

Izbor materijala za lopatice vjetroturbina

Erceg, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:235:174933>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marin Erceg

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Irena Žmak

Student:

Marin Erceg

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Ireni Žmak na pruženoj pomoći i savjetima. Zahvaljujem svima koji su mi omogućili proučavanje ovog znanstvenog područja.

Također zahvaljujem svojoj obitelji na podršci i potpori tijekom cijelog studija.

Marin Erceg



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marin Erceg** JMBAG: **0035216988**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izbor materijala za lopatice vjetroturbina**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Material selection for wind turbine blades**

Opis zadatka:

Upotreba vjetroturbina za proizvodnju električne energije sve je češća širom svijeta: podaci Međunarodne agencije za energiju (IEA, engl. *International Energy Agency*) iz 2019. godine govore o proizvedenoj energiji iz vjetra u svijetu od 1265 TWh u 2018. godini, a Agencija predviđa porast na 3317 TWh ili više do 2030. godine.

Pristupačna energija iz čistih izvora jedan je od Ciljeva održivog razvoja Programa Ujedinjenih naroda o održivom razvoju do 2030. godine (tzv. Agenda 2030). Republika Hrvatska potpisnica je ovog sporazuma iz 2015., čime je preuzela obavezu njegove primjene.

U okviru ovog završnog rada potrebno je upoznati se s konceptom održivog razvoja, Agendom 2030 i opisati vezu između Agende i rastuće upotrebe energije vjetra za proizvodnju električne energije. U radu je potrebno i opisati promjene u izboru materijala za izradu lopatica vjetroturbina kroz povijest i recentno doba te dati pregled karakterističnih različitih klimatskih uvjeta u kojima vjetroturbine rade u svijetu. Za izbor materijala za lopatice vjetroturbina potrebno je definirati zahtjeve na lopatice s obzirom na funkcionalnost, eksploataбилnost, tehnološkičnost, cijenu i recikličnost te na temelju zahtjeva predložiti svojstva materijala i materijale koji bi zadovoljili zadana zahtjeve.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Irena Žmak

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. - 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. - 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. KONCEPT ODRŽIVOG RAZVOJA.....	2
2.1. Agenda 2030	3
2.2. Agenda 2030 i rastuća uporaba energije vjetra za proizvodnju električne energije	5
3. ELEKTRIČNA ENERGIJA U SVIJETU	7
3.1. Energija vjetra u svijetu	7
3.1.1. Proizvodnja električne energije iz vjetra u svijetu	7
3.1.2. Potrošnja električne energije dobivene vjetrom u svijetu	9
3.1.3. Proizvodnja električne energije dobivene vjetrom u Republici Hrvatskoj	9
4. RAD VJETROTURBINA U RAZLIČITIM KLIMATSKIM UVJETIMA.....	11
4.1. Karakteristični klimatski uvjeti	11
4.1.1. Nadmorska visina.....	11
4.1.2. Gustoća zraka.....	11
4.1.3. Smicanje i brzina vjetra te topografija terena	11
4.1.4. Temperatura zraka.....	12
4.1.5. Količina soli u zraku	13
4.2. Resursi vjetra – vjetropotencijal	13
4.3. Lokacija vjetroturbina i vjetroelektrana u svijetu	14
4.4. Utjecaj vjetroturbina na okoliš i ljudski život.....	17
4.4.1. Utjecaj vjetroturbina na ptice i ostale životinje	17
4.4.2. Buka vjetroturbina	18
4.4.3. Efekt sjene.....	18
4.4.4. Udar munja.....	19
4.4.5. Elektromagnetske smetnje	20
5. RAZVOJ VJETROTURBINA	21
5.1. Začetci iskorištavanja vjetra.....	21
5.2. Prve vjetroturbine.....	22
5.3. Moderne vjetroturbine.....	23
5.3.1. Vjetroturbina ELSAM Gedser	23
5.3.2. Vjetroturbina NASA MOD- 5B Boeing	24
5.3.3. Vjetroturbina Bonus B35/450	25
5.3.4. Vjetroturbina MAN WKA-60 (GROWIAN II).....	26
5.3.5. Vjetroturbina SG 3.4 – 132	27

6. IZBOR MATERIJALA ZA LOPATICE VJETROTURBINA.....	29
6.1. Lopatica vjetroturbine	29
6.2. Kompozitni materijali	33
6.2.1. Ojačalo kompozita	33
6.2.2. Matrica kompozita	36
6.2.3. Proizvodnja kompozita	37
6.3. Drvo kao materijal za lopatice vjetroturbina.....	38
6.4. Recikličnost lopatica vjetroturbine	40
7. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA.....	43

POPIS SLIKA

Slika 1.	Osam Milenijskih razvojnih ciljeva [4].....	2
Slika 2.	Glavne sastavnice Ciljeva održivog razvoja [3].....	3
Slika 3.	Ciljevi održivog razvoja [6]	4
Slika 4.	Potrošnja električne energije u svijetu od 1990. do 2019. [9].....	7
Slika 5.	Količina proizvedene električne energije dobivene vjetrom u svijetu od 1990. do 2019. [9]	8
Slika 6.	Usporedba proizvedene električne energije iz različitih izvora od 1990. do 2019. [9]	9
Slika 7.	Količina proizvedene električne energije iz vjetra u Hrvatskoj od 2004. do 2021. i u svijetu od 1978. do 2021. [8].....	10
Slika 8.	Usporedba dobivene električne energije u Hrvatskoj iz različitih izvora od 1990. do 2020. [9]	10
Slika 9.	Ovisnost brzine vjetra o topografiji površine [13]	12
Slika 10.	Resursi vjetra na Zemlji na visini od 200 m [15].....	13
Slika 11.	Resursi vjetra u Hrvatskoj na visini od 80 m [16].....	14
Slika 12.	Vjetroturbine V100, Texas, Sjedinjene Američke Države [17]	15
Slika 13.	Kineska odobalna vjetroelektrana [18].....	16
Slika 14.	Vjetroelektrana Senj [19]	16
Slika 15.	Sjena vjetroturbine [14].....	19
Slika 16.	Raspršivanje elektromagnetskog signala zbog vjetroturbine [13]	20
Slika 17.	Heronova vjetrenjača [23]	21
Slika 18.	Jacobsova vjetroturbina [13]	22
Slika 19.	Gadserova vjetroturbina (200 kW) [26]	24
Slika 20.	Vjetroturbina MOD- 5B (3,2 MW) [27]	25
Slika 21.	Vjetroturbina Bonus B35/450 (450 kW) [28]	26
Slika 22.	Vjetroturbina MAN WKA-60 (1,2 MW) [30].....	27
Slika 23.	Vjetroturbina SG 3.4 – 132 u Francuskoj (3,465 MW) [31].....	28
Slika 24.	Tri glavna strukturna područja lopatice vjetroturbine [33]	30
Slika 25.	Poprečni presjek lopatice vjetroturbine [25]	31
Slika 26.	a) Savijanje lopatica jedna prema drugoj (<i>edgewise</i>), i b) prema tornju (<i>flapwise</i>) [34]	31
Slika 27.	Lopatica vjetroturbine sa strukturnim komponentama [35]	32
Slika 28.	Sastav kompozita [37]	33
Slika 29.	Hibridni kompozit ojačan staklenim i ugljičnim vlaknima [25]	35
Slika 30.	Svojstva materijala vlakana i matrice.....	36
Slika 31.	Prepreg laminat kompozit [41].....	38
Slika 32.	Sendvič – kompozit; polimerni kompozit ojačan staklenim vlaknima – drvo balsa [45]	39
Slika 33.	Zakopavanje lopatica vjetroturbina [48]	40
Slika 34.	Dječje igralište od dijelova lopatice vjetroturbine [49].....	41

POPIS TABLICA

Tablica 1. Ispuštanje štetnih plinova različitim oblicima stvaranja električne energije (kg/MWh) [13]	17
Tablica 2. Svojstva E – staklenog vlakna [38]	34
Tablica 3. Svojstva ugljičnih vlakana [38]	34
Tablica 4. Svojstva aramidnih vlakana [38]	35
Tablica 5. Usporedba svojstava drveta balsa i PET pjene kao jezgra sendvič kompozita [44,46,47]	39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
<i>A</i>	%	Istezljivost
<i>E</i>	N mm ⁻²	Modul elastičnosti
<i>c_{p,max}</i>	%	Stupanj aerodinamičke pretvorbe (Betzov koeficijent iskoristivosti)
<i>m</i>	kg	Masa
<i>P</i>	W	Snaga
<i>r</i>	m	Promjer
<i>R_m</i>	N mm ⁻²	Vlačna čvrstoća
<i>ϑ</i>	°C	Temperatura
<i>ρ</i>	kg m ⁻³	Gustoća

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
EU	<i>European Union</i> – Europska Unija
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Plastic</i> – plastika ojačana staklenim vlaknima
IEA	<i>International Energy Agency</i> – Međunarodna agencija za energiju
ITC	<i>Investment Tax Credit</i> – Investicijski porezni kredit
LPS	<i>Lightning Prevention System</i> – Sustav odvrćanja munja
MDG	<i>Millennium Development Goals</i> – Milenijski razvojni ciljevi
PET	<i>Polyethylene Terephthalate</i> – polietilen tereftalat
PUR	<i>Polyurethane</i> – poliuretan
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i> – Izravno prešanje kapljevite smole
SAD	Sjedinjene Američke Države
SDG	<i>Sustainable Development Goals</i> – Ciljevi održivog razvoja
UN	<i>United Nations</i> – Ujedinjeni narodi
UNCED	<i>The United Nations Conference on Environment and Development</i> – Konferencija Ujedinjenih Naroda o okolišu i razvoju
VARTM	<i>Vacuum – Assisted Resin Transfer Molding</i> – Izravno prešanje kapljevite smole pod vakuumom

SAŽETAK

Održivi razvoj je program koji se fokusira na poboljšavanje načina ljudskog života. Taj program uključuje ravnotežu okoliša, društva i gospodarstva. Proizvodnjom čiste i pristupačne električne energije iz vjetra se direktno utječe na dosta ciljeva održivog razvoja.

U završnom radu je prikazana veza između Agende 2030 i potrošnje električne energije u svijetu i u Republici Hrvatskoj. Provedena je i analiza rada vjetroturbina u različitim klimatskim uvjetima te je naveden i objašnjen utjecaj okolina na njihov rad. Prikazan je i razvoj vjetroturbina te promjena izbora materijala za lopatice vjetroturbina kroz povijest. Na kraju završnog rada je opisan izbor materijala na temelju funkcionalnosti, eksploatabilnosti, tehnološkičnosti, cijeni i recikličnosti te su predložena svojstva materijala i sami materijali za pojedine dijelove lopatica vjetroturbine.

Polimerni kompoziti ojačani vlaknima su se pokazali kao najbolji materijal za lopatice vjetroturbine. Imaju manju masu od konvencionalnih materijala, vrlo dobra mehanička svojstva i otporni su na koroziju. Drvo se pokazalo kao vrlo dobra zamjena za polimerne kompozite ojačane vlaknima za određene dijelove lopatica. Napokon, utvrđen je i trenutno najveći problem u industriji proizvodnje čiste i pristupačne električne energije iz vjetra, a to je recikličnost lopatica vjetroturbina. Ponuđeni su neki načini recikliranja, ali to područje ima još mnogo prostora za napredak.

Ključne riječi: održivi razvoj, energija vjetra, lopatice vjetroturbina, izbor materijala, polimerni kompoziti ojačani vlaknima, recikličnost lopatica vjetroturbina

SUMMARY

Sustainable development is a program that focuses on improving the way people live. This program includes the balance of environment, society and economy. The production of clean and affordable electricity from the wind directly affects many of the goals of sustainable development.

The thesis shows the connection between Agenda 2030 and electricity consumption in the world and in the Republic of Croatia. An analysis of the operation of wind turbine in different climatic conditions was also carried out, and the influence of the environment on their operation was stated and explained. The development of wind turbines and changes in the materials selection for wind turbine blades throughout history are also presented. At the end of the thesis, materials selection is described based on functionality, exploitation, technology, price and recyclability, and the properties of the materials and the materials themselves for individual parts of the wind turbine blades are proposed.

Fiber reinforced polymer composites have proven to be the best material for wind turbine blades. They have a lower mass than conventional materials, very good mechanical properties and are corrosion resistant. Wood has proven to be a very good substitute for fiber reinforced composites for certain parts of the blade. Finally, the biggest problem in the industry of producing clean and affordable energy from the wind has been identified, and that is the recyclability of wind turbine blades. Some ways of recycling are offered, but that area still has a lot of room for improvement.

Key words: sustainable development, wind energy, wind turbine blades, materials selection, fiber reinforced polymer composites, recyclability of wind turbine blades

1. UVOD

Činjenica je da planet Zemlja u zadnjih milijun godina, u prosjeku svakih sto tisuća godina prolazi kroz ledena doba (engl. *ice ages*) i interglacijale (engl. *interglacial*). Zadnje ledeno doba na Zemlji je završilo prije otprilike dvadeset tisuća godina, što znači da se Zemlja trenutno nalazi u međuledenom dobu (interglacijalu). Tijekom ovih ciklusa prosječna globalna temperatura Zemlje može se mijenjati od 3° C do čak 8° C. Tijekom analiziranja prošlog ledenog doba znanstvenici su uspjeli povezati dominantan utjecaj ugljikovog dioksida na trenutačan klimatski sustav i njegov utjecaj na klimatske promjene [1].

Konferencija Ujedinjenih Naroda o okolišu i razvoju (engl. *The United Nations Conference on Environment and Development*, UNCED) je održana 1992. godine u Rio de Janeiru pod nazivom Zemaljski samit (engl. *Earth Summit*). Na konferenciji su sudjelovali znanstvenici, politički predstavnici i diplomati iz 179 zemalja svijeta a glavni interes im je bio usmjeren na odsjek ljudske socio-ekonomske aktivnosti. Primaran cilj je bio stvoriti temeljnu agendu međunarodnih akcija koje bi pomogle okolišu na Zemlji u 21. stoljeću [2].

Produkt konferencije u Rio de Janeiru je i novonastali i trenutno aktivni plan s konceptom održivog razvoja nazvan Agenda 2030 koji će detaljnije biti opisan u završnom radu kasnije. Jedan od načina i akcija propisanih u Agendi je uporaba obnovljivih izvora energije u što se ubrajaju i vjetro turbine. Zahvaljujući brzom razvoju znanosti, osobito u području strojarstva i elektrotehnike, vjetro turbine se razvijaju velikom brzinom. Međutim, uslijed ubranog razvoja vjetro turbina, naknadna šteta se očituje kroz onečišćenje okoliša prilikom proizvodnje njih samih. Odabir materijala za vjetro turbine je vrlo zahtjevan proces koji traži zadovoljavanje velikog broja kriterija i u kojem ima mogućnosti za veliki napredak u budućnosti. Slijedom navedenog, u završnom radu će biti prikazana veza između Agende 2030 i rastuće uporabe energije vjetra za proizvodnju električne energije te će biti obrađena tematika izbora materijala za izradu lopatica vjetro turbina kao i ostali aspekti djelovanja vjetro turbine.

2. KONCEPT ODRŽIVOG RAZVOJA

Ujedinjeni narodi (UN) 2000. godine razvijaju program Milenijski razvojni ciljevi (engl. *Millennium Development Goals*, MDG) koji je bio primjenjiv sljedećih petnaest godina. Milenijski ciljevi su bili usmjereni na države u razvoju te su se bazirali na osam ciljeva koji su trebali biti postignuti do 2015. godine [Slika 1], [3].

Spomenuti Milenijski razvojni ciljevi bili su idući:

- iskorijeniti ekstremno siromaštvo i glad
- postići univerzalno osnovno obrazovanje
- promovirati ravnopravnost spolova i osnažiti žene
- smanjiti stopu smrtnosti djece
- poboljšati zdravlje majki
- boriti se protiv HIV/ AIDS-a, malarije i drugih bolesti
- osigurati održivost okoliša
- razviti globalno partnerstvo za razvoj.



Slika 1. Osam Milenijskih razvojnih ciljeva [4]

Novi program koji je UN razvio te koji se nadovezuje na Milenijske razvojne ciljeve se zove Ciljevi održivog razvoja (engl. *Sustainable Development Goals*, SDG). Ciljevi održivog razvoja je globalni sporazum koji je bio usvojen na Općoj skupštini Ujedinjenih naroda 2015. godine. To je princip koji podrazumijeva integrirani pogled na razvoj ljudskog društva i koji su potpisale 193 zemlje članice UN-a, među kojima je i Republika Hrvatska. Projekt obuhvaća tri dimenzije održivosti – gospodarsku, društvenu i ekološku [Slika 2] te je usmjeren sa 17 ciljeva, 169 podciljeva i 232 pokazatelja koji će trajati do 2030. godine [3].



Slika 2. Glavne sastavnice Ciljeva održivog razvoja [3]

2.1. Agenda 2030

Agenda 2030 je univerzalni plan djelovanja za ljude, planet Zemlju i prosperitet. Taj plan traži i nastoji ojačati svjetski mir te promiče slobodu svih ljudi. Glavni cilj je dobrobit svih naroda i oslobođenje od prijetnje siromaštva te osiguranje planeta održivim razvojem. Agenda se temelji na već spomenutim ciljevima koji su međusobno povezani i ostvarenjem jednog cilja se pridonosi ostvarenju svih ostalih ciljeva. Ciljevi Agende nisu lako ostvarivi i oni predstavljaju izazov za čovječanstvo da odvoji gospodarski rast od klimatskih promjena, siromaštva i nejednakosti [Slika 3], [5].

Ciljevi održivog razvoja su sljedeći:

- svijet bez siromaštva
- svijet bez gladi
- zdravlje i blagostanje
- kvalitetno obrazovanje
- rodna ravnopravnost
- čista voda i sanitarni čvorovi
- pristupačna i čista energija
- dostojanstven rad i ekonomski rast
- industrija, inovacije i infrastruktura
- smanjenje nejednakosti
- održivi gradovi i zajednice
- odgovorna potrošnja i proizvodnja
- odgovor na klimatske promjene
- očuvanje vodenog svijeta
- očuvanje života na zemlji
- mir, pravda i snažne institucije
- partnerstvom do ciljeva.



Slika 3. Ciljevi održivog razvoja [6]

Živimo u svijetu izazova na koje nijedna država ne može odgovoriti sama, a budući da je Republika Hrvatska članica Ujedinjenih naroda i Europske unije (EU), odlučila je sudjelovati u Agendi 2030. Hrvatska je od samog početka bila aktivna sudionica procesa donošenja dokumenata važnih za globalnu održivost i razvoj te je potpisala Agendu 21. u Rio de Janeiru. Republika Hrvatska se tijekom svih faza izrade Ciljeva održivog razvoja posebno zalagala za područje mira i sigurnosti te težnju ka pristupačnoj i čistoj energiji. Prema podacima iz 2019. godine, Hrvatska se nalazi na 22. mjestu od ukupno 162 zemlje za koje je provedeno prikupljanje podataka o uspješnosti provedbe ciljeva održivog razvoja [7].

Hrvatska polovinu potrošene energije dobiva iz vlastitih resursa (pretežno hidroelektrane). Prema podacima iz 2019. godine, situacija opskrbe električnom energijom je zadovoljavajuća i Hrvatska se nalazila na 61. mjestu od 190 zemalja u kojima je provedeno ispitivanje što još daje mjesta za poboljšanje. Zahvaljujući postojećim kapacitetima hidroelektrana te novoizgrađenim vjetroelektranama i solarnih elektrana, Hrvatska je ispunila zadani cilj od dvadeset posto udjela energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj potrošenoj energiji [7].

Hrvatska ima sve predispozicije biti jedna od glavnih predstavnika Agende 2030, a kako se posebno potiče energija vjetra i sunca mogu se predvidjeti i nova radna mjesta za inženjere u Republici Hrvatskoj.

2.2. Agenda 2030 i rastuća uporaba energije vjetra za proizvodnju električne energije

Količina električne energije u svijetu dobivene iz vjetroelektrana, bilo na kopnu ili na moru, u 2015. godini je iznosila 831,34 TWh. U 2021. godini je količina proizvedene električne energije dobivene iz istih izvora iznosila 1861,94 TWh, što pokazuje da je proizvodnja električne energije porasla preko 100 % [8].

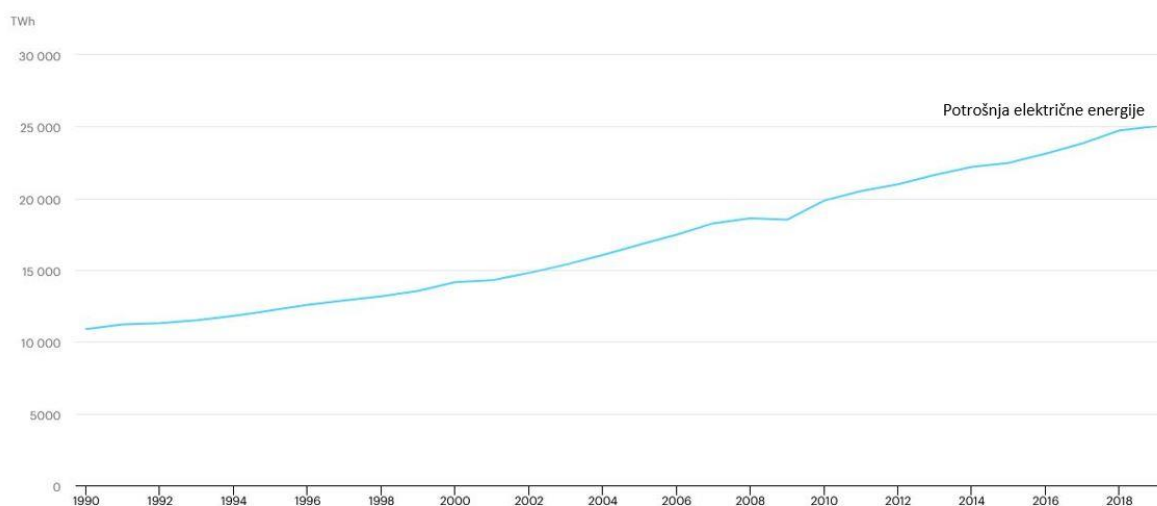
Sedmi cilj iz Ciljeva održivog razvoja se fokusira na dostupnost električne energije te promovira obnovljive izvore energije. Agenda najviše promiče energiju vjetra za vjetroelektrane te sunčevu energiju za solarne elektrane. Na 7. cilj se direktno nadovezuje i 13. cilj koji se naziva Odgovor na klimatske promjene. Taj cilj potiče smanjenje ispuštanja stakleničkih plinova jer imaju štetni utjecaj na ekološki sustav. Glavni podciljevi iz Cilja Pristupačna i čista energija su osiguranje pristupačne i pouzdane energije, dvostruko povećati globalnu stopu iskoristivosti vjetroturbin i vjetroelektrana, poticanje ulaganja u infrastrukturu za obnovljive izvore energije te, možda najvažniji, proširiti infrastrukturu i poboljšati tehnologije za dobivanje energije iz obnovljivih izvora na manje razvijene zemlje.

Svaki od navedenih podciljeva direktno utječe i povezuje Agendu 2030. s izgradnjom vjetroturbina i vjetroelektrana te s ostalim oblicima dobivanja energije iz obnovljivih izvora.

3. ELEKTRIČNA ENERGIJA U SVIJETU

Današnji, moderni svijet, nezamisliv je bez električne energije. Električnu energiju koristimo u skoro svakom procesu kroz dan, od jednostavnijih procesa kao što je paljenje svjetla do složenijih procesa kao što je napajanje nekog postrojenja.

Podaci Međunarodne agencije za energiju (engl. *International Energy Agency*, IEA) iz 2019. godine govore o potrošnji električne energije u svijetu od 25027,3 TWh [Slika 4]. Usporedbe radi, prosječna kuća u jednoj godini u Americi potroši 10716 kWh [9].



Slika 4. Potrošnja električne energije u svijetu od 1990. do 2019. [9]

3.1. Energija vjetra u svijetu

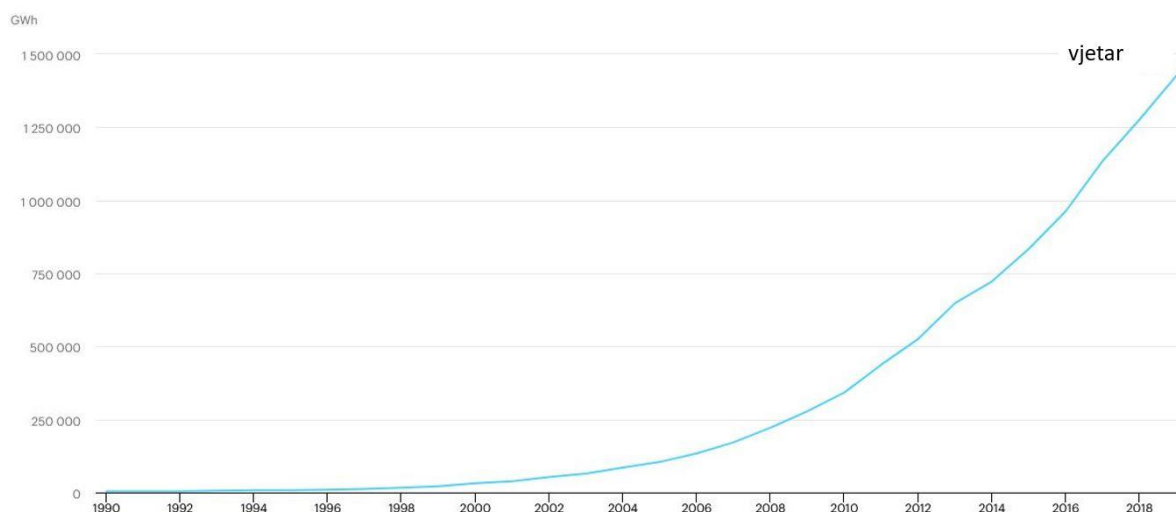
Prva „moderna“ vjetroturbina je instalirana 1887. godine u Škotskoj i služila je za napajanje akumulatora koji je davao električnu energiju za svjetlo. Danas u svijetu postoji preko 300000 vjetroturbina, a njihova proizvodnja je u porastu te je njihova efikasnost puno veća. Kronološki razvoj vjetroturbina će biti opisan u sljedećim poglavljima.

3.1.1. Proizvodnja električne energije iz vjetra u svijetu

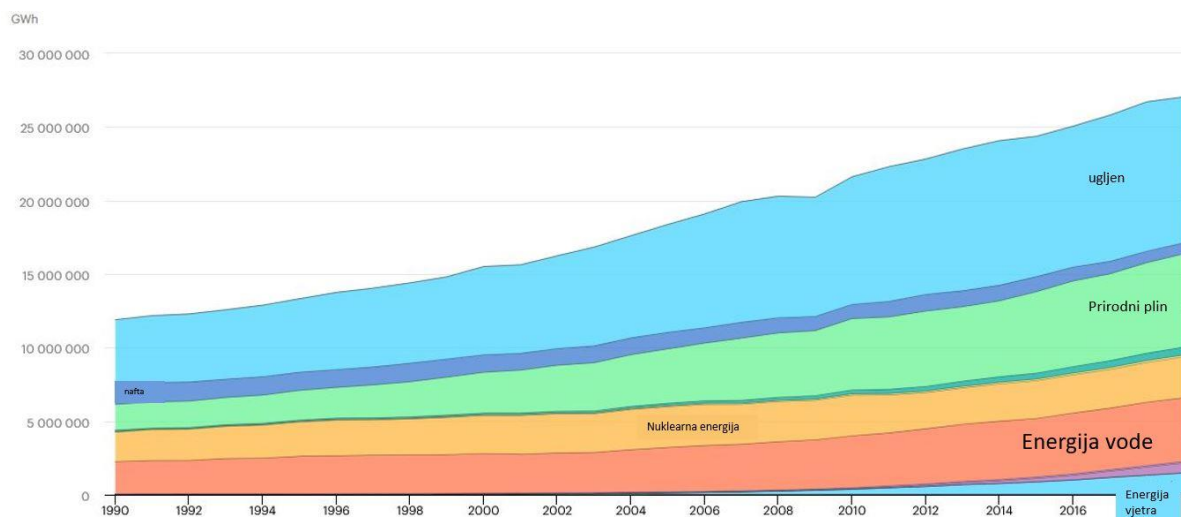
Obnovljivim izvorima energije se pokriva 29 % ukupne proizvodnje električne energije, a druga po količini proizvedene energije su, nakon hidroelektrana, vjetroturbine (8,4 %). Kako

bi se taj pozitivan trend velike proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora nastavio, potrebne su dobre vladine odluke i financijske potpore za postizanje još veće primjene električne energije. Upravo takve odluke su i bile donesene 2019. godine kada se uveo investicijski porezni kredit (engl. *investment tax credit*, ITC) koji smanjuje troškove izgradnje i instalacije vjetroturbina i vjetroelektrana. Pad cijene izgradnje vjetroturbina u razdoblju od 2010. godine i 2019. godine iznosi velikih 39 %. Pad cijene izgradnje je potaknuo trend izgradnje vlastitih infrastruktura solarnih elektrana ili vjetroelektrana u sklopu poslovnog kompleksa [10].

Prema podacima iz 2019. godine proizvodnja električne energije pomoću vjetra iznosila je 1427413 GWh [Slika 5]. Električna energija dobivena iz vjetra još uvijek nije konkurentna drugim oblicima dobivanja električne energije (ugljen, nafta, prirodni plin, nuklearna energija, energija vode) [Slika 6]. Jedan od razloga je učestalost puhanja vjetra, a kako vjetar ne puše konstantno, vjetroturbine nemaju istu iskoristivost cijelo vrijeme. Kina predvodi u proizvodnji električne energije iz vjetra, a na drugom mjestu su Sjedinjene Američke Države. Iako proizvodnja električne energije koristeći vjetar ne stvara stakleničke plinove, sama proizvodnja vjetroturbina i njihova instalacija šteti okolišu i zauzima puno mjesta. Rješenje takvih problema je ključno da energija dobivena vjetrom postane konkurentna ostalim oblicima proizvodnje energije [10].



Slika 5. Količina proizvedene električne energije dobivene vjetrom u svijetu od 1990. do 2019.
[9]



Slika 6. Usporedba proizvedene električne energije iz različitih izvora od 1990. do 2019. [9]

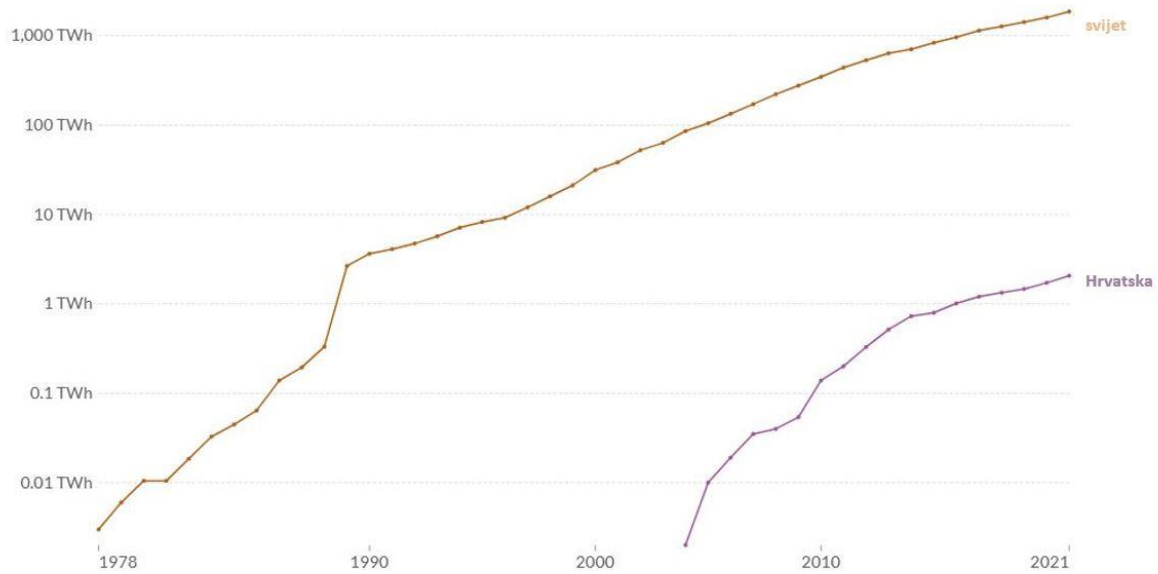
3.1.2. Potrošnja električne energije dobivene vjetrom u svijetu

Oko 11 % potrošene energije je dobiveno iz obnovljivih izvora energije prema podacima iz 2019. godine. Glavni i najveći potrošači su prijevoz, grijanje i napajanje. U posljednjih deset godina se zabilježio rast od 4 % a pretpostavke su i težnje ka još većem rastu u sljedećih 30 godina gdje se očekuje rast do 15 % [10].

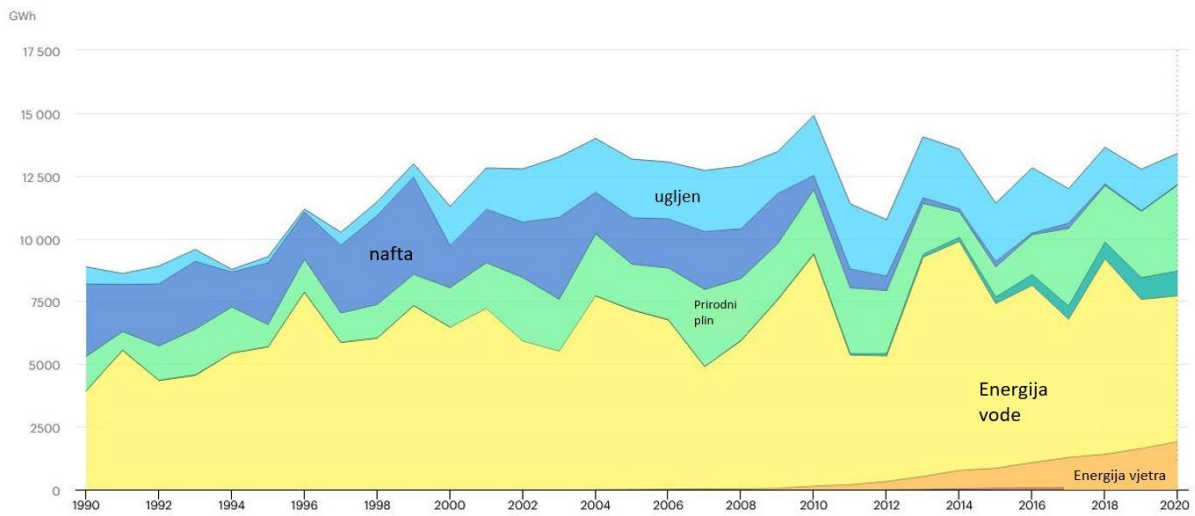
3.1.3. Proizvodnja električne energije dobivene vjetrom u Republici Hrvatskoj

Iako Hrvatska nema dugu povijest korištenja vjetroelektrana (prva uporaba tek 2004. godine), nalazi se na relativno visokom mjestu po količini proizvedene električne energije. Prema podacima za 2021. godine, količina proizvedene energije pomoću vjetra u Hrvatskoj je iznosila 2,07 TWh [Slika 7], [8].

Republika Hrvatska najviše električne energije dobiva iz hidroelektrana ako se gledaju obnovljivi izvori energija [Slika 8]. Prema podacima za 2020. godinu količina energije dobivena iz vode je iznosila 5810 GWh dok je za istu godinu količina energije dobivena iz vjetra iznosila 1721 GWh [9].



Slika 7. Količina proizvedene električne energije iz vjetra u Hrvatskoj od 2004. do 2021. i u svijetu od 1978. do 2021. [8]



Slika 8. Usporedba dobivene električne energije u Hrvatskoj iz različitih izvora od 1990. do 2020. [9]

4. RAD VJETROTURBINA U RAZLIČITIM KLIMATSKIM UVJETIMA

Kako bi stvorili energiju, svi obnovljivi izvori energije moraju mijenjati tok energije. Vjetroturbine stvaraju električnu energiju iskorištavanjem i pretvaranjem kinetičke energije vjetra. Utjecaji su vrlo maleni i nemaju štetne posljedice na okolno područje, no ono ipak postoji. Iako vjetroturbine imaju utjecaj na okoliš, postavlja se pitanje kakav utjecaj okoliš ima na efikasnost vjetroturbina [11].

4.1. Karakteristični klimatski uvjeti

Vjetroturbina dobiva snagu tako da pretvara silu vjetra u okretni moment pomoću lopatica rotora. Važni čimbenici lokacije vjetroturbine koji utječu na količinu energije vjetra koja se prenosi na rotor vjetroturbine su nadmorska visina, odnosno visina tornja vjetroturbine, gustoća zraka i njegova vlažnost, brzina vjetra, topografija (hrapavost) terena na kojem se nalazi vjetroturbina, temperatura zraka te količina soli u zraku [12].

4.1.1. Nadmorska visina

Čimbenik nadmorske visine je u korelaciji s čimbenikom brzine vjetra. Brzina vjetra ovisi o nadmorskoj visini terena. U teoriji, prema istraživanjima, ako se nadmorska visina dvostruko poveća, produktivnost vjetroturbine će se povećati za 34 %. Vjetroelektrane se ne mogu instalirati pri visokim nadmorskim visinama jer je u tom slučaju gustoća zraka premala [12].

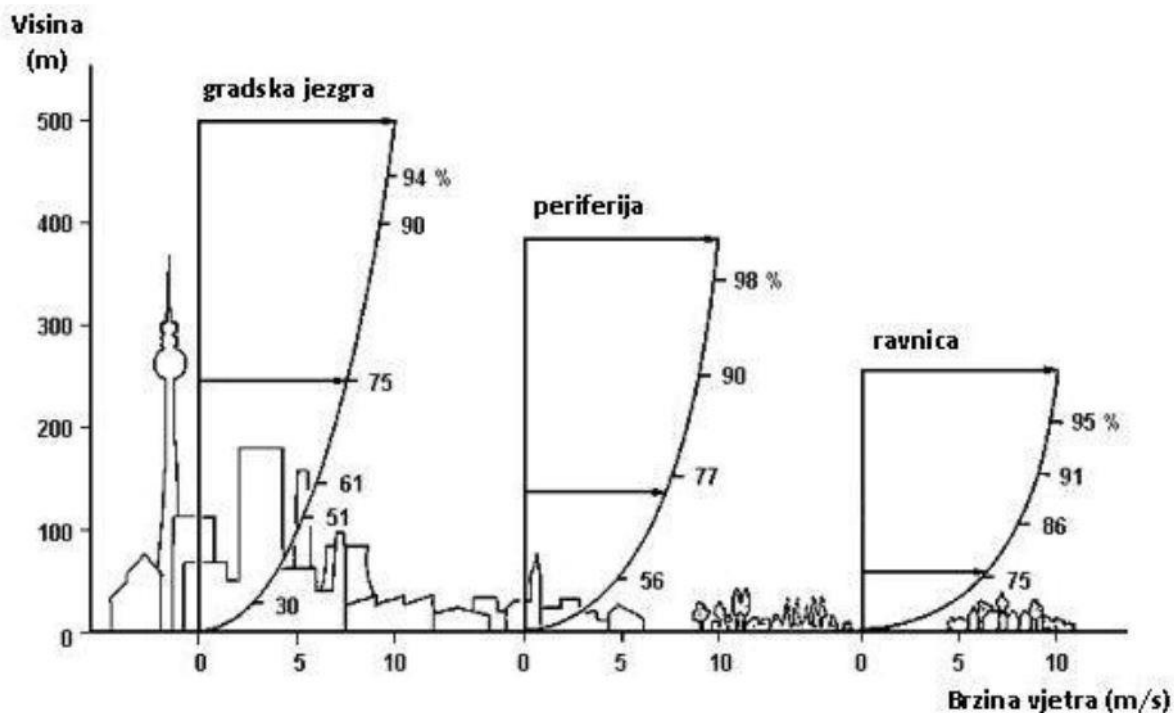
4.1.2. Gustoća zraka

Kinetička energija vjetra je funkcija ovisna o gustoći zraka. Kada je zrak gušći, tada vjetroturbina dobiva više energije. Vlažniji zrak ima veću gustoću nego suhi zrak, što je jedan od razloga za izgradnju odobalnih vjetroelektrana. Povišenjem nadmorske visine, gustoća zraka značajno pada. Upravo zbog tog razloga nije moguće instalirati vjetroelektranu u planinskom području [12].

4.1.3. Smicanje i brzina vjetra te topografija terena

Pojava da je profil vjetra zaokrenut prema manjoj brzini kako se približavamo razini tla naziva se smicanje vjetra. Ovisnost brzine vjetra o hrapavosti površine ima velik utjecaj na brzinu vjetra [Slika 9]. Kako je na slici prikazano da što se nalazimo bliže tlu, to vjetar ima manju brzinu i samim time manje snage. Prepreke na koje vjetar nailazi se dijele u razrede.

Najveći razred je četvrti i on predstavlja područje velike hrapavosti terena (stabla i nebudere) dok nulti razred predstavlja područje male hrapavosti terena i područje bez prepreka (oceani i obale). Teži se instalaciji vjetroelektrana na području obale ili u vodi kako bi se dobila što veća iskoristivost vjetroturbinе [12].



Slika 9. Ovisnost brzine vjetra o topografiji površine [13]

4.1.4. Temperatura zraka

Temperatura zraka utječe na vlažnost zraka a samim time i na efikasnost vjetroturbinе. Preporučeni temperaturni interval rada vjetroturbinе je od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. U ekstremnim uvjetima rada (područje vrlo niskih temperatura) se preporučuju posebne provjere i proračuni vjetroturbinе [14].

Visoke temperature u vrućim klimatskim pojasevima uzrokuju puno problema. Visoka temperatura može degradirati prevlaku koja se nalazi na lopaticama rotora i lopaticama vjetroturbinе, može uništiti elektroniku ili produljiti određene konstrukcijske dijelove koji moraju raditi u vrlo malom tolerancijskom polju. Vrlo niske temperature mogu naštetiti vjetroturbinu na druge načine. Niske temperature imaju značajan utjecaj na svojstva i karakteristike materijala koji se koriste u vjetroturbinama. Nadalje se pojavljuje problem sa sensorima koji se lede i gube svoju funkciju. Vrlo niske temperature uzrokuju smanjenje

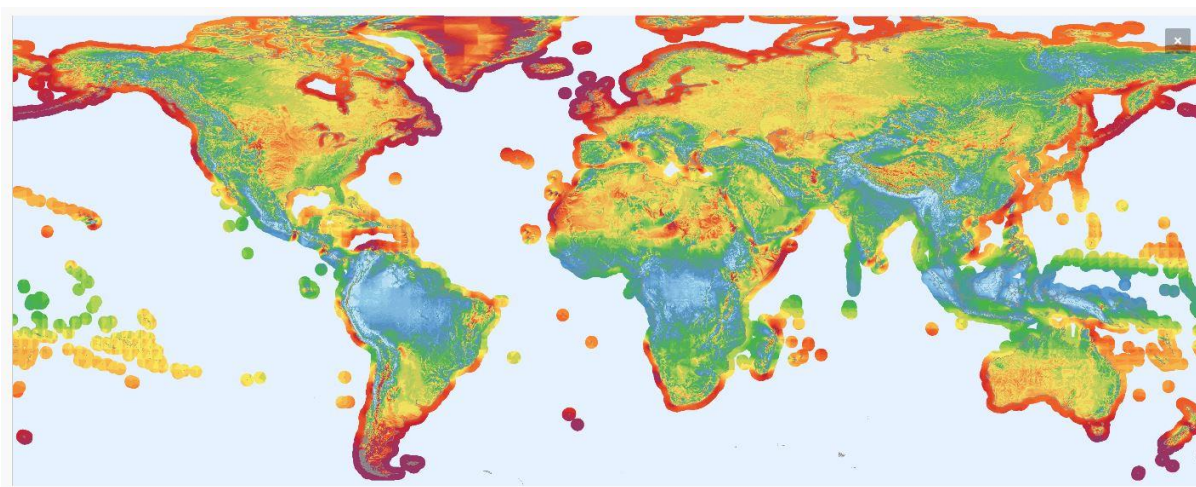
elastičnosti materijala, smanjuje se lomna žilavost te povećava viskoznost maziva što nije predviđeno kod konstrukcije vjetroturbina. Jedno od rješenja za neke od problema je korištenje posebne prevlake za lopatice od teflona koji je obojen u crnu boju kako bi smanjio izgradnju ledenog pokrivača te pomogao istisnuti nakupljeni led s pneumatskih i električnih konstrukcijskih dijelova [13], [14].

4.1.5. Količina soli u zraku

Velika količina soli u zraku nepovoljno utječe na vjetroturbinu. Može izazvati koroziju dijelova lopatica rotora. Problem velike količine soli u zraku zahtijeva posebne konstrukcijske karakteristike u području hlađenja i ventilacije. Vrlo je važna i površinska obrada čeličnih dijelova. Oštećenja vjetroturbina zbog prevelikog sadržaja soli u zraku su posebno česta na odobalnim vjetroelektranama [14].

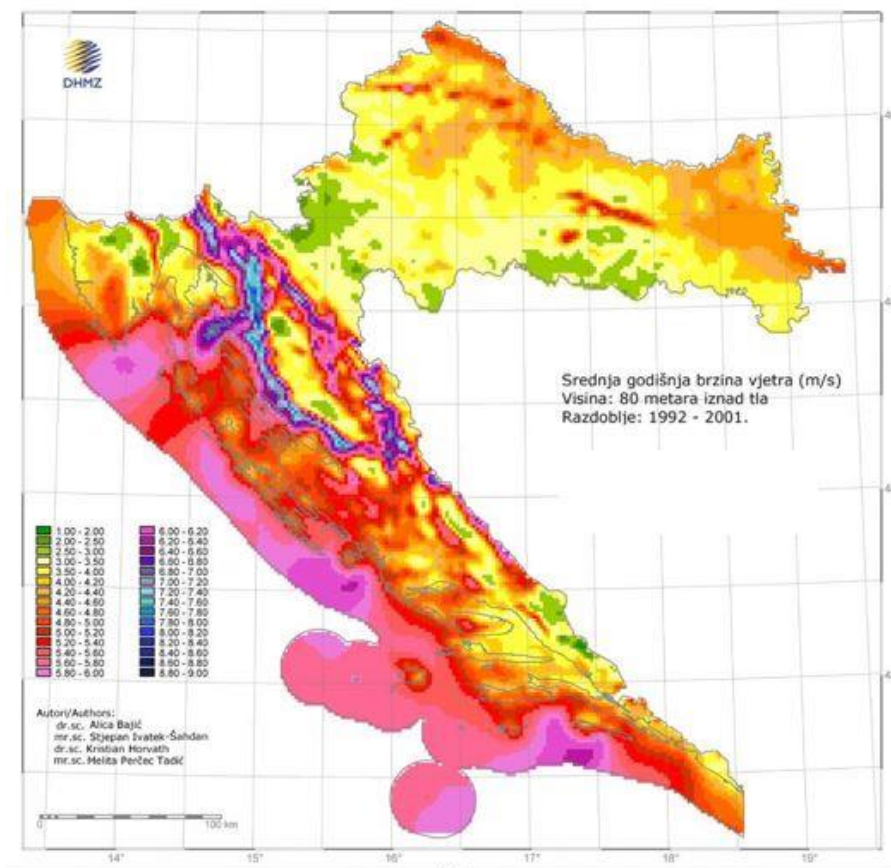
4.2. Resursi vjetra – vjetropotencijal

Atlasi (karte) resursa vjetra formiraju se najčešće na temelju brzine vjetra budući da je to najvažniji čimbenik. Pri tome se uzima u obzir srednja brzina vjetra i potrebno je napomenuti da je učestalost puhanja vjetra uzeta u obzir. Općenito se dobri resursi vjetra nalaze na područjima neiskoristivim čovjeku, u oceanima. U Europi se dobri resursi vjetra nalaze jedino u sjevernoj i sjeverozapadnoj Europi. Tamo pušu jaki vjetrovi s Atlantika i Sjevernog mora [Slika 10], [15].



Slika 10. Resursi vjetra na Zemlji na visini od 200 m [15]

Hrvatska nema visok vjetropotencijal [Slika 11]. U unutrašnjosti zemlje nema konstantnih jakih vjetrova. Na obali pušu jači vjetrovi, no oni nisu jednolični i svakodnevni (bura), a jedino područje jakih vjetrova je oko Velebita, koje nije pogodno za instaliranje vjetroelektrana, kako je objašnjeno u sljedećem poglavlju [16].



Slika 11. Resursi vjetra u Hrvatskoj na visini od 80 m [16]

4.3. Lokacija vjetroturbina i vjetroelektrana u svijetu

Odabir lokacije i instalacije vjetroturbina i vjetroelektrana je prema svemu navedenome iz ovog poglavlja vrlo važan zbog efikasnosti i količine dobivene električne energije. Treba se obratiti pozornost i na utjecaj vjetroelektrana na okoliš, životinje i na način ljudskog života u blizini vjetroelektrana što će biti opisano kasnije u ovome poglavlju. Lokacija instaliranja vjetroelektrana ovisi i o udaljenosti priključka na mrežu. Udaljenost priključka na mrežu je važan čimbenik odabira lokacije vjetroelektrane jer se s povećanom udaljenošću smanjuje količina prenesene energije. Odabir potencijalne lokacije vjetroturbine se odvija u 5 koraka:

1. Identifikacija geografskog područja koje treba daljnje proučavanje

Lokacije koje se uzimaju u obzir su one s visokom prosječnom brzinom vjetra prema podacima iz atlasa vjetra

2. Odabir mogućeg gradilišta

Pregledavaju se potencijalna vjetrovita mjesta gdje bi instalacija vjetroturbine ili vjetroelektrane bila prihvatljiva s javnog stajališta i iz stajališta inženjera. U ovoj fazi su potrebne detaljne analize

3. Preliminarna procjena gradilišta

U ovoj fazi se gradilišta rangiraju prema ekonomskom potencijalu, utjecaju na okoliš, javnom prihvaćanju lokacije, sigurnosti te operacijskim problemima

4. Završna procjena gradilišta

Ova faza zahtjeva sveobuhvatno mjerenje podataka o vjetru koji utječu na iskoristivost vjetroturbine kao što je smicanje vjetra i učestalost turbulencija te smjer vjetra

5. Odabir specifične lokacije za vjetroturbinu (engl. *micrositing*)

U ovoj fazi se koristi računalna analiza i računalno modeliranje područja na kojem puše vjetar te aerodinamične karakteristike okolnog područja

Područja koja zadovoljavaju navedene kriterije nije lako pronaći i često se nalaze na mjestima teško dostupnima ljudima.



Slika 12. Vjetroturbine V100, Texas, Sjedinjene Američke Države [17]



Slika 13. Kineska odobalna vjetroelektrana [18]



Slika 14. Vjetroelektrana Senj [19]

4.4. Utjecaj vjetroturbin na okoliš i ljudski život

Proizvodnja električne energije iz vjetra ima i pozitivne i negativne utjecaje na okoliš. S pozitivne strane energija vjetra se svrstava u ekološki prihvatljive izvore energije, pogotovo kada se u obzir uzme proizvodnja energije pomoću ugljena ili plina. Prema podacima o ispuštanju štetnih plinova, proizvodnja električne energije pomoću vjetra uopće ne oslobađa štetne plinove [Tablica 1], [13].

Tablica 1. Ispuštanje štetnih plinova različitim oblicima stvaranja električne energije (kg/MWh) [13]

zagađivač	ugljen	plin	vjetar
Sumporni oksidi	1,2	0,004	0
Dušikovi oksidi	2,3	0,002	0
Štetne čestice	0,8	0	0
Ugljikovi oksidi	865	650	0

Iako podaci iz Tablice 1 pokazuju da proizvodnja električne energije iz vjetra ne stvara štetne čestice i plinove, postoji indirektno ispuštanje štetnih tvari u okoliš prilikom izgradnje vjetroturbin i vjetroelektrana. Imajući na umu pozitivne aspekte korištenja vjetroturbin, u ovom poglavlju će biti opisan potencijalan negativni dio rada vjetroturbin. Neki od problema koji će biti opisani su utjecaj rada turbin na ptice i ostale životinje u području vjetroturbin, stvaranje buke, efekt sjene te smetnje u elektromagnetskom polju.

4.4.1. Utjecaj vjetroturbin na ptice i ostale životinje

Primarno pitanje koje se nameće u kontekstu utjecaja vjetroturbin na smrt ptica je jesu li i u kojoj mjeri one ekološki značajne. Vrlo je teško točno i precizno odrediti broj umrlih ptica uzrokovan vjetroturbinom. Jasno je da više ptica godišnje strada drugim ljudskim aktivnostima koje nisu dokumentirane. Prema podacima iz 2005. godine, zbog sudaranja ptica sa zgradama godišnje umre oko 97 milijuna ptica, zbog sudaranja ptica s visokonaponskim kablovima godišnje umre oko 130 milijuna ptica, a automobili ubiju oko 80 milijuna ptica godišnje. Vjetroturbin godišnje ubiju oko 30000 ptica što je značajno manje nego drugi navedeni razlozi. Prema istome istraživanju broj šišmiša koji smrtno strada zbog rada vjetroturbin je veći, no svejedno nema veliko ekološko značenje. Najveći problem kod instalacije vjetroturbin je uništavanje prirodnog prebivališta određenih životinjskih vrsta. Prema svemu navedenom može se zaključiti da je štetan utjecaj vjetroturbin na životinje

vrlo malen u usporedbi s ostalim načinima stradavanja istih. Taj štetan utjecaj ipak nije zanemariv i inženjeri pokušavaju riješiti taj problem [20].

4.4.2. Buka vjetroturbina

Buka se definira kao nepoželjan zvuk. Mjerenje buke je vrlo subjektivno i ovisi o toleranciji osobe na zvuk. Buka se dijeli u tri kategorije: buka koja izaziva iritacije, smetnje ili nezadovoljstvo; buka koja izaziva teškoće u pričanju, spavanju ili učenju; buka koja izaziva fizičku nelagodu, zvonjenje u ušima ili gubitak sluha. Vjetroturbine mogu proizvesti buku iz izmjenjivača, kočnica, nekih hidrauličkih dijelova ili čak iz električnih komponenti. Skoro u svim slučajevima, zvuk povezan s vjetroturbinama se uvrštava u prvu kategoriju buke [20].

Danas se vjetroturbine dizajniraju tako da se smanji mehanička buka. Smanjenje mehaničke buke se postiže završnom obradom zubi zupčanika, koristeći niskookretne ventilatore te dodavanjem akustičnih izolatora oko rotora vjetroturbine [13].

4.4.3. Efekt sjene

Kao i svaka velika građevina, i vjetroturbina stvara sjenu. Ono što je problem kod sjene koju stvara vjetroturbina je okretanje rotora vjetroturbine. Okretanje rotora uzrokuje stvaranje neugodnog efekta na promatrača. Vjetroturbina s rotorom koji ima tri lopatice će sjeći zrake Sunca s trostruko većom frekvencijom rotacije rotora. Upravo taj efekt može izazvati nelagodu kod čovjeka ili čak i mučninu., pogotovo ako se radi o više vjetroturbina na istom području [Slika 15], [14].



Slika 15. Sjena vjetroturbine [14]

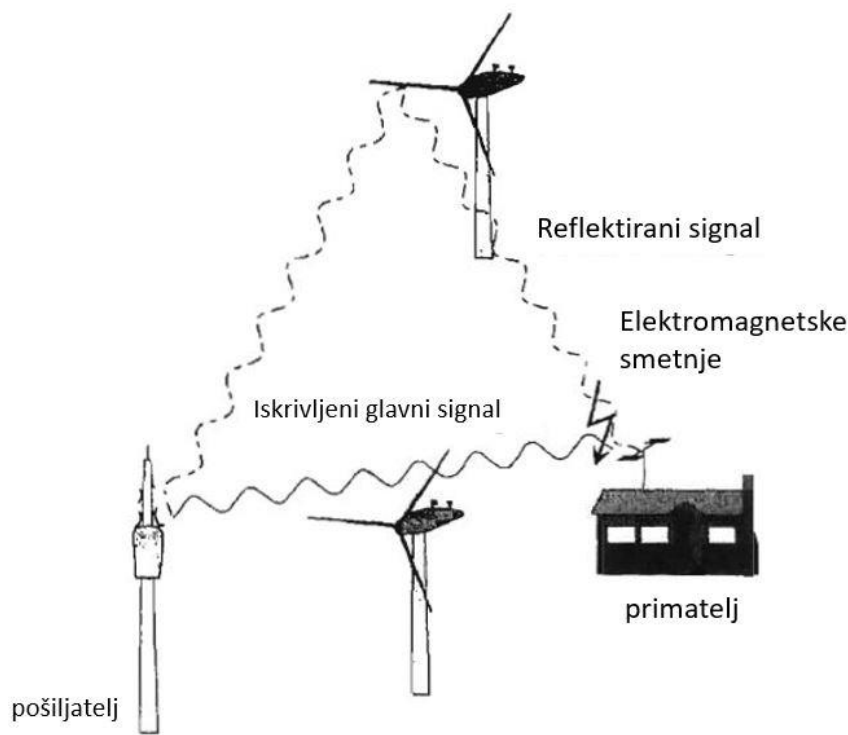
Danas se vjetroturbine mogu ugraditi s regulatorom rotora. Koristi se program koji zaustavlja rotor turbine kada je to potrebno kako ne bi stvarao sjenu koja smeta ljudima. Godišnji gubitci energije zbog kratkoročnog zaustavljanja rotora su zanemarivi. Osim efekta sjene postoji problem uzrokovan suncem. Kada zrake sunca padaju izravno na lopatice vjetroturbine, dolazi do efekta odbljeska što može biti opasno po promatrača. Taj problem se riješio dodavanjem ne – reflektirajućeg premaza na lopatice rotora vjetroturbine [14].

4.4.4. Udar munja

Poznato je da visoke strukture privlače udare munja, posebno ako se nalaze na velikim čistim površinama. Prema podacima, prosječna vjetroturbina će pretrpjeti oko dvadeset udara munje tijekom svog životnog vijeka. Udar munje najčešće ili zapali lopatice vjetroturbine ili ošteti elektronske komponente unutar turbine. Problem se rješava sustavom odvratanja munja (engl. *lightning prevention system*, LPS) osmišljenom u Danskoj. Sustav se ugradi u samu lopaticu i provodi električni naboj kroz lopatice do tla. Sustav uključuje ugradnju silaznog vodiča u korijen lopatice [21].

4.4.5. Elektromagnetske smetnje

Vjetroturbine mogu predstavljati prepreku za upadne elektromagnetske valove tako što će ih reflektirati ili raspršiti [Slika 16]. Primičeni signal može biti značajno promijenjen što u nekim slučajevima može izazvati kvarove kod električnih uređaja. U prošlosti, kada su lopatice vjetroturbine bile napravljene od čelika, pojavljivale su se smetnje na televiziji, kod telefonskih razgovora ili na radio stanicama. Danas je taj problem riješen tako što se lopatice vjetroturbina rade od pretežno kompozitnih materijala. Način na koji se danas rješava problem uklanjanja smetnji elektromagnetskih valova je konstrukcija lopatica i tornja vjetroturbine, brzina rotiranja lopatica te dimenzije same vjetroturbine [13].



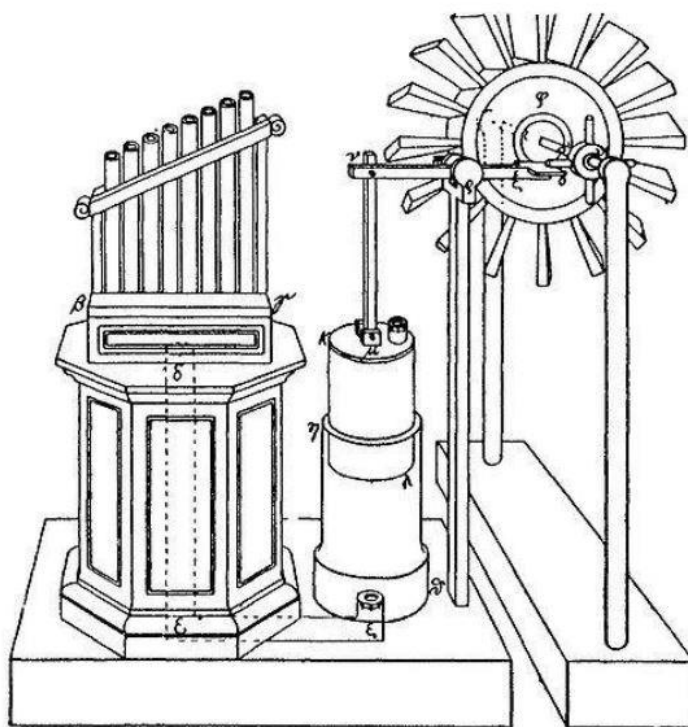
Slika 16. Raspršivanje elektromagnetskog signala zbog vjetroturbine [13]

5. RAZVOJ VJETROTURBINA

Proces konstruiranja vjetroturbina i izbor materijala uključuje konceptualno spajanje velikog broja mehaničkih i električnih komponenti u sklop koji može pretvoriti snagu vjetra u prihvatljivu električnu energiju. Idealni slučaj bi bio kada bi cijena proizvodnje energije iz vjetra bila manja od konkurenata (nafta, prirodni plin, nuklearna energija). Trenutno stanje tehnologije to onemogućava i često uključuje vrlo teške zahtjeve.

5.1. Začetci iskorištavanja vjetra

Ideja o iskorištavanju vjetra za dobivanje energije se pojavila u prvom stoljeću Nove ere. Grčki inženjer Heron je dizajnirao vjetrenjaču koja je samo pomoću vjetra dovođila snagu za pogon stroja [Slika 17], [22].

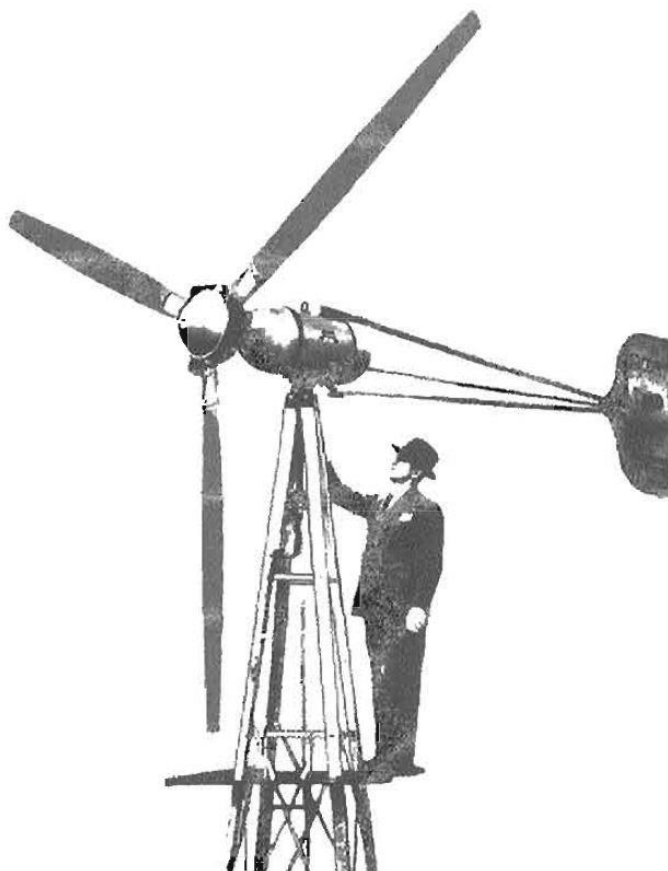


Slika 17. Heronova vjetrenjača [23]

Prva dokumentirana izvedba vjetrenjače datira iz 644. godine i nalazila se u Perziji (danas Iran). Služila je za otpuhivanje zanosu pijeska koji su tada mogli prekriti cijele gradove. Kasnije su se vjetrenjače koristile diljem Europe za mljevenje ili za pumpanje vode [24].

5.2. Prve vjetroturbine

Inicijalna uporaba vjetra za proizvodnju električne energije, za razliku od mehaničke energije koju su do tada proizvodile vjetrenjače, je krenula s uspješnim komercijalnim vjetrogeneratorima krajem 19. stoljeća. Prva poznata vjetroturbina koja proizvodi električnu energiju je bila izgrađena u Škotskoj 1887. godine. Bila je visoka deset metara i služila je za punjenje akumulatora. Prvi slučaj u kojemu je rotor pogonio generator se dogodio 1888. godine u saveznoj državi Ohio (SAD). Osmislio i izgradio ju je Jacobs. Jacobsova turbina se smatra začetnicom današnjih, modernih vjetroturbina [Slika 18]. Sve izvedbe lopatica vjetrenjača i vjetroturbina su bile od drveta, najčešće od hrasta i mahagonije. 1882. godine je Jacobs zamijenio drvene lopatice vjetroturbine s aluminijskim propelerom zrakoplova što je uvelike povećalo efikasnost turbine [13,22].



Slika 18. Jacobsova vjetroturbina [13]

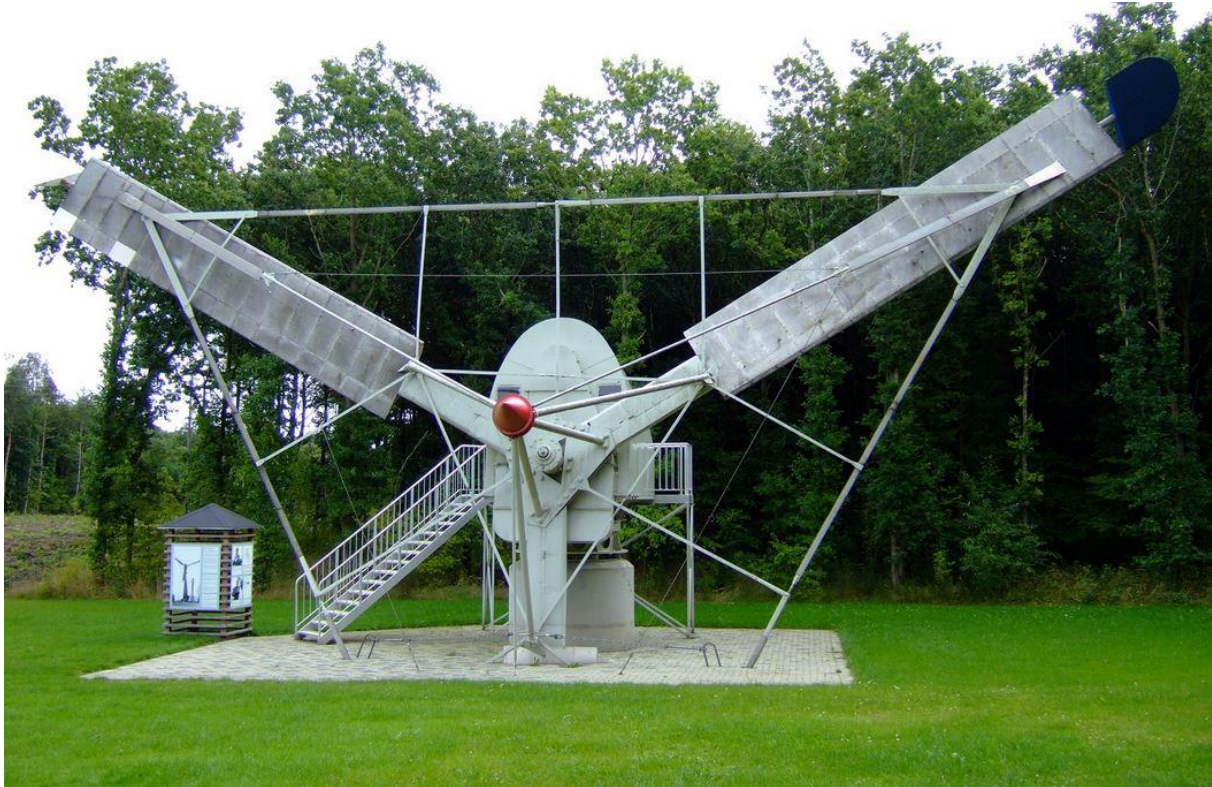
Od 1941. godine sve više vjetroturbina koristi čelične lopatice, no one su predstavljale problem kod proizvodnje i transporta. Zamjena za teške, čelične lopatice su bili kompozitni materijali koji su se krenuli koristiti 1956. godine. Nakon sedamdesetih godina se koriste pretežno kompozitni materijali koji će biti detaljnije opisani u sljedećem poglavlju. Prva vjetroelektrana je uspostavljena 1980. godine u New Hampshire-u (SAD) a iste godine Danska kreće s postavljanjem temelja za prvu odobalnu vjetroelektranu. 1991. godine je konstruirana prva odobalna vjetroelektrana u južnoj Danskoj. Sastojala se od jedanaest vjetroturbina snage 450 kW. Krajem 20. stoljeća kreće razdoblje modernih vjetroturbina i vjetroelektrana a energija dobivena iz vjetra postaje jedna od najpoželjnijih vrsta energije [22].

5.3. Moderne vjetroturbine

Prema Betzovoj teoriji, najveća moguća iskoristivost vjetroturbine je 59,3 %. Razlog zašto nije moguće dobiti veću efikasnost turbine je mehanika fluida vjetra. Vodeće svjetske kompanije počinju istraživati vjetroturbine i nastoje ih unaprijediti kako bi postigle Betzov koeficijent efikasnosti. Izbor materijala lopatica, komponenti generatora i tornja uvelike unaprjeđuje vjetroturbine. One postaju snažnije, jeftinije i njihova izgradnja manje šteti okolišu. Time započinje razdoblje proizvodnje modernih vjetroturbina [24,25].

5.3.1. Vjetroturbina ELSAM Gedser

Jedna od prvih vjetroturbina koja je imala kompozitnu strukturu lopatica je bila Gedserova vjetroturbina [Slika 19]. Instalirana je 1956. godine na Danskoj obali. Rotor je imao tri kompozitne lopatice. Lopatice su bile sastavljene od čelične ramenjače koja je preuzimala većinu opterećenja, drvenih rebara koji su služili kao ojačanje strukture te je oklop bio aluminijski. Promjer rotora je iznosio 24 m. Snaga vjetroturbine je bila 200 kW. Toranj vjetroturbine je bio izgrađen od betona a danas se na istom tornju iz 1956. godina instalirao novi model Gedserovog rotora. Vjetroturbina je bila u opticaju jedanaest godina bez održavanja. Danas se rotor turbine drži u Danskom tehničkom muzeju [26].



Slika 19. Gadserova vjetroturbina (200 kW) [26]

5.3.2. Vjetroturbina NASA MOD- 5B Boeing

Vjetroturbina MOD- 5B je izgrađena 1981. godine i postavljena je u sklopu vjetroelektrane u Oahu na Havajima (SAD) [Slika 20]. Imala je snagu od 3,2 MW i rotor joj se sastojao od dvije lopatice. Promjer rotora je iznosio 97,5 m. Materijal lopatica je bio zavareni čelik. Vjetroturbina je bila u potpunosti automatizirana i njome se upravljalo preko računalnog programa. MOD- 5B se koristio do 1996. godine kada je ugašen zbog financijskih razloga [27].



Slika 20. Vjetroturbina MOD- 5B (3,2 MW) [27]

5.3.3. Vjetroturbina Bonus B35/450

Bonus B35/450 je model vjetroturbine koja se koristila u prvoj odobalnoj vjetroelektrani na svijetu [Slika 21]. Vjetroelektrana Vindeby se sastojala od jedanaest Bonus vjetroturbina. Instalirana je 1991. godine u Danskoj. Koristila se sve do 2017. godine, kada je ugašena zbog financijskih razloga i čestih popravaka. Snaga joj je bila 450 kW. Promjer rotora joj je iznosio 35 m . Sastojala se od tri lopatice. Lopatice su bile od polietilen tereftalata (PET), što je konstrukciju činilo dosta lakšom od ostalih vjetroturbina [28,29].



Slika 21. Vjetroturbina Bonus B35/450 (450 kW) [28]

5.3.4. Vjetroturbina MAN WKA-60 (GROWIAN II)

Growian II vjetroturbina je konstruirana 1990. godine [Slika 22]. Snaga joj je bila 1,2 MW. Promjer rotora je bio 60 m i imao je tri lopatice. Materijal lopatica je bio polimerni kompozit ojačan staklenim vlaknima (engl. *glass fiber reinforced plastic*, GFRP). Polimerna matrica je bila poliesterska smola, koja daje kemijsku postojanost. Staklena vlakna daju čvrstoću kompozitu. Vjetroturbina se koristila do 1995. godine, što je relativno kratko vrijeme rada vjetroturbine, no imala je problem s udarom munja tijekom nevremena, što je u konačnici zaustavilo rad turbine [30].



Slika 22. Vjetroturbina MAN WKA-60 (1,2 MW) [30]

5.3.5. Vjetroturbina SG 3.4 – 132

Kompanija Siemens Gamesa, koja je 1991. godine instalirala prvu odobalnu vjetroelektranu pored grada Vindeby-ja na danskom otoku Lolland, je nastavila proizvoditi jedne od najefikasnijih vjetroturbina današnjice. Trenutno je vodeća tvrtka u svijetu u industriji obnovljive energije. Model vjetroturbine SG 3.4 – 132 je instaliran 2016. godine u Francuskoj [Slika 23]. Ima snagu od 3,465 MW i vrlo tih način rada za tako snažnu turbinu. Promjer rotora je 132 m i sastoji se od tri lopatice. Lopatice su napravljene od polimernog kompozita ojačanog staklenim vlaknima. Izbor toga materijala zajedno s novim dizajnom aerodinamičnog profila lopatice omogućuje proizvodnju puno lakših lopatica s većom čvrstoćom i poboljšanim dinamičkim performansama. Od 2017. godine Siemens Gamesa ima otvoren projekt s Hrvatskom. Instalirala je vjetroelektranu u Zadru snage 44,2 MW. Vjetroelektrana se sastoji od trinaest vjetroturbina modela SWT 3.4. – 108 [31,32].



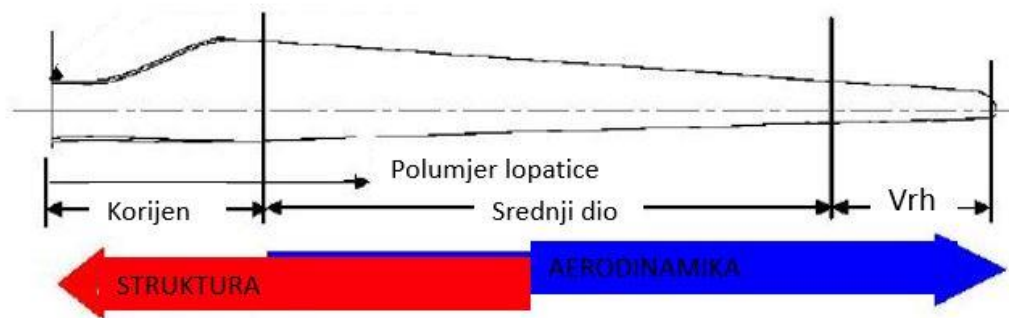
Slika 23. Vjetroturbina SG 3.4 – 132 u Francuskoj (3,465 MW) [31]

6. IZBOR MATERIJALA ZA LOPATICE VJETROTURBINA

Važnost postavljanja zahtjeva za materijal lopatica vjetroturbina je ključan dio procesa konstruiranja lopatica. Na lopaticama vjetroturbine se pojavljuju opterećenja uzrokovana tlakom vjetra i gravitacijske sile zbog same mase lopatice. Kako bi lopatica izdržala tako velika opterećenja bitno je konstruirati pravilan oblik lopatice i pomno izabrati duljinu lopatice. Danas se teži konstruiranju većih lopatica kako bi proizvedena energija bila što veća, no takve dugačke lopatice su podložne prekomjernom savijanju. Jako je bitna krutost lopatice kako ne bi došlo do kontakta lopatice i tornja vjetroturbine, odnosno bitan je omjer krutosti i mase. Osim duljine lopatice očekuje se da one ostanu u upotrebi preko dvadeset godina jer se još uvijek rješava njihov problem recikliranja. Upravo je zato vrlo bitno odrediti materijal koji je otporan na pojavu umora uzrokovanu cikličkim naprezanjem (u teoriji bi trebao izdržati preko 100 milijuna ciklusa). Također, lopatice moraju imati propisanu i dovoljno visoku čvrstoću na mjestu spajanja s rotorom kako bi izdržale opterećenja uzrokovana okretnim momentom prilikom rada. Osim navedenih mehaničkih zahtjeva, izbor materijala lopatice bi trebao uključivati i funkcionalnost i eksploataбилnost. Trebalo bi se težiti što jednostavnijim postupcima proizvodnje lopatica te njihovoj obradivosti. Proces izbora materijala uključuje i ekonomičnost proizvodnje lopatica te recikličnost [25].

6.1. Lopatica vjetroturbine

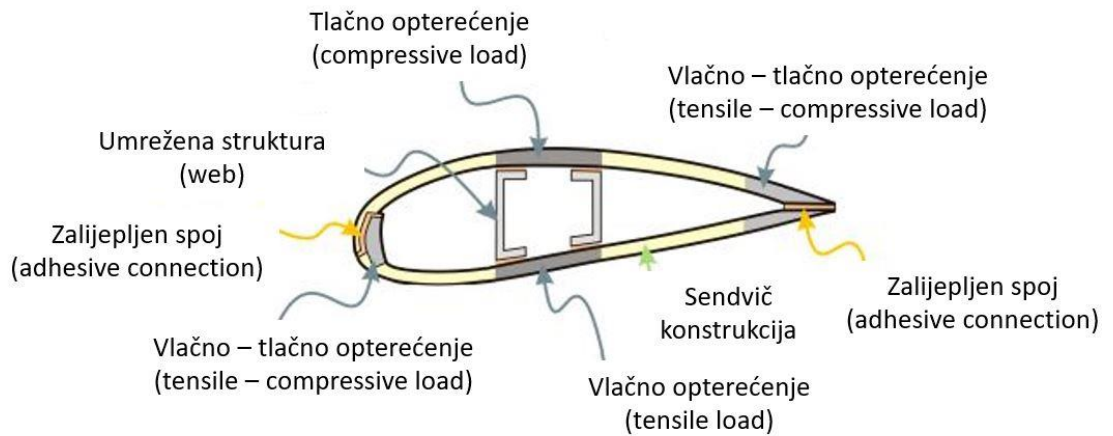
Odabir pravilnog izgleda lopatice vjetroturbine se provodi pomoću BEM – metode, koja se temelji na Betzovoj teoriji. Betzova metoda daje opći oblik lopatice moderne vjetroturbine. Dizajn današnje moderne lopatice se može podijeliti na tri glavna područja koji utječu na aerodinamiku lopatice i na strukturne funkcije lopatice [Slika 24].



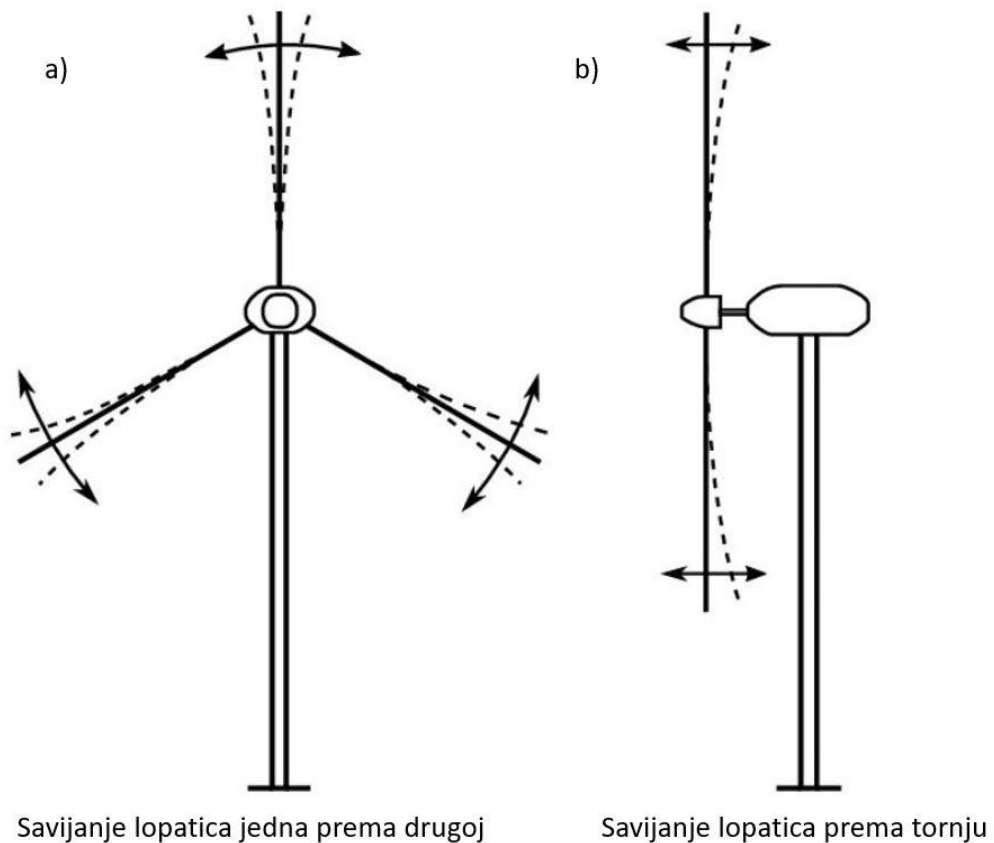
Slika 24. Tri glavna strukturalna područja lopatice vjetroturbine [33]

Korijen lopatice označava tranziciju između turbine i lopatice. Na korijenu se nalaze najveća opterećenja i zbog toga zahtjeva odabir materijala velike čvrstoće. Korijen ima vrlo lošu aerodinamičku učinkovitost, no zato jako utječe na strukturalnu stabilnost. Na korijen se nastavlja srednji dio lopatice koji je najduži i ima najvišu aerodinamičku učinkovitost, odnosno jako je važan za aerodinamiku cijele lopatice. Vrh je najvažniji dio lopatice vjetroturbine, koji nema nikakav utjecaj na strukturalnu stabilnost, ali je zato kritičan za aerodinamiku lopatice. Danas postoje izvedbe vrhova lopatica koji smanjuju gubitke vjetroturbine i buku koju one proizvode [33].

Lopaticе vjetroturbine se sastoje od dva lica (usisna strana i stlačena strana) koja su spojena i očvršćena s jednom ili više mrežastih strukturala (engl. *web*) i koje nose preko 90 % smičnog naprezanja [Slika 25]. Tlačna sila vjetra uzrokuje opterećenje na lopaticu koje je savija prema tornju (engl. *flapwise load*). Gravitacijske sile i okretni moment uzrokuju opterećenje koje savija lopaticе jedne prema drugima (engl. *edgewise*) [Slika 26], [25,34].



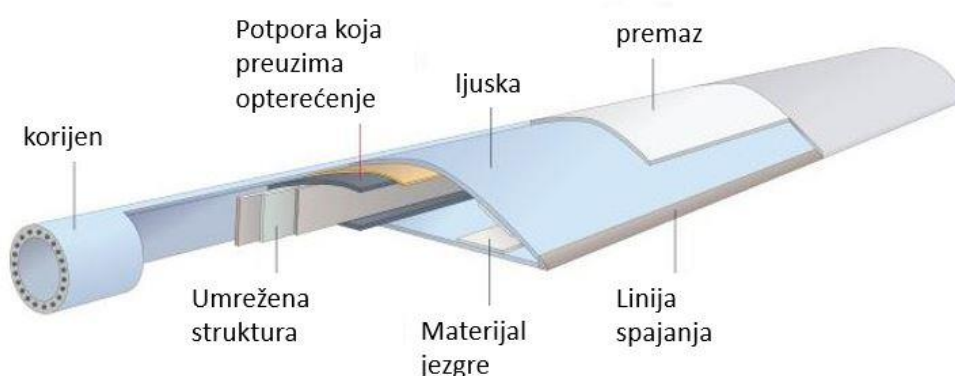
Slika 25. Poprečni presjek lopatice vjetroturbine [25]



Slika 26. a) Savijanje lopatica jedna prema drugoj (*edgewise*), i b) prema tornju (*flapwise*) [34]

Savijanje lopatica prema tornju uzrokuje vlačno cikličko naprezanje, dok savijanje lopatica jedna prema drugoj uzrokuje tlačno cikličko naprezanje. Savijanje lopatica se sprječava korištenjem laminatne strukture koja se nalazi unutar lopatica. Na laminatnim strukturama koje se nalaze s prednjem i stražnjem rubu lopatice se nalaze vlačno – tlačna naprezanja uzrokovana gravitacijskim opterećenjem. Površina od koje je napravljeno tijelo lopatice je sendvič – konstrukcija i primarno je dizajnirana da bude otporna na elastično izvijanje [25]. Različita ciklička naprezanja koja su prisutna na lopatici vjetroturbine sugeriraju da bi bilo korisno koristiti različite materijale za različite dijelove lopatice, a upravo su kompoziti trenutno najprivlačniji materijali.

Prikaz lopatice s unutarnjim strukturnim komponentama za koje je jako važan izbor odgovarajućeg materijala će biti prikazan u nastavku [Slika 27] i na temelju slike će biti objašnjeni određeni materijali koji se koriste pri konstrukciji lopatica vjetroturbina.



Slika 27. Lopatica vjetroturbine sa strukturnim komponentama [35]

Lopaticе vjetroturbine se proizvode u kalupima. Naprave se dva lica lopaticе koji se spajaju ljepilom, tj. adhezijskim vezivanjem. Adhezijska sredstva koja se koriste su epoksidna smola, vinilester ili poliuretanska (PUR) pjena. Unutar lopaticе se stavlja rešetkasta struktura koja daje potporu, odnosno nosi opterećenje [36].

6.2. Kompozitni materijali

Kompoziti su materijali koji se sastoje od dva ili više kemijski različitih konstituenata s različitim svojstvima. Velika čvrstoća, otpornost na umor materijala, krutost i korozijska otpornost su samo neka od vrlo dobrih svojstava što posjeduje kompozit. Većina današnjih lopatica vjetroturbine je napravljena od polimernog kompozita ojačanog uglavnom staklenim ili ugljičnim vlaknima [Slika 28]. Komponente koje su izgrađene od kompozitnog materijala su jezgra lopatice, ljske te dio rešetkaste strukture. U kompozit se ugrađuju dugačka usmjerena vlakna koja osiguravaju longitudinalnu krutost i čvrstoću te služe kao osnovni nosivi element kompozita, dok polimerna matrica povezuje vlakna, štiti vlakna od vanjskih utjecaja, prenosi opterećenja na vlakna te formira vanjski oblik kompozita [37].



Slika 28. Sastav kompozita [37]

6.2.1. Ojačalo kompozita

Krutost kompozita ovisi o krutosti vlakana koji se koriste i o njihovom volumnom udjelu. Najčešće se koriste E – staklena vlakna koja imaju vrlo povoljna svojstva za lopatice vjetroturbine [Tablica 2]. Povećanjem volumnog udjela vlakana u kompozitu se povećava krutost te vlačna i tlačna čvrstoća. Udio vlakana ne smije prijeći 65 % jer je onda moguća pojava suhih područja unutar kompozita što smanjuje otpornost na umor materijala. U uporabi su i S – staklena vlakna te R – staklena vlakna. Osim staklenih vlakana koriste se i ugljična vlakna, aramidna vlakna (Kevlar) i vlakna bazalta [38].

Tablica 2. Svojstva E – staklenog vlakna [38]

Vlakno	Talište , °C	Vlačna čvrstoća, MPa	Modul elastičnosti, GPa	Gustoća, kg m ⁻³	Istezljivost, %
E-staklena vlakna	1200	3100 – 3800	70 – 77	2,55 – 2,64	4,5 – 4,9

S – staklena vlakna imaju 40 % veću savojnu čvrstoću i rasteznu čvrstoću od E – staklenih vlakana. Također imaju veću tlačnu čvrstoću. Sastav S – staklenih vlakana je magnezijev aluminijev silikat, što čini proizvod vrlo skupim i samim time se ne upotrebljava često. R – staklena vlakna imaju sastav kalcijevog aluminijevog silikata s dodatkom oksida i taj tip vlakana je vrlo skup, ali ima odlična mehanička i fizikalna svojstva za lopatice vjetroturbine. U budućnosti se očekuje uporaba vlakana WindStrand 4000. To je novi oblik R – staklenih vlakana koji je još u fazi ispitivanja, ima 15 % veću krutost i 30 % veću čvrstoću od E – staklenih vlakana te pokazuje jako dobru otpornost na umor materijala pod vlačnim i tlačnim naprezanjem.

Ugljična vlakna se vrlo često koriste kao ojačalo u kompozitima za lopatice vjetroturbine. Imaju mnogo veću krutost i manju gustoću od staklenih vlakana. Uporabom ugljičnih vlakana se omogućava proizvodnja tanjih i lakših lopatica. Imaju relativno malu toleranciju na oštećenje, malu tlačnu čvrstoću i puno su skuplje od lopatica sa staklenim vlaknima [Tablica 3]. Podložne su ne – poravnavanju, što dovodi do velikog smanjenja čvrstoće i lomne žilavosti. Najčešće se koristi u Gamesinim vjetroturbinama za umreženu strukturu koja daje potporu te za dijelove korijena lopatice .

Tablica 3. Svojstva ugljičnih vlakana [38]

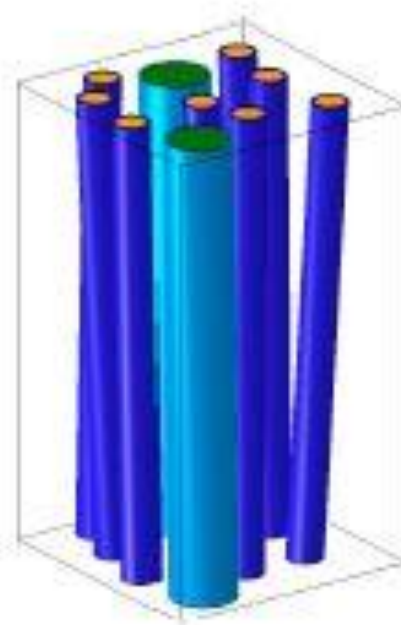
Vlakno	Vlačna čvrstoća, GPa	Modul elastičnosti, GPa	Gustoća, kg m ⁻³	Istezljivost, %
Ugljično vlakno	3,450 – 5,520	220 – 240	1,7 – 1,8	0,7

Armadina vlakna su aromatski poliamidi koji imaju bolji omjer čvrstoće i težine od bilo kojeg drugog vlakna za ojačavanje. Imaju malu masu, visoku čvrstoću i žilavost zbog čega se koriste za kompozite u umreženoj strukturi unutar lopatice vjetroturbine. Aramidna vlakna apsorbiraju vlagu, mogu se razgraditi pod utjecajem ultraljubičastog zračenja i imaju relativno nisku adheziju za polimernu smolu. Tlačna čvrstoća im je niža od ugljičnih vlakana i skuplji su od staklenih ili ugljičnih vlakana [Tablica 4], [38].

Tablica 4. Svojstva aramidnih vlakana [38]

Vlakno	Vlačna čvrstoća, GPa	Modul elastičnosti, GPa	Gustoća, kg m ⁻³	Istezljivost, %
Aramidna vlakna	3,6 – 4,1	133 – 135	1,44	2,5 – 3

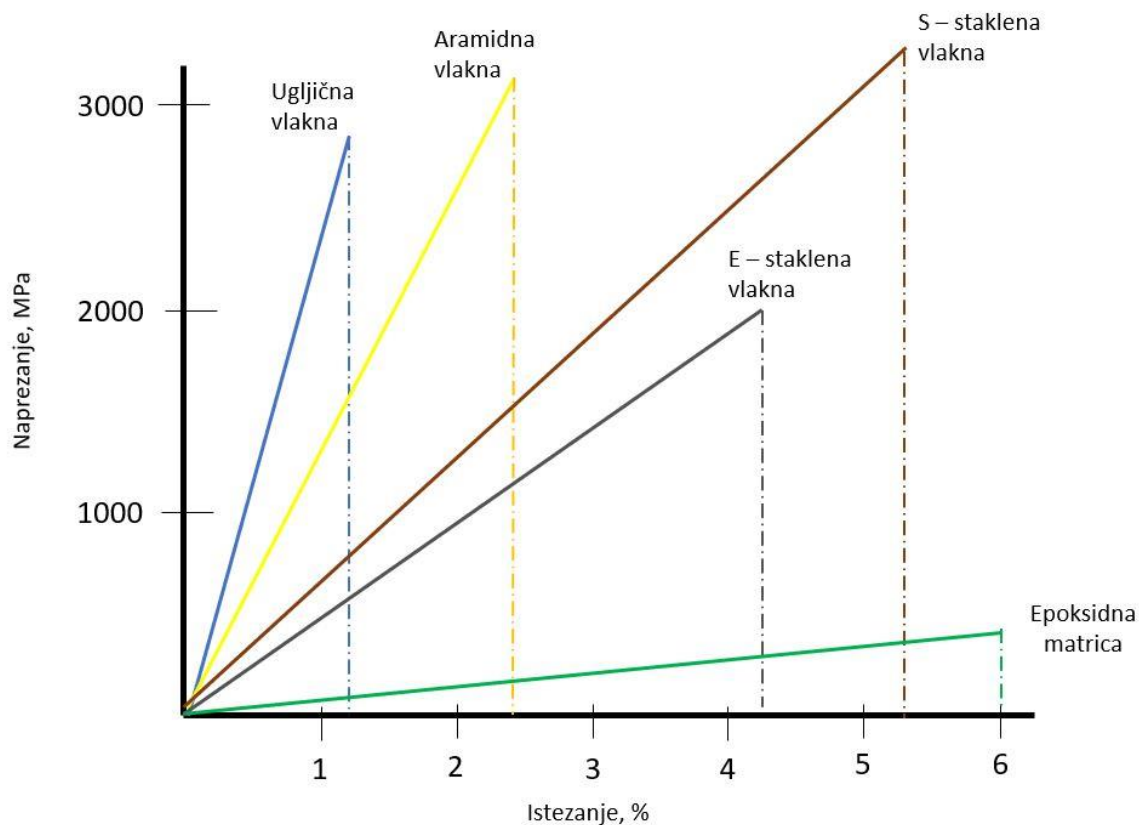
Hibridni kompoziti su materijali koji se sve više koriste u proizvodnji lopatica vjetroturbina. To su kompoziti koji su ojačani staklenim vlaknima i ugljičnim vlaknima. Istraživanja su pokazala da dodavanjem staklenih vlakana u kompozit ojačan ugljičnim vlaknima poboljšava mehanička svojstva kao što je čvrstoća i udarna žilavost [Slika 29], [25].



Slika 29. Hibridni kompozit ojačan staklenim i ugljičnim vlaknima [25]

6.2.2. Matrica kompozita

Zbog zahtjeva da lopatice vjetroturbine moraju biti što manje mase, polimeri su najčešći odabir za matricu kompozita. Koriste se duromeri, epoksidne smole, poliesteri, vinilesteri ili plastomeri. Kako bi se postigla maksimalna vlačna svojstva kompozita, matrica mora imati istu ili veću istezljivost od ojačala u kompozitu [Slika 30].



Slika 30. Svojtva materijala vlakana i matrice

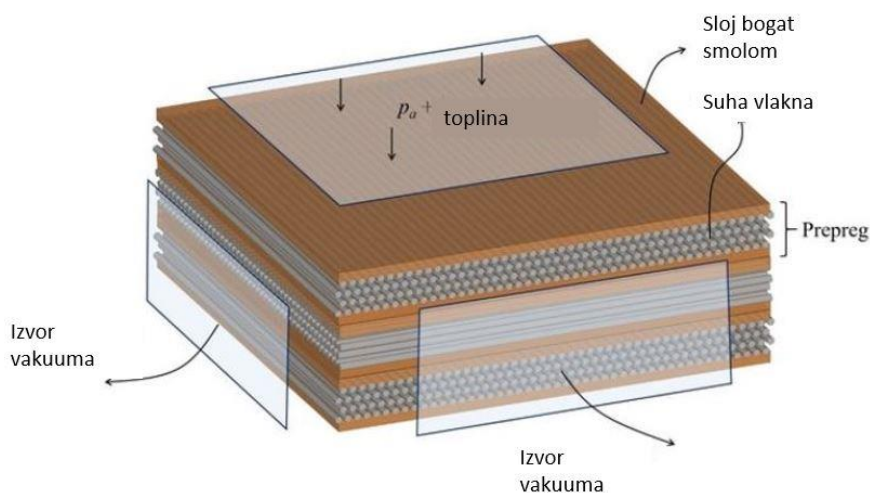
Vrlo je važno da su visoka adhezijska svojstva između matrice i vlakana, kako bi se osigurao prijenos napreznja s matrice na vlakna te kako bi se time spriječili nastanci pukotina. Žilavost matrice je isto tako vrlo važno svojstvo da se kompozit odupre propagiranju pukotine. Matrica kompozita određuje i eksploatacijska svojstva kompozita, kao što su otpornost na kišu i ostale agresivne medije [39].

Kompozit koji ima duromernu matricu mora imati dobra mehanička svojstva, dobra adhezijska svojstva te dobru otpornost na degradaciju uslijed eksploatacije. Duromeri se koriste jer imaju mogućnost stvrdnjavanja na sobnoj temperaturi što ih čini tehnološki prihvatljivim zbog lakše izrade. Poliesterska smola je zamijenila epoksidnu smolu u

proizvodnji matrice kompozita jer je jeftinija i ima manju viskoznost (omogućava bolju impregnaciju i adheziju). Međutim epoksidna smola ima veću rasteznu i savojnu čvrstoću te je otpornija na umor što je još uvijek čini prvim izborom u proizvodnji kompozita. Proizvodnja epoksidne smole je ekološki prihvatljiva. Ponekad je duromerne matrice moguće zamijeniti matricama na bazi plastomera. Najveća prednost plastomera je njegova recikličnost a najveći nedostatak je vrlo velika potrošnja energije pri proizvodnji jer zahtjeva visoke temperature što može oštetiti i ojačalo. Ima puno veću viskoznost od duromernih matrica što otežava proizvodnju dugačkih i širih dijelova za lopatice. Manja je temperatura taljenja od temperature razgradnje pa je moguće recikliranje. Danas se na tržištu ipak pretežno koriste kompoziti koji imaju duromernu matricu [38].

6.2.3. Proizvodnja kompozita

Izravno prešanje kapljevite smole (engl. *resin transfer molding*, RTM) je tehnologija koja se koristi za proizvodnju kompozita. Smola se ubrizgava u kalup pod pritiskom tako da ispuni praznine između vlakana te se nakon toga podvrgava toplinskoj obradi. U kalup se umeće i polimerna pjena ili drvo balsa kako bi struktura bila ojačana. Vakuumsko prešanje (engl. *vacuum assisted resin transfer molding*, VARTM) je znatno uštedjelo potrošnju energije pri proizvodnji. Prepreg tehnologija proizvodnje dozvoljava impregnaciju vlakana. Proces proizvodnje je ekološki prihvatljiviji od vakuuskog ubrizgavanja u kalupe te je moguće postići veći volumni udio vlakana. Bolje se kontroliraju svojstva dobivenog kompozita te je taj postupak proizvodnje lako automatizirati. Prepreg kompoziti imaju veću stabilnost i manju varijaciju mehaničkih svojstava. Prepreg kompoziti se u obliku laminata koristi za ljske lopatice i za strukturno ojačanje unutar lopatice vjetroturbine [Slika 31], [25,40].



Slika 31. Prepreg laminat kompozit [41]

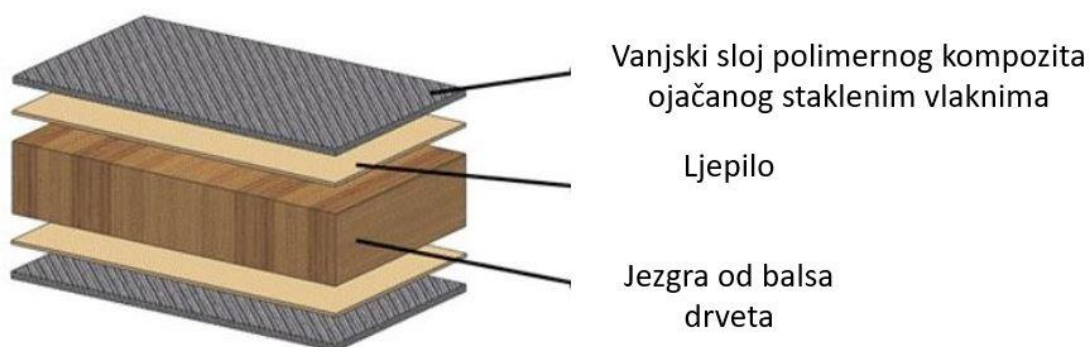
Tijekom proizvodnje kompozita je moguće poboljšati svojstva dodavanjem nanoojačala u obliku ugljičnih nanocijevi u polimernu matricu. Time se povećava otpornost kompozita na umor. Povećava se smična i tlačna čvrstoća te lomna žilavost. Premazivanjem staklenih vlakana grafitnim česticama omogućuje povećanje životnog vijeka kompozita do sto puta [38].

6.3. Drvo kao materijal za lopatice vjetroturbina

Drvo je vrlo zahvalan materijal. Prije se puno više koristilo u industriji proizvodnje lopatica vjetroturbina jer je relativno jeftino u usporedbi s drugim materijalima, vrlo je dostupno i lako ga je obrađivati. Ono što je ograničilo uporabu drvnih materijala je dimenzijska nestabilnost, varijacija svojstva u drvu te, najveći problem, udio vlage u drvu, koji jako utječe na fizikalna i mehanička svojstva drva. Mijenjanje vlažnosti u drvetu uzrokuje:

- dimenzijsku nestabilnost
- unutarnje naprezanje koje može dovesti do inicijalnih pukotina
- smanjenje čvrstoće (suho drvo ima veću čvrstoću)
- trunjenje drva.

Svi navedeni problemi su trebali biti riješeni kako bi drvo bilo moguće iskoristiti za dijelove lopatice vjetroturbine. Problemi su se riješili izvedbom sendvič – kompozitne strukture [Slika 32]. Ona se upotrebljava za stijenke lopatice i za umreženu strukturu koja preuzima opterećenje. Danas se koristi drvo balsa koje se nalazi između dva vanjska sloja napravljena od polimernog kompozita ojačanog staklenim vlaknima. Jezgra sendvič – konstrukcije (drvo balsa) preuzima smično naprezanje, dok vanjski slojevi (polimerni kompozit ojačan staklenim vlaknima) povećavaju savojnu čvrstoću. Zbog poteškoća s nabavkom drveta balse se počelo koristiti i breza, mahagonij, bambus te jela. Koristi se i polietilen tereftalat (PET – pjena). PET – pjena pripada skupini poliestera i vrsta je polimerne sirovine dobivene iz nafte. Taj sintetički materijal je vrlo lako obradiv i dobiva se ekstrudiranjem. Ima izvrsna mehanička svojstva, dobro je recikličan, ima malu masu i stvara barijeru za plinove. Problem je što ima lošu postojanost svojstava iznad 70 °C. U nastavku će biti prikazana mehanička svojstva drveta balsa kao jezgre sendvič konstrukcije i PET – pjene [Tablica 5], [42–45].



Slika 32. Sendvič – kompozit; polimerni kompozit ojačan staklenim vlaknima – drvo balsa [45]

Tablica 5. Usporedba svojstava drveta balsa i PET pjene kao jezgre sendvič kompozita [44,46,47]

Vrsta jezgre	Gustoća, kg m ⁻³	Vlačna čvrstoća, MPa	Tlačna čvrstoća, MPa	Smična čvrstoća, MPa
Balsa	16	1 – 75	0,012	3
PET – pjena	126	60 – 85,5	70	125

6.4. Recikličnost lopatica vjetroturbine

Recikliranje starih ili uništenih lopatica vjetroturbina predstavlja najveći problem prema cilju o održivom razvoju. Zbog kompozitne strukture lopatice je recikliranje otežano. Drugi problem koji se javlja je preuranjeno skidanje lopatica jer ne postoji način da se točno odredi ima li oštećenja unutar lopatice. Duromerne matrice i staklena vlakna iz kompozita od kojeg je napravljena lopatica su vrlo tvrdi i moraju se rezati dijamantnom oštricom uz vodeno hlađenje, a to je dugotrajan i skup postupak. Jedno od ponuđenih rješenja je bilo zakopavanje lopatica pod zemlju [Slika 33]. Time se stvaralo samo još više ekoloških problema pa se morao smisliti plan za buduće recikliranje.



Slika 33. Zakopavanje lopatica vjetroturbina [48]

Jedna europska tvrtka je pronašla jednostavan način industrijskog recikliranja lopatica. Njemačka tvrtka Neowa GmbH je prva tvrtka koja je lopaticu vjetroturbine u potpunosti samljela, a produkt koji se dobije nakon mljevenja se isporučuje kao sirovina u tvornice cementa. Lopatice vjetroturbine se mogu iskoristiti i za neku drugu svrhu, npr. u Nizozemskoj je izgrađeno dječje igralište od dijelova lopatice vjetroturbine [Slika 34]. Prešanjem dijelova lopatice je moguće dobiti palete koje bi se mogle koristiti u građevinarstvu za zidove ili podnice.



Slika 34. Dječje igralište od dijelova lopatice vjetroturbine [49]

Danski inženjeri su 2020. godine započeli projekt u kojemu bi napravili najveće lopatice vjetroturbine od potpuno recikličnog materijala. Lopatice bi trebale biti dugačke 62 m, a materijal koji bi se koristio je smola trgovačkog naziva Elium. To je plastomer koji je poznat po dobroj recikličnosti. Metoda kojom bi se mogle reciklirati takve lopatice se zove kemijsko recikliranje (engl. *chemical recycling*). Tom metodom bi se depolimerizirala smola te se razdvojila od vlakana. Smola bi se kasnije mogla ponovno iskoristiti i oblikovati u željeni oblik zbog plastomernih svojstava materijala. Projekt bi trebao završiti do kraja 2023. godine. Metode recikliranja lopatica vjetroturbina nisu još dorasle zadatku i treba još puno napretka kako bi se ostvario cilj održivog razvoja [50].

7. ZAKLJUČAK

Lako je dokazati da čovjek ima utjecaja na okolinu. U zadnjih nekoliko desetljeća smo pokazali da čovječanstvo u nekim aspektima života napreduje, dok u drugim nazaduje. Ciljevi održivog razvoja sigurno pridonose globalnoj težnji bolje kvalitete života.

Upravo su materijali komponenta koja možda onemogućuje još brži napredak u inženjerskom svijetu, a samim time i napredak u ostalim domenama ljudskog života. Dobivanje čiste energije je trenutno jedan od većih zadataka kojemu se teži. Vjetroelektrane su se progurale kao jedan od najlakših načina dobivanja pristupačne i čiste energije. Za kvalitetan i efikasan rad vjetroturbina treba pomno odabrati puno čimbenika. Uz točno određivanje oblika i funkcionalnosti vjetroturbina i točnog odabira mjesta postavljanja vjetroturbina zbog različitih klimatskih uvjeta do, možda najbitnijeg faktora, izbora materijala za vjetroturbinu. Vjetroturbine su kroz povijest mijenjale i oblik i materijale od kojih su bile izgrađene da bi došle do današnjeg stadija efikasnosti i kvalitetnog rada. Polimerni kompoziti ojačani vlaknima su se pokazali kao najbolji materijal za lopatice vjetroturbina. Imaju manju masu od konvencionalnih materijala, otporni su na koroziju i imaju vrlo dobra mehanička i fizička svojstva. Postupak proizvodnje nije zahtjevan, a nedavno su se pojavili i novi postupci proizvodnje, koji su opisani u radu i vrlo su ekološki prihvatljivi. Drvo se isto tako pokazalo kao vrlo dobar materijal za lopatice vjetroturbina u obliku sendvič – kompozita, a drvo je relativno jeftin materijal, vrlo je pristupačan i lako obradiv. Ono što danas, uz transport samih lopatica vjetroturbina, predstavlja najveći problem u industriji proizvodnje čiste energije iz vjetra je recikličnost lopatica. U ne tako davnoj prošlosti su se one zakapale pod zemlju, što nije bilo ekološki prihvatljivo. Metode recikliranja lopatica vjetroturbine još ni danas nisu dorasle zadatku, ali se u zadnjih nekoliko godina puno vremena i novčanih resursa ulaže baš u to područje. Dobra recikličnost lopatica vjetroturbina je vrlo važna za dostizanje pojedinih ciljeva iz Agende 2030 i upravo zbog toga će industrija recikliranja lopatica vjetroturbina napredovati u budućnosti, što znači da će i kvaliteta ljudskog života barem malo napredovati.

LITERATURA

- [1] Hasn't Earth warmed and cooled naturally throughout history [Internet]. (pristupljeno: 29/07/2022). Dostupno na: <https://www.climate.gov/news-features/climate-qa/hasnt-earth-warmed-and-cooled-naturally-throughout-history>
- [2] United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, Brazil, 3-14 June 1992 [Internet]. (pristupljeno: 29/07/2022). Dostupno na: <https://www.un.org/en/conferences/environment/rio1992>
- [3] Gudelj I. Ciljevi održivog razvoja - provedba na globalnoj razini i provedbeni status u Republici Hrvatskoj. 2019;
- [4] Mirić M. ŠTO POVEZUJE INVALIDITET, LJUDSKA PRAVA I CILJEVE ODRŽIVOG RAZVOJA Zajednica saveza osoba s invaliditetom Hrvatske-SOIH.
- [5] Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development [Internet]. (pristupljeno: 04/08/2022). Dostupno na: <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- [6] Ciljevi održivog razvoja [Internet]. (pristupljeno: 04/08/2022). Dostupno na: <https://icm-mogucnosti.info/ciljevi-odrzivog-razvoja/>
- [7] Dobrovoljni nacionalni pregled o provedbi Programa UN - a za održivi razvoj 2030.
- [8] Wind power generation [Internet]. (pristupljeno: 08/08/2022). Dostupno na: https://ourworldindata.org/grapher/wind-generation?tab=chart&time=1965..latest&country=OWID_WRL~HRV~USA~CHN
- [9] Energy Statistics Data Browser [Internet]. (pristupljeno: 09/08/2022). Dostupno na: <https://www.iea.org/data-and-statistics>
- [10] Renewable Energy [Internet]. (pristupljeno: 09/08/2022). Dostupno na: <https://www.c2es.org/content/renewable-energy/>
- [11] Miller LM, Keith DW. Climatic Impacts of Wind Power. *Joule*. 2018 Dec 19;2(12):2618–32. doi: 10.1016/j.joule.2018.09.009
- [12] Location Factor for Wind and Solar [Internet]. (pristupljeno: 10/08/2022). Dostupno na: <https://sinovoltaics.com/learning-center/basics/location-factor-for-wind-and-solar/>
- [13] Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. 2nd Edition. Hoboken, New Jersey: Wiley; 2002.
- [14] Hau E, von Renouard H. *Wind Turbines*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2006. doi: 10.1007/3-540-29284-5

- [15] Global Wind Atlas meets a unique global 3km ERA5-driven dataset designed by Vortex [Internet]. (pristupljeno: 10/08/2022). Dostupno na:
<https://vortexfdc.com/global-wind-atlas-meets-a-unique-global-3km-era5-driven-dataset-designed-by-vortex/>
- [16] Atlas vjetra [Internet]. (pristupljeno: 10/08/2022). Dostupno na:
https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska¶m=k1_8
- [17] Wind. It means the world to us [Internet]. (pristupljeno: 10/08/2022). Dostupno na:
<https://www.vestas.com/en>
- [18] Chinese offshore power plant [Internet]. (pristupljeno: 10/08/2022). Dostupno na:
<https://neec.no/>
- [19] Wind power in Croatia [Internet]. (pristupljeno: 10/08/2022). Dostupno na:
https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_Croatia
- [20] National Research Council. Environmental Impacts of Wind-Energy Projects. Washington, D.C.: National Academies Press; 2007. doi: 10.17226/11935
- [21] When lightning strikes: managing impacts on wind turbines [Internet]. (pristupljeno: 08/11/2022). Dostupno na: <https://www.power-technology.com/analysis/when-lightning-strikes-managing-impacts-on-wind-turbines/>
- [22] History of Wind Turbines [Internet]. (pristupljeno: 11/08/2022). Dostupno na:
<https://www.renewableenergyworld.com/storage/history-of-wind-turbines/#gref>
- [23] Numerical and Experimental Investigation of The Rotor Blades of An HAWT With A Profile HKAS Inspired by a Maple Seed [Internet]. (pristupljeno: 11/08/2022). Dostupno na:
https://www.researchgate.net/publication/281627529_Numerical_and_Experimental_Investigation_of_The_Rotor_Blades_of_An_HAWT_With_A_Profile_HKAS_Inspired_by_a_Maple_Seed/figures?lo=1
- [24] Letcher T. Wind Energy Engineering : A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines. 1st edition. London: Academic Press; 2017.
- [25] Mishnaevsky L, Branner K, Petersen H, Beauson J, McGugan M, Sørensen B. Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials*. 2017 Nov 9;10(11):1285. doi: 10.3390/ma10111285
- [26] ELSAM - Gedser Prototype [Internet]. (pristupljeno: 14/08/2022). Dostupno na:
<https://en.wind-turbine-models.com/turbines/40-elsam-gedser-prototype>

- [27] MOD-2/MOD-5B Wind Turbines [Internet]. (pristupljeno: 14/08/2022). Dostupno na: <https://www.boeing.com/history/products/mod-2-mod-5b-wind-turbine.page>
- [28] Bonus B35/450 [Internet]. (pristupljeno: 14/08/2022). Dostupno na: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/122-bonus-b35-450>
- [29] Vindeby Offshore Wind Farm [Internet]. (pristupljeno: 14/08/2022). Dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Vindeby_Offshore_Wind_Farm
- [30] MAN WKA-60 (GROWIAN II) [Internet]. (pristupljeno: 14/08/2022). Dostupno na: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/182-man-wka-60-growian-ii>
- [31] SG 3.4-132 Onshore wind turbine [Internet]. (pristupljeno: 14/08/2022). Dostupno na: <https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/onshore/wind-turbine-sg-3-4-132>
- [32] Zadar VI Wind Farm, Croatia [Internet]. (pristupljeno: 14/08/2022). Dostupno na: <https://www.power-technology.com/marketdata/zadar-vi-wind-farm-croatia/>
- [33] Schubel P, Crossley R. Wind Turbine Blade Design. In: Wind Turbine Technology. Apple Academic Press; 2014. p. 1–34. doi: 10.1201/b16587-3
- [34] Morim RB, de Morais Carnielutti F, da Rosa LD, Ricardo Hubner G, Franchi CM, Eduardo de Souza C, et al. Analysis of Wind Turbine Power Generation with Individual Pitch Control. In: 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America). IEEE; 2019. p. 1–6. doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895292
- [35] New Generation of Wind Blades [Internet]. (pristupljeno: 17/08/2022). Dostupno na: <https://www.dow.com/en-us/market/mkt-power-telecom/sub-power-renewable-energy/new-generation-of-wind-blades.html>
- [36] Brondsted P, Nijssen PLR. Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials. 1st Edition. Cambridge: Woodhead Publishing; 2013.
- [37] Markulin M. Numeričko modeliranje udarnih oštećenja sandwich konstrukcija pri malim brzinama udara. [Zagreb]: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.
- [38] Mishnaevsky L. COMPOSITE MATERIALS IN WIND ENERGY TECHNOLOGY.
- [39] Aluga R. Ispitivanje žilavosti kompozitnih materijala . [Zagreb]: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2010.
- [40] Wind turbine blade production – new products keep pace as scale increases [Internet]. (pristupljeno: 19/08/2022). Dostupno na:

- <https://www.reinforcedplastics.com/content/features/wind-turbine-blade-production-new-products-keep-pace-as-scale-increases-1>
- [41] Zobeiry N, Duffner C. Measuring the negative pressure during processing of advanced composites. *Compos Struct.* 2018 Nov;203:11–7. doi: 10.1016/j.compstruct.2018.06.123
- [42] The Wood Behind the Wind [Internet]. (pristupljeno: 19/08/2022). Dostupno na: <https://2ea.co.uk/the-wood-behind-the-wind/>
- [43] Gougeon M, Zuteck M, Brothers G. THE USE OF WOOD FOR WIND TURBINE BLADE CONSTRUCTION.
- [44] Galos J, Das R, Sutcliffe MP, Mouritz AP. Review of balsa core sandwich composite structures. *Mater Des.* 2022 Sep;221:111013. doi: 10.1016/j.matdes.2022.111013
- [45] Zaharia SM, Morariu CO, Nedelcu A, Pop MA. Experimental Study of Static and Fatigue Behavior of CFRP-Balsa Sandwiches under Three-point Flexural Loading. *Bioresources.* 2017 Feb 21;12(2). doi: 10.15376/biores.12.2.2673-2689
- [46] Tropical Balsa Wood [Internet]. (pristupljeno: 21/08/2022). Dostupno na: https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=368427cdadb34b10a66b55c264d49c23
- [47] Poly(ethylene terephthalate) (PET) [Internet]. (pristupljeno: 21/08/2022). Dostupno na: <http://polymerdatabase.com/Commercial%20Polymers/PET.html>
- [48] Wind Turbine Blades Can't Be Recycled, So They're Piling Up in Landfills [Internet]. (pristupljeno: 22/08/2022). Dostupno na: <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/wind-turbine-blades-can-t-be-recycled-so-they-re-piling-up-in-landfills#xj4y7vzkg>
- [49] Blade Made playgrounds [Internet]. (pristupljeno: 22/08/2022). Dostupno na: <https://www.superuse-studios.com/projectplus/blade-made/>
- [50] LM Wind Power readies first recyclable wind turbine blade prototype under ZEBRA project [Internet]. (pristupljeno: 22/08/2022). Dostupno na: <https://www.lmwindpower.com/en/stories-and-press/stories/news-from-lm-places/zebra-project-achieves-key-milestone-with-first-prototype-of-recyclable-blade>