio smole na vlaknima, troškovi su manji zbog toga što se rabe pojedinačna vlakna, a ne tkanja, mogu se dobiti odlična mehanička svojstva kompozita ako se vlakna poslažu u smjeru djelovanja opterećenja. Nedostatak je to što oblici proizvoda koji se dobivaju su ograničeni i smještaj vlakana na različite oblike nije uvijek lagan. Uz to troškovi jezgre na koju se namotava mogu biti visoki u slučaju izrade velikih dijelova. [68]

Preprezi se proizvode od tkanine tako da se polimernom matricom natopi svaki sloj tkanine. Tako dobiveni oblici se najčešće zamrzavaju kako bi se mogli skladištiti dulje vrijeme. Natapanje treba provesti tako da se matrica ne polimerizira. Nakon toga se preprezi strojno polažu u kalup, podtlačno se pakiraju i zagrijavaju pri 120-180 °C. Ako je za postizanje boljih svojstava kompozita potreban nešto viši tlak (do 5 bara) sve se to stavlja u autoklav. Polimerne matrice mogu biti epoksidne smole, poliesteri, fenoli i visokotemperaturni plastomeri kao što su npr. poliimidi. Autoklav je posebna komora pod tlakom u kojoj se vrši dovršetak postupka izrade (umreživanje, stvaranje) kompozitne konstrukcije (dijela

konstrukcije). U autoklav pećima se nalaze dušik, ugljični dioksid ili njihova mješavina sa zrakom pod tlakom. Autoklavi su grijani s pomoću plinskih plamenika ili električnih grijala do maksimalne temperature 700 °C. Računalnim upravljanjem parametara autoklava mogu se postići odgovarajući ciklusi umreživanja. Prednosti postupka izrade kompozita u autoklavama su: mogućnost preciznog podešavanja udjela vlakana i smole, materijali su potpuno ekološki prihvatljivi, moguće je impregniranje i smola visoke viskoznost čime se značajno utječe na mehanička i toplinska svojstva kompozita, moguća je automatizacija cijelog procesa. Glavni nedostaci su visoka cijena, odnosno troškovi materijala su veći, ograničenost dimenzija i proces se odvija pri povišenim temperaturama tako da i to treba uzeti u obzir prilikom izbora materijala, pogotovo kod prirodnih vlakana koja su po tom pitanju ograničena na preradu pri nižim temperaturama. [68]

Injekcijsko-posredno prešanje kapljevite smole s uloženim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom – RTM (slika 8.5) je postupak gdje se predoblik od vlakana postavlja u kalup i mogu se stvoriti različiti oblici koji se drže vezivom. Nakon što je oblik postavljen u kalup, kalup se zatvara te se u njega ubrizgava smola. Kad se kalup popuni zatvaraju se mjesta na kojima je ubrizgana smola i dolazi do skrućivanja (umreživanja) pri povišenim ili sobnim temperaturama. Budući da je moguće skrućivanje pri sobnim temperaturama ovaj postupak je pogodan za prirodna vlakna koja su inače osjetljiva na visoke temperature. Osim prirodnih vlakana mogu se upotrijebiti gotovo sve vrste matrica i vlakana. Prednosti ovog postupka su proizvodnja kompozita s visokim udjelom vlakana i s niskim udjelom pukotina u materijalu, ekološki je prihvatljiv postupak jer je smola zatvorena u kalup i puno je bolji izgled površine zato što se kalup sastoji od dvije polovice. Nedostaci su: visoka cijena i masa alata, proizvodnja je ograničena na manje komade te se mogu pojaviti mjesta na proizvodu koja nisu popunjena smolom, što može dovesti do velikog škarta. [67]



Slika 8.5. RTM postupak [68]

Kao prvi korak kod proizvodnje kompozita ojačanih prirodnim česticama najčešće je usitnjavanje ljuskica. Na primjer usitnjavanje rižinih ljuskica kako bi se dobile što sitnije čestice. Nakon toga slijedi miješanje usitnjenih ljuskica najčešće s nekim polimerom u ekstruderu. Najbolje je primijeniti dvopužni ekstruder. Zatim dolazi do ponovnog usitnjavanja u granulatoru i na kraju prešanje u kalupu željenih dimenzija. [71]

## 9. PRIMJENA PRIRODNIH KOMPOZITA

Prirodni su kompoziti našli široku primjenu u automobilske industriji. Najviše se primjenjuju drveno plastični kompoziti (WPC), kratka prirodna vlakna dobivena injekcijskim prešanjem i netkane prostirke od prirodnih vlakna. Osim netkanih prostirki, tkane prostirke se isto počinju sve više primjenjivati i tako šire raspon i mogućnosti potencijalne primjene. Kao materijali matrice i dalje se najčešće upotrebljavaju sintetički polimeri (npr. PE), iako se počinju pojavljivati polimerni na prirodnoj bazi. Kompoziti se najviše primjenjuju kod karoserije, okvira vrata, kontrolnim pločama, prtljažnika, podova i sl. [72]

U 2012. godini automobilska industrija u Europi iskoristila je 90 000 tona prirodnih vlakana kao što su vlakna lana, konoplje, agave, abake itd. i 60 000 tona WPC-a. [72]

Panel automobilske vrata prikazanih na slici 9.1 izrađen je od netkane prostirke prirodnih vlakana s prirodnom smolom na bazi furana. Ovaj dio je dobiven lijevanjem, furanova smola se lijeva na netkanu prostirku odnosno materijal od prirodnih vlakana, a zatim preša manje od 60 sekundi pri temperaturi od 180 °C. Ovaj je način je uspješno primijenjen u proizvodnji prototipa automobilske vrata te je prošao sva potrebna ispitivanja i specifikacije. [72]



Slika 9.1. Panel automobilske vrata [72]

*Lotus Eco Elise 2009* je model automobila kod kojeg je velik dio unutrašnjosti i neki vanjski dijelovi izrađeni od vlakana konoplje i vune. Time su zamijenili staklena vlakna te je ovakav model auta postao bolji za očuvanje okoliša. Na slikama 9.2 i 9.3 su prikazani neki dijelovi napravljeni od prirodnih vlakana. [73]



Slika 9.2. Unutrašnjost automobila *Lotus Eco Elise 2009* [73]



Slika 9.3. Vanjski izgled *Lotus Eco Elise 2009* [73]



*Sunbeam Tiger Concept* prikazan slikom 9.4 temelji se na okviru svemirastog izgleda izrađenog od recikliranog aluminija i ostalim dijelovima izrađenih s drugim ekološki prihvatljivim materijalima kao što su ploče napravljene od smole biljnog ulja, sjedala od sojine pjene prekrivena prirodnim tkaninom, kočione pločice od prirodnih vlakana, prirodna boja i pneumatici od kukuruznog škroba.

Auto je izrazito lagan i brzo postiže velike brzine. Najveći nedostatak je manjak punjača za baterije automobila koji tako funkcioniraju. Zato se smatra da će se ovakvi modeli automobila (od prirodnih vlakana i na baterije) početi sve više primjenjivati tek od 2025. [74]



Slika 9.4. *SunBeam Tiger Concept* [74]

*International Automotive Components Group* (IAC) je 2017. lansirao prvi kompozitni krovni okvir automobila od prirodnih vlakana, izrađen od 70 % vlakana konoplja i kenafa s epoksidnom matricom, čime se postigla ušteda od 50 % manje mase od klasičnog metalnog krovnog okvira (slika 9.5). Sada se takav krovni okvir primjenjuje na svim automobilima *Mercedes-Benz E-klase* i *A-klase*. [75]



Slika 9.5. Krovni okvir automobila od prirodnih vlakana [75]

Na slici 9.6 prikazan je unutrašnji tepih u automobilu načinjen od prirodnog kompozita ojačanog vlaknima banane.



Slika 9.6. Tepih u automobilu *Fordu Lincolnu* od kompozita ojačanog vlaknima banane [76]

Osim banane, tvrtka *Ford* upotrebljava i agavu kao izvor vlakana. 2015. godine *Ford* i proizvođač tekile *Jose Cuervo* proglasili su suradnju u kojoj tvrtka *Ford* upotrebljava otpad agave koji ostaje prilikom njenog branja za tekilu u svrhu izrade pojedinih dijelova automobila. Agava se upotrebljava u postupcima prerade gdje je potrebna brza impregnacija, poput postupka reakcijskog injekcijskog prešanja integralnih poliuretanskih pjena (RIM) koje se primjenjuju za unutarnje dijelove poput presvlake vrata. Agava ima manju gustoću od lana što osigurava dobar protok smole. [77]

Osim u automobilskoj industriji, prirodni se materijali primjenjuju i u izgradnji drugih prijevoznih sredstava. Prigušenje i upijanje vibracija su dvije vrlo važne karakteristike okvira i vilice bicikla koje osjetno utječu na bicikliste. Inovacija se sastoji u uvođenju vlakna prirodnog lana kako bi filtrirala vibracije u kompozitu i tako ga učinila mirnijim. Lanena vlakna uslojena između slojeva ugljika na prednjoj vilici i na donjim stražnjim vilicama okvira upijaju vibracije i tako umiruju okvir i vilicu. Također povećavaju sposobnost reakcije sile istezanja, pa cijeli okvir ima dobrobit od ove novosti, a posljedično, biciklisti koji dugo sjede u njegovom sjedalu na kraju dana su znatno odmorniji. Primjer takvog bicikla je *LOOK 765* (slika) 9.7. [78]



Slika 9.7. Bicikl *LOOK 765* [78]

*Bamboo bike project* su osnovali John Mutter i David Ho s Kolumbijskog sveučilišta (slika 9.8). Sve je krenulo od ideje Craiga Calfeea koji se igrajući sa svojim psom, bacio je psu

komad bambusa umjesto običnog komada drveta te vidio da ga pas, koliko god se trudio, nije uspio oštetiti, a kamoli pregristi.

U SAD-u bicikl od bambusa brzo je postao transatlantski ekološki hit. Zanimljivo je da bambus raste kao korov, brzinom od gotovo jednog metra dnevno što ga čini najbrže rastućom biljkom na svijetu, proizvodi 35 % više kisika od drveća što ga čini jeftinom sirovinom. [79]



Slika 9.8. Bicikl od bambusa [79]

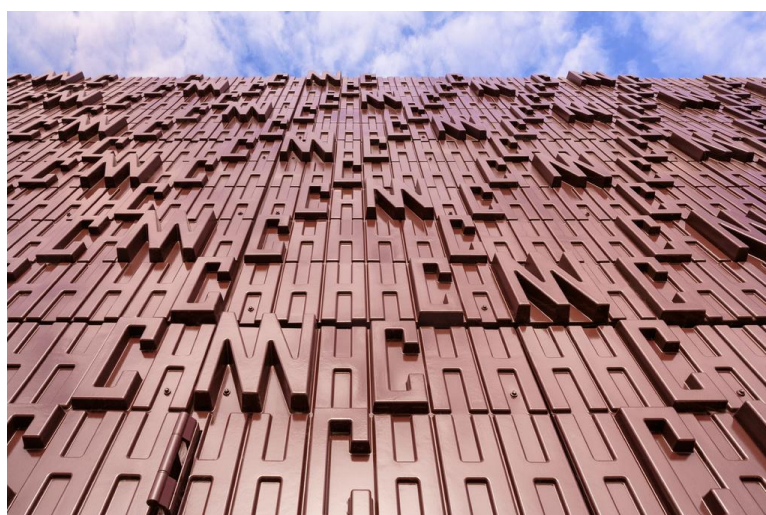
Prirodni se kompoziti široko primjenjuju i u građevinarstvu. Tako je na primjer fasada nove stanice za prihvata plina *Agro Cluster Food* (AFC) u New Prinsenlandu izgrađena od ploča prirodnog materijala, pod nazivom *Nabasco* materijal, proizvedenih u tvrtki *NPSP Composites* (slika 9.9 i 9.10) *Nabasco* je skraćenica od *NATURAL BASED Composites*. [80]

Fasada se sastoji od ukupno 104 ploče kompozitnog materijala kod kojeg se prilikom proizvodnje ne dodaju boje. Materijal stoga ima specifičnu čokoladno smeđu boju. Kompozit se sastoji od matrice koja je napravljena od prirodnih smola napravljene od soje, lanenog ulja ili otpada od proizvodnje biodizela. Kao materijal ojačavanja primjenjuju se vlakna konoplje. [80]



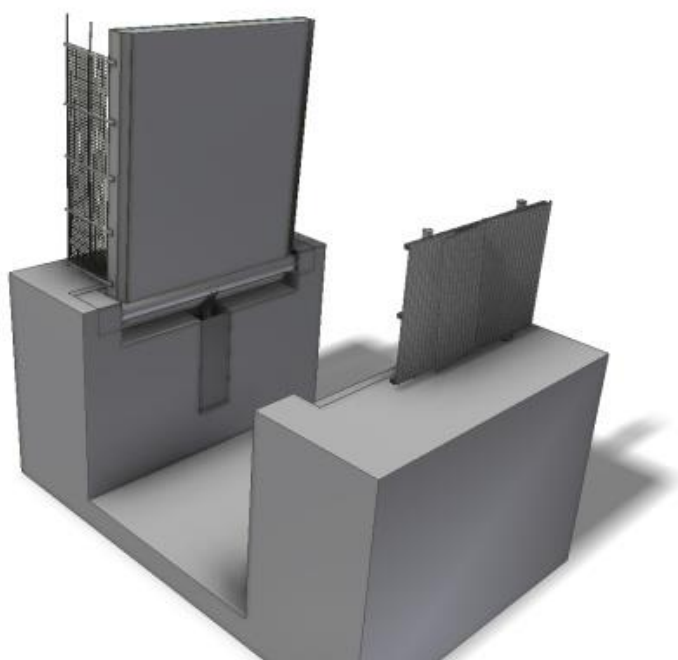


Slika 9.9. Fasada stanice za prihvrat plina [80]



Slika 9.10. Fasada stanice za prihvrat plina [80]

Nizozemska je država s brojnim plovnim putovima i gustim stanovništvom te zbog toga ima puno mostova. Kako se sve više naginje primjeni prirodnih materijala, u Nizozemskoj je most idealan objekt za ispitivanje svojstava i mogućnosti novih biokompozita. Prvi nizozemski sklopivi most od prirodnih kompozita napravljen je u zoološkom vrtu *Wildlands Adventure* u Emmenu. Most je napravljen kao sendvič konstrukcija od lana, prirodne smole bez kobalta, pjenaste jezgre recikliranih PET boca i malene količine čelika (slika 9.11). Širine je 4 m i raspona 5 m. Teži 50 % manje od konvencionalnog mosta, tako da betonski temelj može biti lakši i za njegovo otvaranje potrebno je uložiti puno manje energije. [81]



Slika 9.11. Prvi nizozemski sklopi most od prirodnih kompozita [81]

Osim navedenog mosta, u kampusu *Sveučilišta u Eindhovenu* izgrađen je još jedan pješački most od prirodnih kompozita dužine 14 metara (slika 9.12). Ovaj se "bio most" sastoji od duge, vitke grede i ograda u obliku lepeze koje podsjećaju na vlati trave. Primjenjivani materijali uključuju PLA (polilaktična kiselina) pjenu, pluta, vlakna konoplje i lana i epoksidnu smolu na biološkoj osnovi. [81]



Slika 9.12. Pješački most od prirodnih kompozita [81]

Osim mostova, vanjski dijelovi kuća i zgrada također se rade od prirodnih kompozita. Prva kuća izgrađena od konoplja i betona u SAD-u prikazana je slikom 9.13. [82]



Slika 9.13. Prva kuća izgrađena od konoplja i betona u SAD-u [82]

Akademik za dizajn namještaja sa *Sveučilišta Sheffield Hallam* počeo je stvarati namještaj izrađen od 100 % biorazgradivog materijala koji se može kompostirati na kraju svog životnog vijeka. Dobiveni proizvod izrađen je u potpunosti od lana i prirodne plastike dobivene od kukuruza. [83] Prvi primjer takvog namještaja je kabinet prikazan slikom 9.14.



Slika 9.14. Biorazgradivi kabinet [83]



Vrata prikazana slikom 9.15 napravljena su od kompozita čija je matrica od poliuretana, PVC-a i drvenih vlakana što ih čini znatno čvršćim i otpornijim od tradicionalnih drvenih vrata. Upotreba kompozitnog materijala u građevinarstvu i opremanju interijera nije samo trend već standard, garancija kvalitete i dugotrajnosti. Osim vrata od kompozitnih materijala se rade podovi, police, stolovi, itd. [84]



Slika 9.15. Vrata od prirodnog kompozita [84]

MYX je tekstilni kompozit koji se sastoji od biljnih vlakana i micelija gljive bukovače. Točnije, to je baza na kojoj raste industrijski uzgojena bukovača. Nakon što se gljiva ubere, taj kompozit zapravo je otpad. Međutim, ako ga se osuši, dobivamo organski, ekološki proizveden materijal koji se može iskoristiti u građevinskoj, ali i tekstilnoj industriji. Kao zaseban proizvod, MYX je razvio danski dizajner Jonas Edvard. Željeni se proizvod od MYX-a jednostavno uzgoji smještanjem micelija na zadanu formu. Za 3-4 tjedna kombinacija micelija i biljnih vlakana srasta u mekani, podatni i lagani materijal koji zadržava oblik, a dobiven je kombiniranjem dvaju otpadnih materijala: micelija s farme gljiva i mješavine vlakana konoplje i lanenog platna iz tekstilne industrije. Vlakna koja tvore MYX dolaze iz otpadnog materijala u proizvodnji odjeće i užadi, a spore bukovače su svojevrsno “ljepilo” koje ta vlakna drži skupa i stvara izdržljiv i fleksibilan materijal. Bukovače koje izrastu na toj podlozi potpuno su jestive pa u cijelom procesu uopće nema otpadnog materijala. [85] Primjer proizvoda od MXY-a prikazan je slikom 9.16.





Slika 9.16. Lampa od MYX materijala [85]

Slojevi skija i snowboarda obično su izrađeni od kombinacije plastike i ugljičnih ili staklenih vlakana. Međutim velike tvrtke kao što su *Faction Ski*, *Salomon* i *Whitedot Ski* te mnoge manje tvrtke poput *Niche Snowboarda* sve više dodaju lanena vlakna umjesto staklenih zato što lan puno bolje apsorbira vlagu, a to pomaže u smanjenju vibracija i poboljšava skijašima ili snowboarderima "osjećaj" proizvoda što je jako komplicirano postići u sportu. Prikaz skijaša na skijama od vlakana lana je na slici 9.17. [86]



Slika 9.17. Skijaš na skijama od vlakna lana [86]

## 10. ZAKLJUČAK

Kompozitni materijali sve se više primjenjuju i njihov udio u raznim industrijama je u porastu. Kompozitni materijali, iako imaju nedostataka, kao što je npr. visoka cijena proizvodnje imaju i mnogo prednosti. Prednost prirodnih naspram konvencionalnih kompozita je njihova ekološkičnost, svojstvo materijala kojem se danas posvećuje puno pažnje radi održivosti i zaštite okoliša. Cilj je što više konvencionalnih materijala zamijeniti s prirodnim. Kod kompozita postoji beskonačno mnogo mogućnosti koje se dobiju kombiniranjem materijala matrica i ojačavala, kao i samim oblikom ojačavala. Prirodna ojačavala u kombinaciji sa sintetičkom matricom pokazuju vrlo dobra svojstva i u nekim područjima je već moguće zamijeniti sintetička ojačavala s prirodnima, međutim kombinacija prirodnih ojačavala s prirodnom matricom je i dalje neistraženo područje gdje još nije pronađena neka optimalna njihova kombinacija koja bi mogla zadovoljiti tražena svojstva. Međutim, takve kombinacije su u jeku istraživanja te će se uz nove napretke prirodni kompoziti sve više upotrebljavati.

## LITERATURA

- [1] Haramina, T.: Materijali II - Kompoziti, ppt podloga za predavanje, FSB, Zagreb, 2020.
- [2] History of Composite Materials, <https://www.mar-bal.com/applications/history-of-composites>, 01.08.2020.
- [3] Povijesna priča o streličarstvu, <https://darkoantolkovic.wordpress.com/2018/03/06/povijesna-prica-o-strelicarstvu/>, 03.08.2020.
- [4] 17. siječnja 1953. u New Yorku predstavljena chevrolet Corvette, <https://autoportal.hr/aktualno/novosti/17-sijecnja-1953-u-new-yorku-predstavljen-chevrolet-corvette/>, 01.08.2020.
- [5] Chevrolet Corvette 1953., <https://www.classicdigest.com/de/cars/chevrolet/corvette/148638>, 01.08.2020.
- [6] History of Composites, <https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404>, 01.08.2020.
- [7] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [8] <http://www.autonet.hr/arhiva-clanaka/blok-motora>, 04.08.2020.
- [9] Bajić, D.: Kompozitni materijali, ppt prezentacija, Mašinski fakultet Podgorica, <https://docplayer.gr/76003059-Kompozitni-materijali-prof-dr-darko-bajic-masinski-fakultet-podgorica.html>, 04.08.2020.
- [10] <https://www.fsb.unizg.hr/kmb/200/230/kmb234.htm>, 05.08.2020.
- [11] <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=65055>, 05.08.20
- [12] <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:989858/FULLTEXT01.pdf>, 05.08.2020.
- [13] Friedrich, K., Breuer, U.: *Multifunctionality of Polymer Composites*, William Andrew, New York, 2015.
- [14] Ashori, A., Nourbakhsh, A.: *A Comparative Study on Mechanical Properties and Water Absorption Behavior of Fiber-Reinforced Polypropylene Composites Prepared by OCC Fiber and Aspen Fiber*, Polymer Composites, 29(5), 2008
- [15] Ramamoorthy, S.K., Skrifvars, M., Persson, A.: A review of natural Fibers Used in Biocomposites: Plant, Animal and Regenerated Cellulose Fibres. *Polymer reviews*, 2015.

- 
- [16] <http://www.lagea.net/materijali-svila>, 05.08.2020.
- [17] <https://www.plantea.com.hr/agava/>, 07.08.2020.
- [18] <https://www.foodnavigator-latam.com/Article/2019/01/28/Mexican-students-transform-tequila-by-product-into-fiber-packed-functional-flour#>, 07.08.2020.
- [19] Ben Cheikh, R., Ben Brahim, S., Baklouti, M., Hadj Sassi, B.: *The Agave Fibers in Composite Materials*, International Conference on Composite Materials, ICCM-12, Pariz, 1999.
- [20] <https://core.ac.uk/download/pdf/82556402.pdf>, 08.08.2020.
- [21] Asim, M., Abdan, K., Jawaid, M., Nasir, M., Dashtizadeh, Z., Ishak, M., R., Hoque, M., E.: *A review on pineapple leaves, fibre and its composites*, International Journal of Polymer Science, vol. 2015, pages 16, 2015.
- [22] [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392015005006115&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392015005006115&script=sci_arttext), 09.08.2020.
- [23] <http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/abaca0/en/>, 08.08.2020.
- [24] [https://en.wiktionary.org/wiki/abaka#/media/File:Abaca\\_sachsenleinen\\_01.jpg](https://en.wiktionary.org/wiki/abaka#/media/File:Abaca_sachsenleinen_01.jpg), 08.08.2020.
- [25] <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/vlakna.pdf>, 09.08.2020.
- [26] <https://agrosavjet.com/zasto-je-dobro-gajiti-lan/>, 12.08.2020.
- [27] Karačić, M.: *Prirodna vlakna u industriji polimernih kompozita*, Završni rad, FSB, Zagreb, 2017.
- [28] [https://www.researchgate.net/figure/Flax-polypropylene-underbody-components-have-replaced-glass-fiber-reinforced-plastic\\_fig4\\_248555449](https://www.researchgate.net/figure/Flax-polypropylene-underbody-components-have-replaced-glass-fiber-reinforced-plastic_fig4_248555449), 09.08.2020.
- [29] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=51747>, 09.08.2020.
- [30] Teja, T.R., VenkataRao, D., Lakshumu Naidu, A.: *Mechanical and chemical Properties of Ramie reinforced composites and manufacturing techniques*, International journal for research and development in technology, Volume-8, Issue 5, ISSN (O): 2349-3585, 2017.
- [31] <https://mohairandmore.com/products/ramie-fiber>, 09.08.2020.
- [32] <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/vlakna.pdf>, 12.08.2020.
- [33] [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-6412-9\\_45](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-6412-9_45), 12.08.2020.
- [34] <https://narodni.net/wp-content/uploads/2013/06/sadnja-i-ru%C4%8Dna-obra%C4%8Dna-jute.jpg>, 12.08.2020.
- [35] [https://www.mynewsdesk.com/blog\\_posts/which-are-the-benefits-of-choosing-jute-bags-59291](https://www.mynewsdesk.com/blog_posts/which-are-the-benefits-of-choosing-jute-bags-59291), 12.08.2020.

- [36] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/kenaf-fibre>, 15.08.2020.
- [37] [https://naturalfibersinfo.org/?page\\_id=85](https://naturalfibersinfo.org/?page_id=85), 12.08.2020.
- [38] <https://www.agroklub.com/sortna-lista/uljarice-predivo-bilje/industrijska-konoplja-80/>, 15.08.2020.
- [39] <https://www.agrobiz.hr/agrovijesti/sest-neocekivanih-proizvoda-od-konoplje-3135>, 15.08.2020.
- [40] <https://www.behance.net/gallery/8853749/Kestrel-Bio-composite-electric-car>, 15.08.2020.
- [41] Rujnić-Sokele, M., Šercer, M., Bujanić B.: *Utjecaj recikliranja na mehanička svojstva drvo-plastomernoga kompozita*, Polimeri 25(1):12-19, 2004.
- [42] <https://www.indiamart.com/proddetail/wpc-decking-14818047991.html>, 13.08.2020.
- [43] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=46363>, 13.08.2020.
- [44] <https://www.kosulje.rs/blog/pamuk-sve-sto-treba-da-znamo-o-ovom-materijalu/>, 13.08.2020.
- [45] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b3/Baumwoll-Erntemaschine.jpeg>, 13.08.2020.
- [46] Chand, N., Fahim, M.: *Tribology of Natural Fiber Polymer Composites*, Woodhead Publishing, Sawston, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2008.
- [47] Namhun, K.: *Physical and Chemical Properties of Kapok (Ceiba pentandra) and Balsa Fibers (Ochroma pyramidale)*, Journal of the Korean Wood Science and Technology, Volume 46 Issue 4 , pages: 393-401, 2018.
- [48] <http://dripline.net/is-the-kapok-tree-the-future-of-winter-wear/>, 07.08.2020.
- [49] Panthapulakkal, S., Sain, M.: *Biofiber Reinforcements in Composite Materials, The use of wheat straw fibres as reinforcements in composites*, Woodhead Publishing, Sawston, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2015.
- [50] [https://www.researchgate.net/figure/Wheat-straw-Colourbox-2012-Sisal-fibres-are-fibres-obtained-from-sisal-plant-with\\_fig11\\_320739325](https://www.researchgate.net/figure/Wheat-straw-Colourbox-2012-Sisal-fibres-are-fibres-obtained-from-sisal-plant-with_fig11_320739325), 16.08.2020.
- [51] <https://www.zzjzdnz.hr/hr/zdravlje/okolis-i-zdravlje/655>, 16.08.2020.
- [52] Pilipović, A.: Prerada kompozitnih tvorevina, ppt podloga za predavanje, FSB, Zagreb, 2020.
- [53] Qhazi, I.F.: *Study the Effect of the Particle Size on Mechanical Properties of Particulate Natural Composite Materials*, Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences, Volume 10, Issue 2, Pages 120-132, 2017.

- [54] Obiukwu, O.O., Uchechukwu, M.N., Nwaogwugwu, M.C.: *Study on the Properties of Coconut Shell Powder Reinforced High-Density Polyethylene Composite*, Futo Journal Series (FUTOJNLS), volume-2, issue-2, pp- 43 – 55, 2016.
- [55] Fetić, N.: *Osnovni materijali za proizvodnju drvo-plastičnih kompozita*, 11th International Scientific Conference on Production Engineering, Development and modernization of production, 259-269, 2017.
- [56] Arjmandi, R., Hassan, A., Majeed, K., Zakaria, Z.: *Rice Husk Filled Polymer Composites*, International Journal of Polymer Science, volume-2015., 32 pages, 2015.
- [57] Bansal, G., Agarwal, M., Negi, P.: *Experimental Determination of Mechanical and Physical Properties of Almond Shell Particles Filled Biocomposite in Modified Epoxy Resin*, Journal of Material Science & Engineering, volume-5, issue-3, 8 pages, 2016.
- [58] Chandramohan, D., John Presin Kumar, A.: *Experimental data on the properties of natural fiber particle reinforced polymer composite material*, Data in Brief, 13, 460-468, 2017.
- [59] Quarshie, R., Carruthers, J.: *Technology overview biocomposites*, Materials KTN i NetComposites Ltd, United Kingdom, 2014.
- [60] Uglešić, P.: *Biorazgradivi polimeri i njihova primjena*, Završni rad, FKIT, Zagreb, 2015.
- [61] Mehanika kompozitnih materijala, [http://www.aerodamagelab.fsb.hr/books/materijali\\_mehanika\\_kompozita.pdf](http://www.aerodamagelab.fsb.hr/books/materijali_mehanika_kompozita.pdf), 21.08.2020.
- [62] Zovko, R.: *Priprema i karakterizacija mješavina polietilena s termoplastičnim škrobom*, Diplomski rad, FKIT, Zagreb, 2018.
- [63] Karačić, M.: *Prirodna vlakna u industriji polimernih kompozita*, Završni rad, FSB, Zagreb, 2017.
- [64] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=49251>, 21.08.2020.
- [65] [https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/DiMP\\_\\_4\\_predavanje\\_2016\\_2017%5B1%5D.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/DiMP__4_predavanje_2016_2017%5B1%5D.pdf), 22.08.2020.
- [66] Rujnić-Sokele, M., Šercer, M., Bujanić B.: *Utjecaj recikliranja na mehanička svojstva drvo-plastomernoga kompozita*, Polimeri 25(1):12-19, 2004.
- [67] Pilipović, A.: *Prerada kompozitnih tvorevina*, ppt podloga za predavanje, FSB, Zagreb, 2020.
- [68] Filetin, T., Marić G.: *Napredne tehnologije materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.

- 
- [69] <https://www.plastika-haluzan.hr/ekstruzija/>, 22.08.2020.
- [70] Godec, D.: *Ekstrudiranje, Napredni proizvodni postupci*, ppt podloga za predavanje, FSB, Zagreb, 2017.
- [71] Kos, A.: Priprava i karakterizacija biokompozita na osnovi LDPE-a i lignoceluloze, Diplomski rad, FKIT, 2016.
- [72] Quarshie, R., Carruthers, J.: *Technology overview biocomposites*, Materials KTN i NetComposites Ltd, United Kingdom, 2014.
- [73] <https://www.carmagazine.co.uk/car-reviews/lotus/lotus-eco-elise-2009-green-review/>, 01.09.2020.
- [74] <https://newatlas.com/2025-sunbeam-tiger-electric-car-concept/11482/>, 01.09.2020.
- [75] <http://www.allthings.bio/bio-composites-for-cars/>, 01.09.2020.
- [76] [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S151614392015000800240&script=sci\\_arttext&tlng=en](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S151614392015000800240&script=sci_arttext&tlng=en), 01.09.2020.
- [77] <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2016/07/19/ford--jose-cuervo-team-up-to-make-car-parts-from-agave.html>, 01.09.2020.
- [78] <https://keindl-sport.hr/blog/look-bicikli-znanost-sluzbi-biciklista-66/>, 01.09.2020.
- [79] <https://biker.hr/vijesti/bicikl-od-bambusa.html>, 01.09.2020.
- [80] <https://marcovermeulen.eu/en/projects/dinteloord+gas+receiving+station/>, 02.09.2020.
- [81] <http://www.allthings.bio/demonstrating-biocomposites-properties-using-bio-bridges/>, 02.09.2020.
- [82] <http://www.allthings.bio/living-hemp-house/>, 02.09.2020.
- [83] <https://phys.org/news/2013-09-biodegradable-cabinet-approach-sustainability.html>, 02.09.2020.
- [84] <https://prodelshop.rs/cetiri-benefita-kompozitnih-vrata/>, 02.09.2020.
- [85] <https://merulapk.wordpress.com/2016/08/31/novo-doba-tekstila/>, 03.09.2020.
- [86] <http://www.allthings.bio/hit-the-slopes-with-bio-based-skis-and-snowboards/>, 03.09.2020.