

Razvoj i primjena materijala za vjetroagregate

Ćurić, Robert

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:024680>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH
TEHNOLOGIJA

Sveučilišni studij

Razvoj i primjena materijala za vjetroagregate

Završni rad

Robert Ćurić

Osijek, 2022.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 16.09.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na
preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Ime i prezime Pristupnika:	Robert Ćurić
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	R 4334, 07.10.2020.
OIB Pristupnika:	97834419491
Mentor:	Doc. dr. sc. Goran Rozing
Sumentor:	Dr. sc. Krešimir Miklošević
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Razvoj i primjena materijala za vjetroagregate
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rad:	
Prijedlog ocjene završnog rada:	Dobar (3)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 1 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	16.09.2022.
Datum potvrde ocjene od strane Odbora:	21.09.2022.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije. Datum:



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 22.09.2022.

Ime i prezime studenta:

Robert Ćurić

Studij:

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

Mat. br. studenta, godina upisa:

R 4334, 07.10.2020.

Turnitin podudaranje [%]:

10

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Razvoj i primjena materijala za vjetroagregate**

izrađen pod vodstvom mentora Doc. dr. sc. Goran Rozing

i sumentora Dr. sc. Krešimir Miklošević

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada	1
2. RAD I FUNKCIJA MODERNIH VJETROAGREGATA	2
2.1. Vrste vjetroagregata	2
3. VJETAR I NJEGOVE KARAKTERISTIKE	8
3.1. Energija vjetra	9
3.2. Površina zahvata lopatice vjetroagregata	10
3.3. Gustoća zraka	11
4. MATERIJALI I KONSTRUKCIJA VJETROAGREGATA	13
4.1. Stup	15
4.1.1 Cjevasti čelični stupovi	15
4.1.2 Rešetkasti stupovi	16
4.2. Kućište (gondola)	17
4.3. Lopatice vjetroagregata	17
4.3.1. Prirodna vlakna	18
4.3.2. Ugljična i staklena vlakna	19
4.3.3. Bazaltna vlakna	19
4.3.4. Hibridni kompozit	20
4.3.5. Duromeri	21
4.3.6. Termoplasti	21
4.3.7. Nano-inženjerski kompoziti	21
4.4. Generator	23
4.5. Kočnica	23
5. ŽIVOTNI CIKLUS I MOGUĆNOSTI ZBRINJAVANJA VJETROAGREGATA	27
6. ZAKLJUČAK	30
LITERATURA	31
SAŽETAK	34
ABSTRACT	35

1. UVOD

Kako se svijet sve više razvija u pogledu tehnologije, potreba za električnom energijom sve je veća, a razvoj vjetroelektrana sve učinkovitiji i brži. Energija vjetra predstavlja jedan od najčišćih oblika energije budući da se ne oslanja na fosilna goriva i time stavlja vjetroelektrane na mjesto pouzdanih i ekološki prihvatljivih izvora energije. Očekuje se da će energija vjetra, zajedno s drugim obnovljivim izvorima energije, značajno rasti u nadolazećim desetljećima i igrati ključnu ulogu u ublažavanju klimatskih promjena i postizanju energetske održivosti.

Još u srednjem vijeku ljudi su koristili energiju vjetra kao pogon za svoje brodove stavljajući im jedra kako bi si omogućili daleka putovanja. Može se reći kako je vjetar pokrenuo eru istraživanja i osigurao ljudima transport robe na velike udaljenosti. Dugo vremena nakon, vjetar se počeo koristiti za obavljanje mehaničkog rada u mlinovima. Prve vjetrenjače za praktičnu primjenu pojavile su se već u 9. stoljeću. Bile su to vjetrenjače s okomitom osi vrtnje i pravokutnim lopaticama s jedrima, korištene za mljevenje žita i pumpanje vode [1].

Moderno iskorištavanje energije vjetra, kakvo poznajemo danas, započelo je 1970-ih kao odgovor na svjetsku naftnu krizu 1973. godine. U 21. stoljeću, sektor energije vjetra počeo se naglo razvijati. Snaga pojedinačnih vjetroagregata u manje od 20 godina povećala se za deset puta, a dimenzije su dvostruko narasle. Razvoj materijala omogućava projektiranje sve učinkovitijih i povoljnijih vjetroagregata koji postaju sve konkurentniji klasičnim centraliziranim izvorima energije [2].

1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak završnog rada je ukazati na važnost energije vjetra te prikazati razvoj vjetroagregata. Također, objasniti fizikalne osnove energije vjetra i napraviti podjelu vjetroagregata. Prikazati osnovne dijelove i materijalnu strukturu te ukazati koje su to smjernice razvoja suvremenih vjetroagregata i njihovog zbrinjavanja nakon završetka životnog vijeka.

2. RAD I FUNKCIJA MODERNIH VJETROAGREGATA

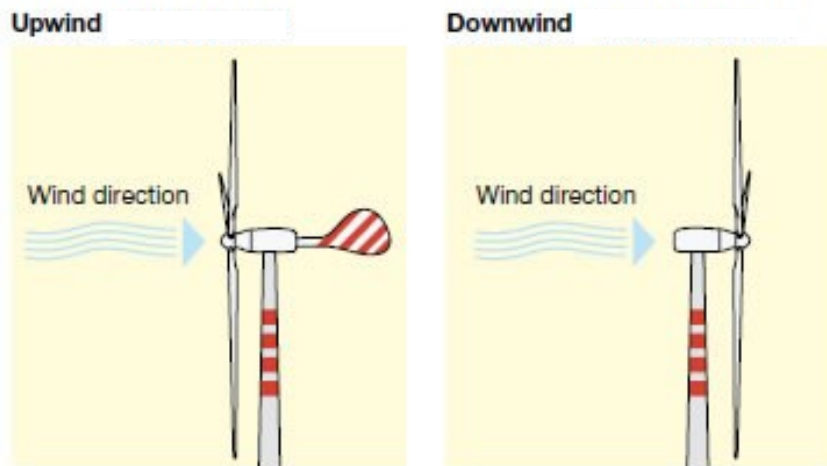
Vjetroagregat je stroj koji pretvara energiju vjetra u mehaničku, a potom u električnu energiju preko električnih generatora. Također je poznat pod nazivima vjetroturbina ili vjetrogenerator. Kako bismo razumjeli kako se koriste vjetroagregati korisno je ukratko razmotriti neke od temeljnih činjenica na kojima se temelji njihov rad. U modernim vjetroagregatima proces pretvorbe se temelji na aerodinamičkoj sili uzgona koja uzrokuje pozitivni okretni moment na rotirajućoj osovini. Sve to najprije rezultira proizvodnjom mehaničke energije, koja se zatim u generatoru transformira u električnu energiju [2]. Vjetroagregati, za razliku od većine drugih generatora, mogu proizvoditi energiju samo kao odgovor na resurs koji je trenutno dostupan. Nije moguće pohraniti vjetar i koristiti ga kasnije. Najviše što se može učiniti je ograničiti proizvodnju ispod onoga što bi vjetar mogao proizvesti. Svaki sustav na koji je vjetroagregat povezan mora, na neki način, uzeti u obzir ovu varijabilnost. U većim mrežama, vjetroagregat služi za smanjenje ukupnog električnog opterećenja i tako omogućuje smanjenje broja konvencionalnih generatora i potrošnje goriva za njihov rad. U prošlosti se proizvod kao što je brašno proizvodio u vjetrenjačama koje su pokretale mlinove. Danas, mogućnost prijenosa električne energije putem dalekovoda donekle može nadomjestiti nemogućnost prijenosa vjetra. U budućnosti, energetske sustavi temeljeni na vodik mogli bi dodati ovu mogućnost [2].

2.1. Vrste vjetroagregata

Vjetroagregati se mogu podijeliti u dvije osnovne vrste, a to su: vjetroagregati s vodoravnom osi vrtnje (engl. *Horizontal Axis Wind Turbines – HAWT*) i vjetroagregati s okomitom osi vrtnje (engl. *Vertical Axis Wind Turbines – VAWT*). Unatoč tome što postoje vjetroagregati koji ne pripadaju nijednom od ova dva tipa, zbog njihove vrlo ograničene implementacije u stvarnim primjenama, možemo se držati ove dvije vrste HAWT i VAWT kao glavnih tipova vjetroagregata. Vjetroagregati s vodoravnom osovinom jedna su od vrsta vjetroagregata koji zahtijevaju usklađivanje sa smjerom vjetra. Potreban im je senzor koji detektira smjer vjetra i mehanizam za skretanje koji okreće vjetroagregat kako bi bio usmjeren prema vjetru.

Razlog zbog kojeg ih je nužno podešavati s obzirom na smjer vjetra je učinkovitija raspodjela sile na rotorima i sprječavanje strukturnih oštećenja do kojih dolazi zbog nepravilnog

opterećenja na konstrukciju vjetroagregata. HAWT je zbog svoje učinkovitosti i veće sposobnosti proizvodnje energije najčešće korišteni tip vjetroagregata. HAWT turbine se razlikuju u postavljanju rotora ispred ili iza stupa vjetroagregata (uz vjetar engl. *Up wind* ili niz vjetar engl. *Down wind*). Turbine uz vjetar su one koje se najčešće koriste [3].



Slika 2.1.1. Prikaz podjele HAWT vjetroagregata s obzirom na smjer strujanja vjetra:
uz vjetar(lijevo) i niz vjetar(desno) [4]

Sve dok su rotori i kućište dizajnirani na način da kućište pasivno prati smjer vjetra, vjetroagregati s vodoravnom osi ne zahtijevaju nikakav mehanizam. Pasivno skretanje ovih vjetroagregata ne bi bila prednost za velike vjetroagregate koji imaju kabele za uzemljenje pričvršćene na kućište.



Slika 2.1.2. Primjer vjetroagregata s vodoravnom osi vrtnje [5]

Vjetroelektrane s okomitom osi vrtnje (VAWT) imaju okomito postavljenu osovinu. Takav način konstrukcije omogućuje manju osjetljivost na smjer vjetra, što ih čini savršenim izborom za mjesta gdje se smjer vjetra često mijenja. Bez obzira u kojem smjeru vjetar puše, lopatice bi se i dalje kretale i rotirale osovinu kako bi proizvele energiju. Generator ovih vrsta vjetroagregata nalazi se blizu tla. To je zato što podizanje na visinu ne bi bilo tako učinkovito s obzirom na konstrukciju rotora i njihovu visinu. Ova konfiguracija olakšava održavanje vjetroagregata s okomitom osi u usporedbi s vjetroagregatima s vodoravnom osi koji imaju sve komponente postavljene na određenoj visini. Međutim, vjetroagregati s okomitom osi imaju manju učinkovitost od HAWT-ova zbog značajnog otpora zraka na rotorima. Uz to imaju i manje izlazne snage zbog činjenice da je brzina vjetra i njegov protok na većoj udaljenosti od tla veći nego na samoj razini tla.

Jedna od izvedbi VAWT vjetroagregata su Savonius turbine. Ideja njihove konstrukcije prilično je slična anemometrima s lopaticama. Kao što se može vidjeti na slici 2.1.3. , uvijek postoji površina s najvećim otporom, dok na druge djeluju manje sile otpora [5].



Slika 2.1.3. Primjer Savonius turbine [5]

Važan detalj ove konstrukcije je da će se rotirati bez obzira u kojem smjeru vjetar puše. Ove vrste vjetroagregata također su vrlo dobre u radu s vjetrovima manjih brzina strujanja. Jednostavne su za proizvodnju i održavanje, te dobro rade na turbulentnom vjetru. Postoje i spiralne konstrukcije Savonius turbine koje imaju duge spiralne lopatice. One stvaraju okretni moment koji se može koristiti na krovovima objekata.



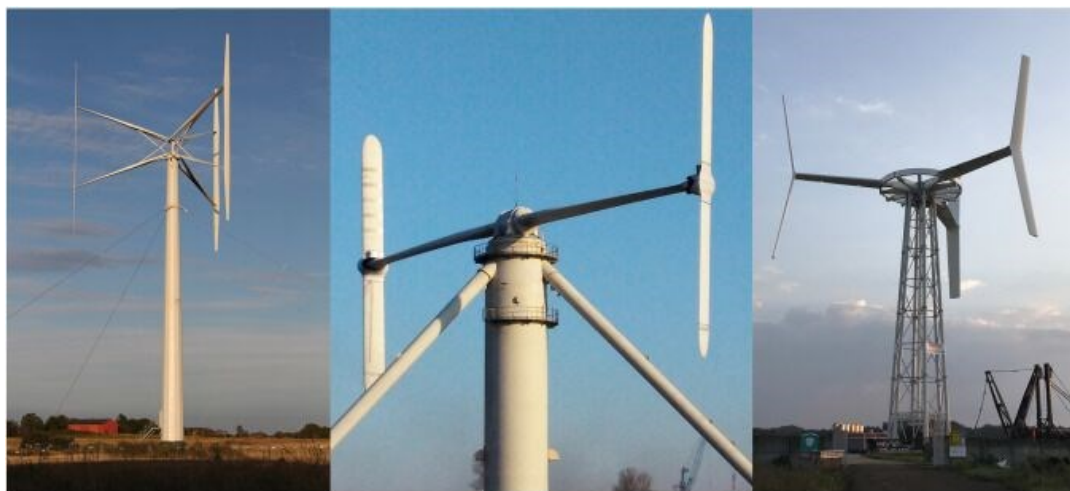
Slika 2.1.4. Primjer spiralne konstrukcije Savonius turbine [5]

Drugi tip VAWT vjetroagregata je Darrieusov vjetroagregat. Ove vrste su najčešće korišteni tip vjetroagregata s okomitom osovinom za proizvodnju električne energije. Njihove lopatice su zakrivljene u obliku slova C, a protežu se od vrha stupa do dna gdje su spojene na osovinu generatora. Imaju dobru učinkovitost jer se okreću većim brzinama stoga imaju mogućnost proizvesti više energije.



Slika 2.1.5. Primjer Darrieusovog tipa vjetroagregata [5]

Treći tip VAWT-a su Giromill vjetroagregati koji su inspirirani Darrieusovim tipom. Ove vrste vjetroagregata su VAWT tipa s ravnim okomitim lopaticama kao što je vidljivo na slici 2.1.6..



Slika 2.1.6. Primjer Giromill turbina [5]

Giromill turbine se ne pokreću same kao Darrieus i možda nemaju stalnu brzinu rotacije, stoga nisu učinkovite kao Darrieusove. Unatoč tome, jeftiniji su, lakši za proizvodnju i mogu dobro raditi na turbulentnim vjetrovima [5].

3. VJETAR I NJEGOVE KARAKTERISTIKE

Vjetar je prirodno kretanje zraka ili drugih plinova u odnosu na površinu Zemlje. Nastaje zbog razlika u atmosferskom tlaku koji je uglavnom uzrokovan temperaturnom razlikom. Kada postoji razlika u atmosferskom tlaku zrak se kreće iz područja višeg u područje nižeg tlaka, čime nastaju vjetrovi različitih brzina. U blizini Zemljine površine, trenje uzrokuje da vjetar bude sporiji nego što bi inače bio, što igra ključnu ulogu u projektiranju vjetroelektrana [6].

Instrumenti koji se koriste za mjerenje parametara vjetra poznati su kao anemometri i mogu bilježiti brzinu, smjer i jačinu vjetra. Osnovna jedinica brzine vjetra je metar po sekundi [m/s]. Smjer vjetra mjeri se u odnosu na pravi sjever (ne magnetni sjever). Brzina vjetra obično raste s visinom iznad površine zemlje. Na brzinu uvelike utječu čimbenici kao što su hrapavost tla, prisutnost zgrada, drveća te drugih prepreka u blizini. Brzina vjetra obično se mjeri anemometrom s lopaticama koji se sastoji od tri ili četiri lopatice, konusnog ili polukuglastog oblika postavljenih simetrično oko okomite osovine. Na slici 3.1. prikazan je anemometar s tri lopatice.



Slika 3.1. Anemometar s lopaticama [7]

Vjetar koji puše u lopatice uzrokuje rotaciju osovine. U standardnim instrumentima konstrukcija lopatice je takva da je brzina rotacije proporcionalna brzini vjetra u dovoljno bliskoj aproksimaciji. U intervalima ne dužim od pet godina, anemometri se kalibriraju u aerotunelu kako bi se identificirala sva odstupanja između rotacije osovine i brzine vjetra koju je odredio proizvođač. Korekcije kalibracije primjenjuju se na izmjerenu brzinu vjetra. U ekstremnim vremenskim uvjetima, kao što su vrhovi planina, koristi se grijani zvučni anemometar bez pokretnih dijelova koji je prikazan na slici 3.2..



Slika 3.2. Zvučni anemometar [7]

Prikazani instrument mjeri brzinu ultrazvučnih signala koji se prenose između fiksnog odašiljača i fiksnog prijemnika. Mjerenja iz dva para pretvarača mogu se kombinirati kako bi se dobila procjena brzine i smjera vjetra [7].

3.1. Energija vjetra

Energija vjetra je poseban oblik kinetičke energije zraka koji struji. Može se pretvoriti u električnu energiju pomoću vjetroagregata ili se izravno koristiti za crpljenje vode, pokretanje mlinova ili jedrenjaka.

Kinetička energija postoji kad god se objekt određene mase kreće translacijskom ili rotacijskom brzinom. Kada je zrak u pokretu, kinetička energija zraka koji se kreće može se odrediti kao [8]:

$$E_k = \frac{1}{2} m \bar{u}^2 \quad (3-1)$$

gdje je E_k kinetička energija, m masa zraka, a \bar{u} srednja brzina vjetra u prikladnom vremenskom intervalu. Snaga vjetra može se dobiti razlikovanjem kinetičke energije vjetra s obzirom na vrijeme, tj.:

$$P_w = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} \bar{u}^2 \quad (3-2)$$

gdje je P_w snaga vjetra. Međutim, samo mali dio energije vjetra može se pretvoriti u električnu energiju. Kada vjetar prolazi kroz vjetroagregat i pokreće lopatice, odgovarajući maseni protok vjetra je:

$$\dot{m} = \rho A \bar{u} \quad (3-3)$$

gdje je \dot{m} maseni protok zraka, ρ gustoća zraka, a A je površina lopatica, kao što je prikazano na slici 3.2.1. Zamjenom (3-3) u (3-2), raspoloživa snaga vjetra P_w može se izraziti kao:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A \bar{u}^3 \quad (3-4)$$

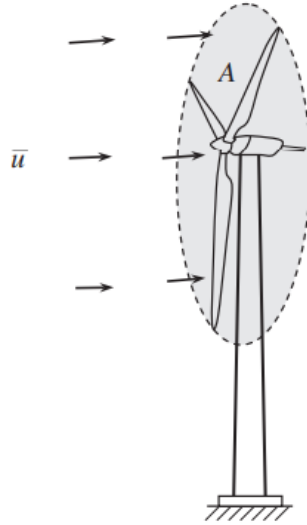
Ispitivanje jednadžbe (3-4) otkriva da je za postizanje veće snage vjetra potrebna veća brzina vjetra, veća duljina lopatica za postizanje veće površine zahvata te veća gustoća zraka. Budući da je izlazna snaga vjetra proporcionalna kubnoj snazi srednje brzine vjetra, mala varijacija u brzini vjetra može rezultirati velikom promjenom snage vjetra.

3.2. Površina zahvata lopatice vjetroagregata

Kao što je prikazano na slici 3.2.1., površina zahvata lopatice [8] može se izračunati iz formule:

$$A = \pi[(l + r)^2 - r^2] = \pi l(l + 2r) \quad (3-5)$$

gdje je l duljina lopatica vjetra, a r je polumjer glave rotora.



Slika 3.2.1. Površina zahvata lopatice vjetroagregata [8]

3.3. Gustoća zraka

Drugi važan parametar koji izravno utječe na energiju vjetra je gustoća zraka koja se može izračunati iz jednadžbe stanja [8]:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (3-6)$$

gdje je p lokalni tlak zraka, R je plinska konstanta (287 J/kg-K za zrak), a T je temperatura zraka. Hidrostatska jednadžba kaže da kad god nema okomitog gibanja, razlika u tlaku između dvije visine uzrokovana je masom zraka:

$$dp = -\rho g dz \quad (3-7)$$

gdje je g ubrzanje sile teže. Kombiniranjem jednadžbi (3-6) i (3-7) dobiva se:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{RT} dz \quad (3-8)$$

Ubrzanje sile teže g opada s visinom iznad zemljine površine z :

$$g = g_0 \left(1 - \frac{4z}{D}\right) \quad (3-9)$$

gdje je g_0 ubrzanje sile teže pri tlu, a D promjer zemlje. Međutim, za ubrzanje sile teže g , varijacija u visini može se zanemariti jer je D mnogo veći od $4z$. Osim toga, temperatura je obrnuto proporcionalna visini. Uzmimo da je $\frac{dT}{dz} = c$, može se izvesti da:

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\frac{g}{cR}} \quad (3-10)$$

gdje su ρ_0 i T_0 tlak zraka, odnosno temperatura pri tlu. Kombinirajući jednačbe (3-6) i (3-10), dobiva se:

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\left(\frac{g}{cR}+1\right)} = \rho_0 \left(1 + \frac{cz}{T_0} \right)^{-\left(\frac{g}{cR}+1\right)} \quad (3-11)$$

Ova jednačba pokazuje da se gustoća zraka smanjuje nelinearno s nadmorskom visinom.

4. MATERIJALI I KONSTRUKCIJA VJETROAGREGATA

Ovisno o veličini vjetroelektrane (male, srednje ili velike) određuje se vrsta i količina materijala za projektiranje vjetroagregata. Trendovi dizajna te konstruiranja i proizvodnje malih i velikih vjetroagregata razlikuju se zbog činjenice da su zahtjevi za čvrstoćom i umorom materijala različiti. Komponente vjetroagregata doživljavaju značajan umor zbog kontinuiranog dinamičkog naprezanja kojem su izložene. Kao rezultat toga, karakteristike umora materijala uzimaju se u obzir tijekom projektiranja i odabira komponenti. Općenito, češće se koriste lagani materijali, osobito na pokretnim komponentama. Kako veličina rotora raste, tendencija će biti prema materijalima velike čvrstoće i otpornosti na umor. Različiti kompoziti će se sasvim sigurno koristiti u ovom sektoru kako bi se vjetroagregati nastavljali razvijati, što dovodi u pitanje problem recikliranja materijala [9].

Tablica 4.1. Materijali korišteni za izradu vjetroagregata [2]

Komponenta vjetroagregata	Vrsta materijala od koje je rađena	Podvrsta materijala od koje je rađena
Lopatica	Kompoziti	Staklena vlakna, karbonska vlakna, drveni laminati, poliesterske i epoksidne smole
Glava rotora	Čelik	-
Prijenosnik	Čelik	Razne legure, maziva
Generator	Čelik, bakar	Magneti od rijetkih zemnih elemenata
Kućište	Kompoziti	Stakloplastika
Stup	Čelik	-
Temelj	Čelik, beton	-

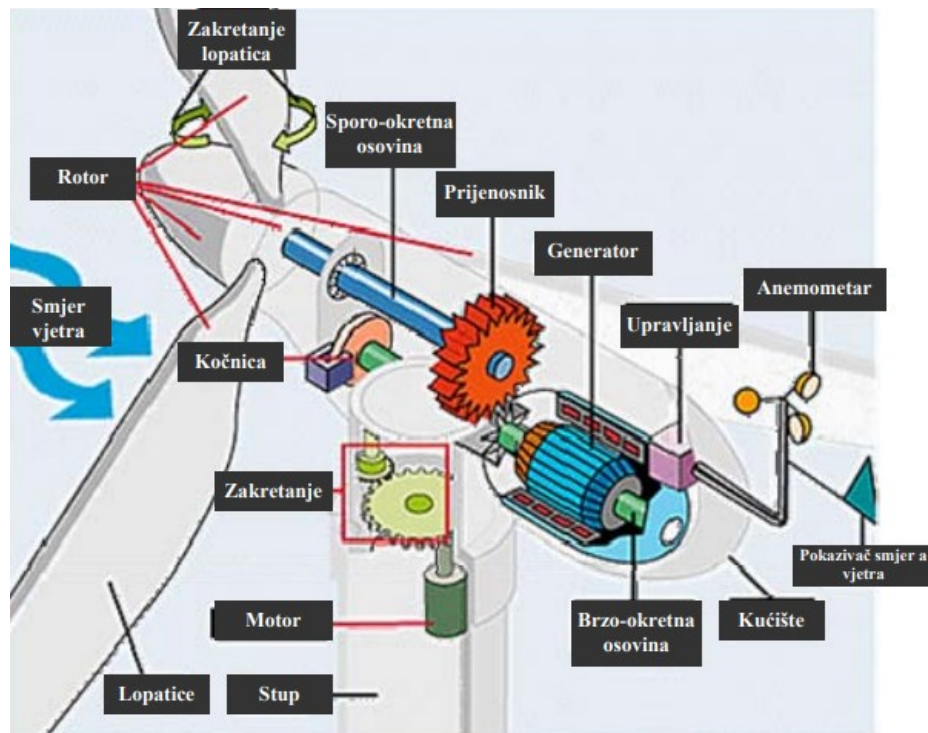
Kao što je prikazano u tablici 4.1., za izradu komponenata vjetroagregata koriste se razne vrste materijala. Dva najvažnija su čelik i kompoziti. Kompoziti se obično sastoje od staklenih vlakana, karbonskih vlakana ili drveta zajedno s matricom od poliestera ili epoksida. Ostali uobičajeni materijali su bakar i beton. Za postizanje veće konkurentnosti energije vjetra u odnosu na druge izvore energije ključnu ulogu igraju masa turbine te cijena izrade.

Prava prilika danas je u boljim i jeftinijim materijalima te u velikoj količini proizvodnje. Uobičajena masa i cijena trenutnih osnovnih komponenti vjetroagregata prikazane su u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Masa i cijena komponenti vjetroagregata [10]

Komponenta vjetroagregata	Masa komponente vjetroagregata u %	Cijena komponente vjetroagregata u %
Rotor	10-14	20-30
Kućište zajedno sa strojevima	25-40	25
Prijenosnik i pogon	5-15	10-15
Generator	2-6	5-15
Stup	30-65	10-25

Vjetroagregati imaju više od 8000 komponenti, a najosnovniji dijelovi prikazani su na slici 4.1.



Slika 4.1. Konstrukcija i osnovni dijelovi vjetroagregata [11]

4.1. Stup

Lopaticice, kućište i stup određuju funkcionalnost vjetroagregata. Stup se nalazi na betonskom temelju i podupire lopaticice i kućište. Dizajniran je tako da može izdržati masu kućišta i mora biti dovoljno čvrst da izdrži bilo kakve promjene u brzini vjetra oko vjetroagregata. Stoga je krutost najvažnija karakteristika materijala za projektiranje stupova vjetroagregata [12]. Kako bi se smanjili troškovi preporučuje se izrada stupova u dijelovima i montiranje na određenom mjestu. Masa vjetroagregatskog stupa instaliranog na kopnu može biti nešto manja u usporedbi s onima postavljenim na moru. Pitanje korozije također postaje vrlo važno i potrebno ga je uzeti u obzir prilikom projektiranja vjetroagregata. Neki vjetroagregatski stupovi izrađeni su od čelika zbog njegovih materijalnih svojstava. Čelik je općenito čvrst i jeftin te ima visoku krutost. Veliki izazov u korištenju čelika jest zavarivanje komponenti. Istraživači danas preporučuju korištenje neke vrste čeličnog betona za stupove vjetroagregata, kao što je onaj od kompozita ojačan staklenim vlaknima. Stupovi mogu biti izvedeni kao cjevasti, konusni, rešetkasti, teleskopski, učvršćeni ili povezani [13].

4.1.1 Cjevasti čelični stupovi

Većina velikih vjetroagregata isporučuje se s cijevnim čeličnim stupovima koji se proizvode u dijelovima od 20 do 30 metara duljine. Stupovi su konusni kako bi se povećala njihova čvrstoća i istovremeno uštedio materijal. Cjevasti stupovi su danas najčešće korišteni jer osim visoke čvrstoće imaju i veću otpornost na vibracije [14].



Slika 4.1.1.1. *Primjer cijevne izvedbe stupa vjetroagregata [15]*

4.1.2. Rešetkasti stupovi

Rešetkasti stupovi se proizvode pomoću zavarenih čeličnih profila. Osnovna prednost rešetkastih stupova je cijena, budući da je za rešetkasti stup potrebno upola manje materijala nego za cjevasti stup približno iste krutosti. Također lako ga je rastaviti na manje dijelove kako bi bio pogodniji za transport i montažu. Osnovni nedostatak rešetkastih stupova je njihov vizualni izgled. Kako god bilo, iz estetskih razloga, rešetkasti stupovi gotovo su nestali iz upotrebe za velike, moderne vjetroagregate [14]. Slika 4.1.2.1. prikazuje rešetkastu izvedbu stupa vjetroagregata.



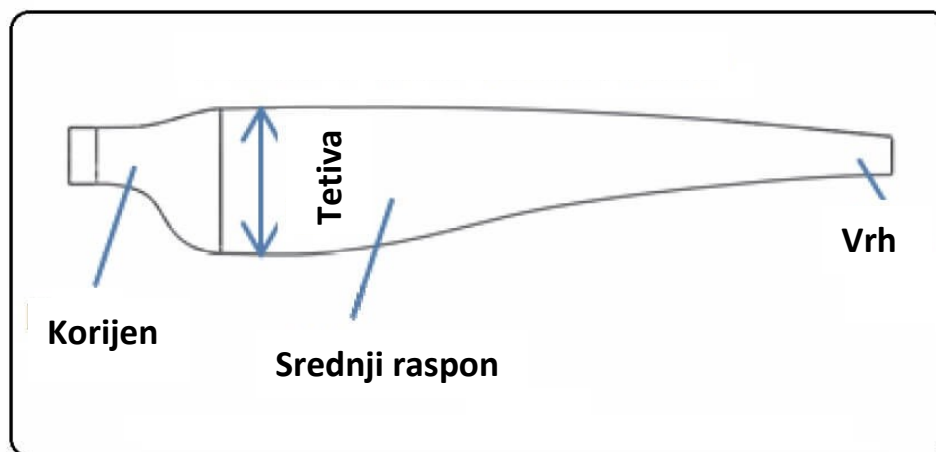
Slika 4.1.2.1. *Primjer rešetkaste izvedbe stupa vjetroagregata [16]*

4.2. Kućište (gondola)

Kućište ima ulogu zaštite generatorskog sustava i ostalih komponenti od vanjskih utjecaja, kao i zaštitu okoliša od buke koju proizvodi sam sustav. Kućište se još naziva i „gondola“. Ovisno o vrsti vjetroagregata (mali, srednji ili veliki), veličina kućišta može varirati, ali često su dizajnirana tako da imaju mali prostor za potrebe održavanja. Pristup kućištu za rutinsko održavanje i servisiranje također je još jedan izazov zbog njegova položaja na vjetroagregatu. Materijali za izradu kućišta moraju biti lagani, jednostavni za oblikovanje i otporni na koroziju. Danas je većina kućišta u vjetroagregatima izrađena od kompozitnog materijala od staklenih vlakana [17].

4.3. Lopatice vjetroagregata

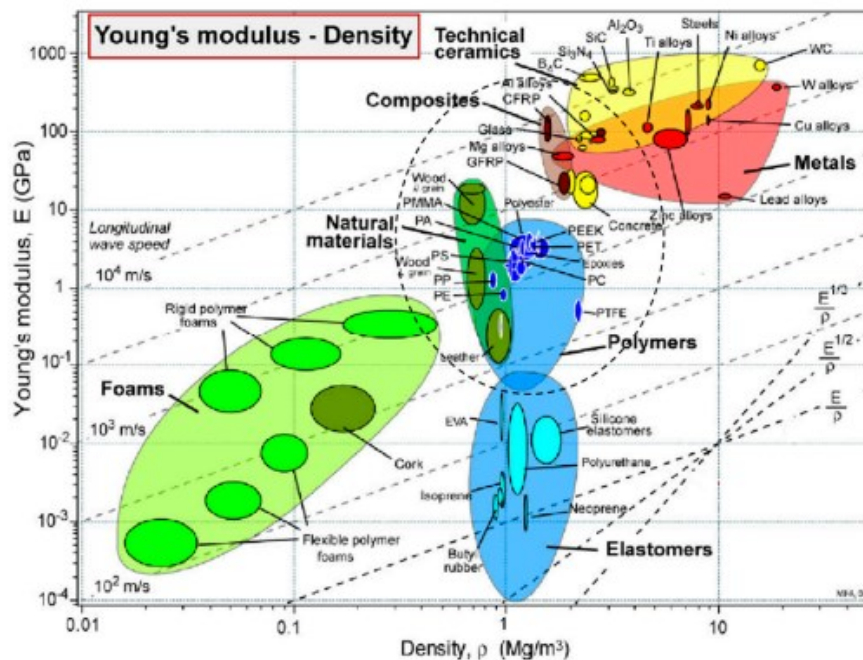
Kao što je prikazano na slici 4.3.1., lopatica vjetroagregata sastoji se od korijena, tetive, srednjeg raspona i vrha. Svi ovi dijelovi pridonose stvaranju sile uzgona. Većina korijena lopatica dizajnirana je tako da u različitim vremenskim uvjetima izdrži različite vrste naprezanja [18]. Tetiva podržava stvaranje uzgona dok srednji raspon podnosi naprezanja, savijanja i smicanja. Naprezanja se dalje prenose od srednjeg raspona do korijena.



Slika 4.3.1. Dijelovi lopatice vjetroagregata [19]

S obzirom na izvedbu, možemo razlikovati lopatice sa zakretnim vrhovima ili s krilcima. I jedna i druga izvedba su istovremeno sekundarni kočni sustavi. Ako dođe do otkazivanja primarnog kočnog sustava (mehaničke kočnice) ograničavaju brzinu vrtnje stvaranjem momenta kočenja.

Sve veća potreba za električnom energijom koja se proizvodi iz energije vjetroa dovela je do povećanja dimenzija vjetroagregata. Povećanjem dimenzija vjetroagregata ujedno se povećava i njihova masa. Kako bi vjetroagregat premašio svoj životni vijek (20 do 25 godina), odabir materijala za različite komponente postaje vrlo važan. Postoji nekoliko materijala za konstrukciju lopatica vjetroagregata, ali korisnost ovih materijala ovisi o njihovoj masi i krutosti. Na slici 4.3.2. je vidljivo da kompoziti imaju dobru čvrstoću i dobru krutost vlakana. Uz veliku čvrstoću i krutost, kompoziti su lagani i kao takvi odgovaraju za izradu lopatica vjetroagregata [20].



Slika 4.3.2. Modul elastičnosti pojedine vrste materijala za lopatice vjetroagregata [21]

4.3.1. Prirodna vlakna

Potreba za smanjenjem cijene materijala dovela je do toga da se prirodna vlakna koriste kao materijali za vjetroagregate. Većina ovih prirodnih vlakana je ekološki prihvatljiva. Dobivaju se od minerala, biljaka i životinja. Jedno istraživanje pokazalo je da bambus ima dobru krutost i čvrstoću, te je stoga prikladan za proizvodnju lopatica vjetroagregata [21].

Zbog brzog razvoja, lake dobavljalivosti i ekološke prihvatljivosti, prirodna vlakna će se u budućnosti sve više koristiti u industriji energije vjetroa. Skupina istraživača zaključila je da 30% laminata koji je napravljen od bambusa poboljšava mehanička svojstva.

Nadalje, armirani kompozit punjen bambusom apsorbira manju količinu vode u usporedbi s praznim ojačanim polimerom [22]. Analiza životnog ciklusa bambusa također je istražena kako bi se odredile njegove karakteristike s lopaticama od staklenih vlakana te se ispostavilo da je korištenje bambusa najbolja opcija za lopatice vjetroagregata [23]. Također su istražena mehanička svojstva kompozita kokosovih vlakana [24]. Uočeno je da su njihova mehanička svojstva gotovo ista kao i za drvo, ali drugačije u odnosu na staklena vlakna. Lopatica turbine od lanenog vlakna također je razvijena na Sveučilištu u Nottinghamu. Ova vlakna imaju visoku čvrstoću, ali može doći do raslojavanja materijala jer je vlakno krhko, a to je veliki nedostatak kada se koristi kao lopatica.

4.3.2. Ugljična i staklena vlakna

Volumen i čvrstoća vlakana određuju krutost kompozita. Za većinu kompozita, glavni materijal za pojačanje sastoji se od E-staklenih vlakana. Tlačna i vlačna čvrstoća te krutost kompozitnog materijala povećavaju se kada se poveća sadržaj volumena vlakana. Više od 65% sadržaja u vlaknima se suši te se na taj način smanjuje čvrstoća kompozitnog materijala [25]. Provedeno je nekoliko istraživačkih radova usmjerenih na povećanje čvrstoće vlakana. Poznata vlakna visoke čvrstoće su bazaltna, ugljična i staklena vlakna. Pokazuju 40% visoke vlačne čvrstoće i otpornosti na savijanje. Tlačna čvrstoća ovih materijala veća je u odnosu na E-staklo za 10 do 20%, a što se tiče cijene, E-staklo je jeftinije u odnosu na S-staklo.

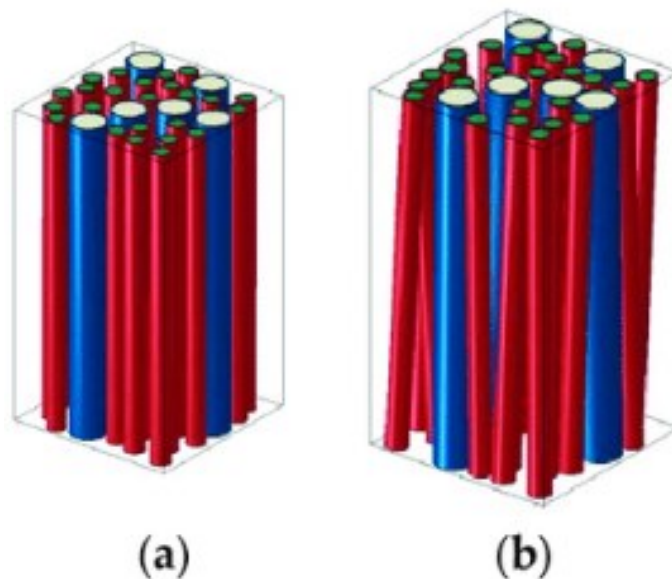
Alternativa staklenim vlaknima su ugljična vlakna. Krutost ugljičnih vlakana veća je u usporedbi sa staklenim vlaknima te su također lakši. Ova svojstva čine ih prikladnima za lopatice vjetroagregata jer su lagane, tanke i krute. Veliki nedostatak za ovaj materijal je to što se može lako oštetiti, a također je i skuplji u odnosu na E-staklena vlakna. Tlačna čvrstoća može opasti kada postoji neusklađenost vlakana u kompozitu od ugljičnih vlakana [21].

4.3.3. Bazaltna vlakna

Bazaltna vlakna imaju nisku tlačnu čvrstoću, kao i nisku adheziju na smole. Lako upijaju vodu i također se brže razgrađuju. Mehanička svojstva tzv. E-stakala su niža u odnosu na bazaltna vlakna te je bazalt 30% čvršći. U pogledu krutosti je 15 do 20% bolje od E-stakla, a masa bazalta je manja za 8 do 10%. Ugljična vlakna su skuplja u odnosu na bazalt. Također je istraživano korištenje bazalta kao materijala za lopatice vjetroagregata [21].

4.3.4. Hibridni kompozit

Istraživači danas razmatraju bazalt i E-staklo kao alternativu čistom ugljičnom ojačanju. Istraživanjem je utvrđeno da potpuna zamjena može smanjiti masu turbine za 80%, ali će povećati ukupni trošak materijala za 150%. Najveća lopatica vjetroagregata duga je 88,4 metara i proizvedena je od strane LM Wind power-a, a sastoji se od hibridnih kompozita ugljika i stakla [26]. Proučavani su mehanizmi čvrstoće i loma ovih hibridnih kompozitnih materijala. Većina istraživanja navela je da su se ugljična vlakna od deformacije do kvara, kao i udarna svojstva poboljšala zbog dodavanja staklenih vlakana u kompozite ojačane ugljičnim vlaknima. Drugo istraživanje je također primijetilo da kombinacija ugljičnih vlakana s vodljivim staklenim vlaknima u hibridnom kompozitu poboljšava otpornost materijala na lom. Numeričkom analizom uočeno je da je čvrstoća kompozita u funkciji omjera staklo/ugljik u obliku slova V. Slika 4.3.4.1. prikazuje hibridni kompozit s neusmjerenim i poravnatim vlaknom [26].



Slika 4.3.4.1. Hibridni kompozit: (a)poravnati i (b)neusmjereni [21]

4.3.5. Duromeri

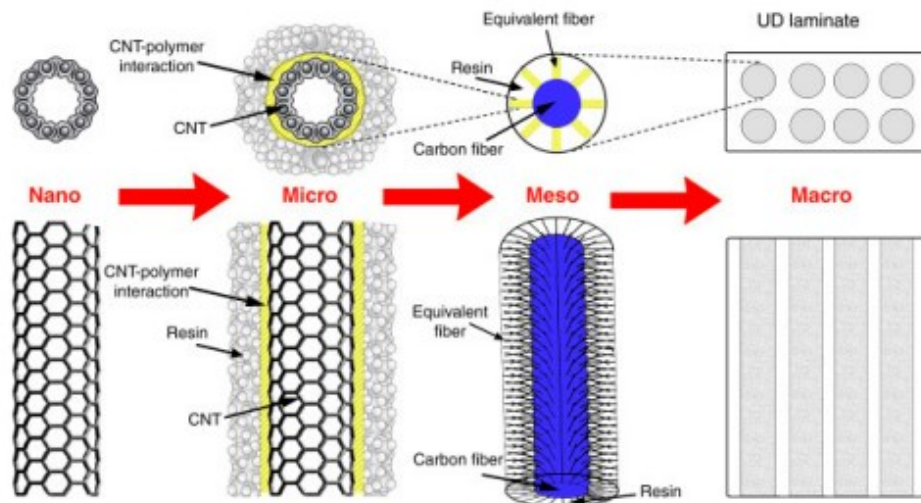
Više od 80% ojačanih kompozita za lopatice vjetroagregata proizvedeno je od termoreaktivne plastike. Ovi materijali se mogu skrućivati na nižim temperaturama pa čak i na sobnoj. Većina lopatica vjetroagregata razvijenih u prošlosti bila je izrađena od poliesterskih smola. Kako je potražnja za energijom rasla, tako se povećavala i potreba za lopicama vjetroagregata. Razvijanje matičnog materijala koji ima brži tempo skrućivanja (pri nižim temperaturama) važno je područje koje zahtijeva daljnja istraživanja [21].

4.3.6. Termoplasti

Ovi se materijali smatraju dobrom zamjenom za termoreaktivne matrice. Mogu se reciklirati, što je vrlo povoljno. Veliki nedostatak za termoplaste je to što zahtijevaju visoku temperaturu obrade. Proizvodnja velikih dijelova također postaje izazov zbog njihove visoke viskoznosti. Viskoznost taline termoplasta je reda 10^2 do 10^3 paskala [Pa]. Temperatura za razgradnju termoplasta je viša od njihove temperature taljenja, stoga je moguće da se oni preoblikuju. Rok trajanja termoplastičnih sirovina je neograničen [21].

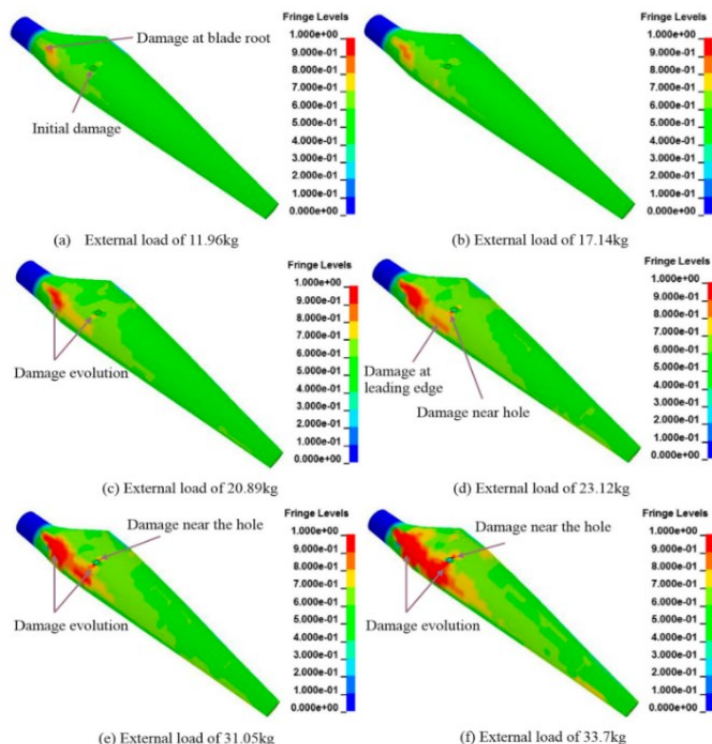
4.3.7. Nano-inženjerski kompoziti

Provedena su brojna istraživanja kako bi se poboljšale karakteristike kompozita dodavanjem nanocijevi u njihovu matricu. Kako bi se povećala čvrstoća i žilavost za 30 do 80%, istraživači predlažu dodavanje 0,5 težinskog postotka armature nanocijevčice u matricu kompozitnog materijala [20]. Istražuje se korištenje grafena kao armature za nanomodifikaciju kompozita vjetroagregata. Eksperimentalnim istraživanjem došli su do zaključka da je grafen prikladan za razvoj čvrstih lopatica vjetroagregata i produžuje vijek trajanja lopatica [27]. Vlačno naprezanje lopatica za vjetroagregat od 2 MW i 5 MW povećalo se kada je 1 do 5 težinskih postotaka ugljikovih nanovlakna spojeno s epoksidnim kompozitom ojačanim staklenim vlaknima. Masa lopatice također je smanjena za 20%, a time se produljuje vijek trajanja lopatica. Korištenje nano modificiranih polimera kao matrice za povećanje žilavosti često rezultira lošim svojstvima u drugim područjima, a to smanjuje njihovu primjenu. Istraživana je i upotreba nano pojačanih kompozita za zamjenu kompozita staklenih vlakana. Istraživanjem se zaključilo da korištenje neojačanog kompozita produljuje životni vijek lopatice vjetroagregata [28]. Slika 4.3.7.1. prikazuje ugljična vlakna ojačana nanocijevčicama.



Slika 4.3.7.1. Ugljična vlakna ojačana nanocijevicama [21]

Skupina istraživača razvila je model za određivanje oštećenja na kompozitnim lopaticama vjetroagregata kada su izložene različitim uvjetima opterećenja. Iz istraživanja kao što je prikazano na slici 4.3.7.2. zaključeno je da trošenje lopatica turbine nastaje kod gornje površine. Također možemo uočiti kako oštećenje vlakana počinje od korijena lopatice [29].



Slika 4.3.7.2. Oštećenje lopatica vjetroagregata uslijed opterećenja [21]

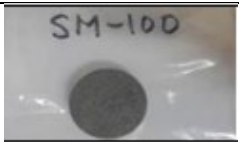
4.4. Generator

Električni generatori su u osnovi izrađeni od rotirajućeg dijela (rotor) i nepokretnog dijela (stator). Okretno magnetsko polje inducira napon u namotima statora. Njihovo magnetsko polje mogu osigurati ili elektromagneti, kojima je potrebna električna pobuda, ili permanentni magneti koji ne trebaju električnu pobudu. Korišteni materijali uključuju čelik i bakar za ožičenje u generatorima s elektromagnetom te čelik, bakar, bor, neodimij i disprozij u generatorima s permanentnim magnetima. O cjelokupnom dizajnu pogonskog sklopa ovisi koji će se generator koristiti u vjetroagregatu. Generator mora zadovoljavati određene uvjete kao što su: visok stupanj djelovanja, izdržljivost rotora na visokim brojevima okretaja u slučaju otkazivanja zaštitnog sustava, izdržljivost konstrukcija na visokim dinamičkim opterećenjima uslijed kratkog spoja te pri uklapanju i isklapanju generatora. Razni su kriteriji prema kojima se može napraviti podjela generatora. Prema načinu rada postoje generatori za paralelni rad s postojećom distributivnom mrežom, za samostalni rad te za spregnuti rad s drugim izvorom. Prema vrsti struje postoje istosmjerni i izmjenični generatori. Istosmjerni se zbog niske pouzdanosti rijetko primjenjuju. Prema načinu okretanja dijele se na generatore s promjenjivom ili nepromjenjivom brzinom okretanja [30].

4.5. Kočnica

U slučaju da generator ispadne iz mreže kada brzina vjetra prijeđe maksimalnu vrijednost doći će do velikog dinamičkog opterećenja. Tada mora postojati kočni sustav koji će zaustaviti rotor. Osim toga, zadaća ovog sustava je održavati projektnu brzinu vrtnje konstantnom. Kočna sila kočnice određena je veličinom okomitog opterećenja i koeficijentom trenja između kočione pločice i diska kočnice. Stoga je odabir kočione pločice s malim promjenama u koeficijentu trenja važan kako bi se osigurala stabilna sila kočenja. Potrebna je i visoka vlačna čvrstoća, jer se pločica može slomiti pod opterećenjem ako kontakt između kočione pločice i diska nije paralelan, odnosno ne zahvaća cijelu površinu. Kao kočione pločice često se koriste sinterirane pločice s velikom kočionom silom i organske pločice s niskom razinom buke. Jednim istraživanjem, mjereni su koeficijent trenja i čvrstoća dviju vrsta, jedne od sinteriranih materijala i jedne od organskog materijala, kako bi se odabrao materijal kočionih pločica prikladan za vjetroagregat. Tablica 4.5.1. prikazuje ispitane materijale [31].

Tablica 4.5.1 Potencijalni materijali za izradu kočnica nad kojima će se vršiti testiranje [31]

Naziv	Materijal	Detalji	Primjerak
SM100	Sinterirani	Čelik 10% Aditiv protiv trošenja	
SB207	Sinterirani	Čelik 17%	
FF136	Organski	Visoko trenje	

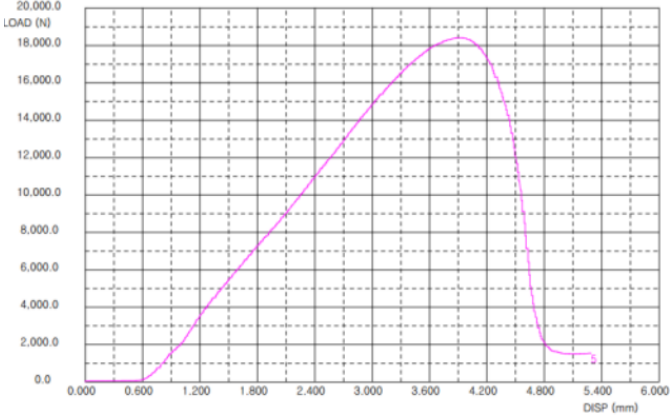
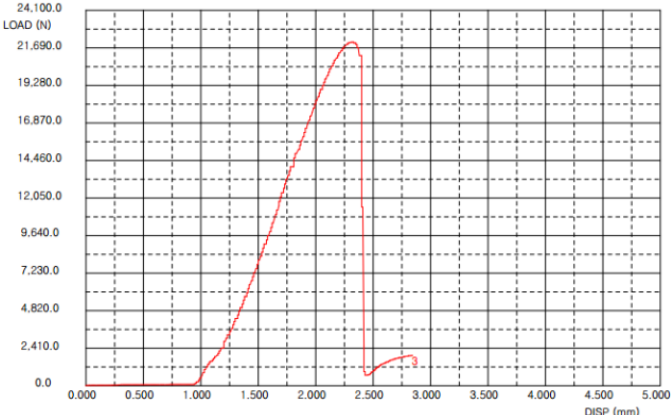
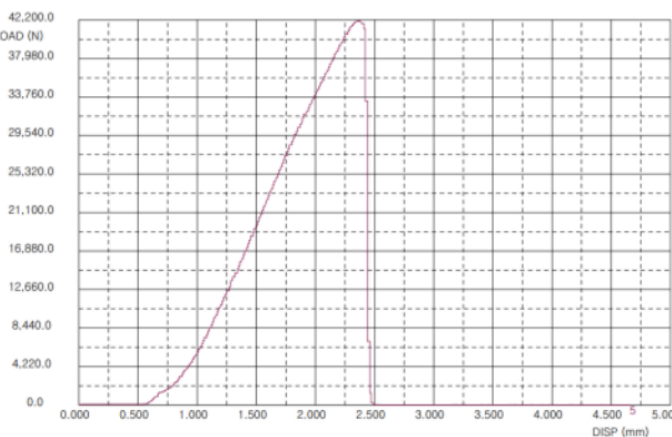
Koeficijent trenja mjereno je tribometrom „igla na disku“ (*engl. pin-on-disk*). Ispitivanje trenja kočionih pločica provedeno je s diskom (čelik, S45C) pod vertikalnim opterećenjem od 40 N, pri relativnoj brzini od 500 mm/sek i maksimalnom dometu od 3000 metara. Projektirani dinamički koeficijent trenja bio je 0,4, a materijali pločica koji su zadovoljili uvjet su SM100 koji je sintetični materijal i FF136 koji je organski. Karakteristike trenja oba materijala bile su prikladne za kočionu pločicu jer se vrijednosti koeficijenta trenja nisu značajno razlikovale s povećanjem kretanja [31].

Tablica 4.5.2. Rezultati testiranja koeficijena trenja materijala [31]

Naziv	Rezultat prikazan grafom	Primjerak	Koeficijent trenja
SM100			0,439
SB207			0,275
FF136			0,458

Također jedan od važnih čimbenika je lom materijala pločica, koji određuje granično naprezanje primijenjeno na pločicu u fazi projektiranja. Tablica 4.5.3. prikazuje rezultate testa.

Tablica 4.5.3. Ispitivanje tlačne čvrstoće materijala [31]

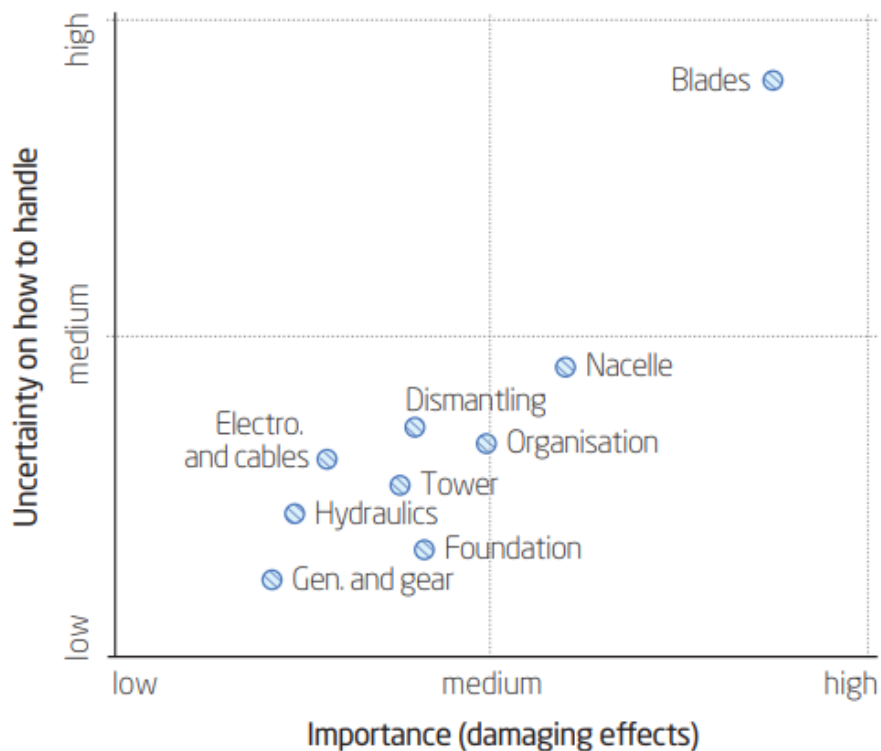
Naziv	Rezultat prikazan grafom	Naprezanje
SM100		<p>66 MPa 62 MPa 59 MPa 64 MPa 59 MPa</p>
SB207		<p>64 MPa 78 MPa 71 MPa 74 MPa 68 MPa</p>
FF136		<p>140 MPa 126 MPa 125 MPa 127 MPa 136 MPa</p>

Lomna čvrstoća mjerena je s pet uzoraka pločica izrađenih od iste tri vrste materijala kao i za ispitivanje koeficijenta trenja. Iz rezultata testiranja proizlazi da je FF136 (organski materijal) imao veću lomnu čvrstoću od SM100 i SB207 (sinterirani materijali).

5. ŽIVOTNI CIKLUS I MOGUĆNOSTI ZBRINJAVANJA VJETROAGREGATA

Vjetroagregati su jedna od ekološki najprihvatljivijih tehnologija za proizvodnju električne energije. Faza stavljanja vjetroagregata izvan pogona identificirana je kao slijepa točka pri analizi utjecaja energije vjetra na okoliš. Budući da je industrija vjetroagregata relativno mlada, postoji samo ograničena količina praktičnog iskustva u njihovom zbrinjavanju i recikliranju. To se posebno odnosi na vjetroagregate na moru, koji su relativno nova pojava. Iz procjene životnog ciklusa (u nastavku: *LCA, engl. Life-Cycle assessment*) vjetroagregata došlo se do zaključka kako utjecaji na okoliš dolaze iz tri glavna izvora: (1) otpad iz stupa i temelja (npr. iz proizvodnje čelika), (2) opasni otpad od komponenti iz kućišta vjetroagregata, (3) staklenički plinovi (npr. CO₂ iz proizvodnje čelika i otapala iz površinskih premaza). Iz navedenog može se zaključiti da za daljnje analize treba uzeti u obzir promjene u materijalima korištenim u stupu i temeljima, kao i promjene u konstruiranju i odabiru materijala komponenti unutar kućišta [32].

Većina vjetroagregata ima projektirani životni vijek od 20 do 25 godina. Ono što se događa na kraju životnog vijeka vjetroagregata ima značajan utjecaj na okoliš, a mogućnosti su: prodaja kompletnih rabljenih vjetroagregata, obnova radi produljenja radnog vijeka, prerada i ponovna uporaba komponenti, recikliranje i odlaganje na otpad. Vjetroagregati koji se smatraju prestarima ili preslabima za razvijena tržišta kao što su Danska i Njemačka, mogu se obnoviti i prodati na manje razvijenim tržištima kao što su Istočna Europa i Latinska Amerika. Druga je mogućnost produžiti radni vijek turbina nadogradnjom novijim ili obnovljenim komponentama. Ipak, ako se stari vjetroagregati ne mogu ekonomično ponovno iskoristiti, moraju se rastaviti, njihove komponente reciklirati, a ostatak zbrinuti na odgovarajući način. Slika 5.1. prikazuje utjecaj pojedinih komponenti vjetroagregata na okoliš (x-os) i nesigurnosti uključene u njihovo rastavljanje, recikliranje i zbrinjavanje (y-os).



Slika 5.1. Utjecaj pojedinih komponenti vjetroagregata na okoliš i razina opasnosti vezana uz stavljanje vjetroagregata izvan pogona [32]

Na slici 5.1. je vidljivo da lopatice predstavljaju veliki problem i postoji mnogo nejasnoća oko toga kako ih se pravilno i sigurno riješiti. Problem leži u kompozitu od stakloplastike koji se koristi za lopatice. Prazna kućišta vjetroagregata također je teško reciklirati jer sadrže mnogo različitih vrsta materijala, uključujući kompozite i PVC pjenu. Tablica 5.1. prikazuje stopu recikliranja i načine zbrinjavanja komponenti vjetroagregata.

Tablica 5.1. Stope recikliranja i načini zbrinjavanja komponenti vjetroagregata [32]

Materijal	Stopa recikliranja/odlaganja u %	Način zbrinjavanja
Legure željeza	98	Recikliranje
Čelik	-	Recikliranje
Aluminij i aluminijske legure	95	Recikliranje
Bakar, magnezij, nikal, cink i njihove legure	98	Recikliranje
Plemeniti metali	98	Recikliranje
Polimeri i guma	100	Spaljivanje
Elektronika	50	Recikliranje
Baterije	100	Recikliranje
Beton	64	Odlagalište otpada
Lopatice	95	Odlagalište otpada ili recikliranje

Postoji opća potreba za točnijim podacima kako bi se poboljšali LCA izračuni koji se odnose na vjetroagregate. Budući da su materijali odgovorni za najveći dio ukupnih emisija tijekom životnog vijeka vjetroagregata, nesigurnosti u podacima o recikliranju imaju veliki utjecaj na procjenu životnog ciklusa vjetroagregata u cjelini. Trenutačni brzi razvoj vjetroagregata stvara nove poslovne prilike kao što su obnavljanje komponenti vjetroagregata, usluge rastavljanja turbina i recikliranje materijala. Kako se globalne instalacije vjetroagregata povećavaju, pitanja vezana uz stavljanje vjetroagregata izvan pogona postaju sve zastupljenija u području zbrinjavanja istih.

6. ZAKLJUČAK

Još u srednjem vijeku energija vjetra je imala važnu primjenu u životu ondašnjih ljudi. Pokretanje brodova stavljajući im jedra omogućilo je ljudima daleka putovanja te transport robe. Prvi vjetroagregat korišten za proizvodnju električne energije pojavio se već 1887. godine. Od toga dana razvijaju se sve bolji i učinkovitiji vjetroagregati.

Danas je jako teško, gotovo nemoguće, zamisliti život bez električne energije. Potreba za električnom energijom sve je veća i potrebno je proizvoditi sve veću količinu energije. Sa druge strane, postoji potreba za smanjenjem emisije stakleničkih plinova i ublažavanjem klimatskih promjena. Kako bi se u isto vrijeme zadovoljile potrebe za električnom energijom te smanjile emisije stakleničkih plinova, proizvodnja iz obnovljivih izvora energije postaje sve veća. Energija vjetra se ne oslanja na fosilna goriva i time stavlja vjetroelektrane na mjesto pouzdanih i ekološki prihvatljivih izvora energije.

Razvoj materijala ključan je čimbenik u projektiranju sve učinkovitijih i povoljnijih vjetroagregata. Kako veličina rotora raste, tendencija će biti prema materijalima velike čvrstoće i otpornosti na trošenje i umor. Različiti kompoziti će se sasvim sigurno koristiti u ovom sektoru, što implicira da će biti potrebno rješenje za pitanje recikliranja tih materijala. Kako je industrija vjetroagregata relativno mlada postoji samo ograničena količina praktičnog iskustva u njihovom recikliranju. Energija vjetra ima veliki potencijal igrati ključnu ulogu u budućoj opskrbi električnom energijom, ali postoji potreba za točnijim podacima kako bi se što učinkovitije riješio problem njihovog recikliranja.

LITERATURA

- [1] Kaldellis, John K.; Zafirakis, Dimitris. The wind energy (r) evolution: A short review of a long history. *Renewable energy*, 2011, 36.7: 1887-1901.
- [2] Manwell, James F.; MCGOWAN, Jon G.; ROGERS, Anthony L. *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.
- [3] Eriksson, Sandra; Bernhoff, Hans; Leijon, Mats. Evaluation of different turbine concepts for wind power. *renewable and sustainable energy reviews*, 2008, 12.5: 1419-1434.
- [4] <https://govschoolagriculture.com/2015/07/24/whats-up-with-wind-turbines/> (kolovoz 2022.)
- [5] <https://www.linquip.com/blog/types-of-wind-turbines/> (kolovoz 2022.)
- [6] <https://education.nationalgeographic.org/resource/wind> (kolovoz 2022.)
- [7] <https://www.metoffice.gov.uk/weather/guides/observations/how-we-measure-wind> (kolovoz 2022.)
- [8] Tong, Wei. *Wind power generation and wind turbine design*. WIT press, 2010.
- [9] Sutherland, Herbert J. A summary of the fatigue properties of wind turbine materials. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 2000, 3.1: 1-34.
- [10] Ancona, Dan; McVeigh, Jim. Wind turbine-materials and manufacturing fact sheet. *Princeton Energy Resources International, LLC*, 2001, 19.
- [11] Šljivac, Damir; Šimić, Zdenko. „Osnove energetike i ekologije “,,,. *Dopunski izvori energije “*, predavanja, *ETF Osijek*, 2004, 2007.
- [12] Mishnaevsky Jr, L., et al. Materials of large wind turbine blades: recent results in testing and modeling. *Wind Energy*, 2012, 15.1: 83-97.
- [13] Novais, Rui M., et al. Incorporation of glass fibre fabrics waste into geopolymer matrices: An eco-friendly solution for off-cuts coming from wind turbine blade production. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 876-883.
- [14] <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wtrb/tower.htm> (kolovoz 2022.)
- [15] <https://www.windpowermonthly.com/article/1129016/close-siemens-prototype-steel-shell-tower> (kolovoz 2022.)
- [16] <https://p-e-c.com/en/wind-turbine-tower-design/> (kolovoz 2022.)

- [17] Nijssen, R. P. L.; Brøndsted, P. *Advances in wind turbine blade design and materials: 6. Fatigue as a design driver for composite wind turbine blades*. Elsevier Inc. Chapters, 2013.
- [18] Watson, James C.; Serrano, Juan C. Composite materials for wind blades. *Wind Syst. Mag*, 2010, 46: 46-51.
- [19] <https://forums.nrel.gov/t/simulation-of-an-offshore-wind-turbine-5mw-based-dfig/1246/83?page=5> (kolovoz 2022.)
- [20] Mishnaevsky Jr, Leon, et al. Materials for wind turbine blades: An overview. *Materials*, 2017, 10.11: 1285.
- [21] Olabi, Abdul Ghani, et al. A review on failure modes of wind turbine components. *Energies*, 2021, 14.17: 5241.
- [22] Holmes, John W., et al. Development of a bamboo-based composite as a sustainable green material for wind turbine blades. *Wind Engineering*, 2009, 33.2: 197-210.
- [23] Bakri, B.; Chandrabakty, S.; Alfriansyah, R.; Dahyar, A. Potential coir fiber composite for small wind turbine blade application. *Int. J. Smart Mater. Mechatron*. 2016, 2, 42–44
- [24] Sparnins, E. Mechanical Properties of Flax Fibers and Their Composites. Ph.D. Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2009.
- [25] Mishnaevsky, L., Jr.; Brøndsted, P. Statistical modelling of compression and fatigue damage of unidirectional fiber rein-forced composites. *Compos. Sci. Technol*. 2009, 69, 477–484.
- [26] Gutans, J.; Tamuzs, V. Strength probability of unidirectional hybrid composites. *Theor. Appl. Fract. Mech*. 1987, 7, 193–200.
- [27] Loos, M.; Yang, J. Carbon Nanotube-Reinforced Epoxy Composites for Wind Turbine Blades. ANTEC 2011 PENG-11-2010-0518. (PDF) Epoxy/Carbon Nanotube Composites for Wind Turbine Blades.
- [28] Pontefisso, A.; Mishnaevsky, L. Nanomorphology of graphene and CNT reinforced polymer and its effect on damage: Micromechanical numerical study. *Compos. Part B Eng*. 2016, 96, 338–349
- [29] Ye, J.; Chu, C.; Cai, H.; Hou, X.; Shi, B.; Tian, S.; Chen, X.; Ye, J. A multi-scale model for studying failure mechanisms of composite wind turbine blades. *Compos. Struct*. 2019, 212, 220–229.
- [30] Lacal-Arántegui, Roberto. Materials use in electricity generators in wind turbines—state-of-the-art and future specifications. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87: 275-283.

- [31] Kang, JongHun; LEE, HyoungWoo. The development of rotor brakes for wind turbines. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, 12.15: 5094-5100.
- [32] Andersen, Per Dannemand, et al. Recycling of wind turbines. *DTU International Energy Report*, 2014, 2014: 92-7.

SAŽETAK

U radu je prikazana važnost energije vjetra te načini na koji se ona , kroz povijest pa sve do danas koristi. Također, objašnjene su fizikalne osnove energije vjetra te je opisan razvoj modernih vjetroagregata. Predstavljene su različite vrste vjetroagregata kao i način na koji oni rade. Posebno su naglašeni osnovni dijelovi i struktura vjetroagregata. U radu su prikazani različiti materijali od kojih su izrađene pojedine komponente vjetroagregata te su navedena njihova svojstva i utjecaj na samu strukturu vjetroagregata. Na kraju rada su navedeni problemi i izazovi koji nastaju nakon završetka životnog vijeka vjetroagregata kao i mogućnosti rješavanja spomenutih problema.

Ključne riječi: energija vjetra, materijalna struktura, vjetroagregat

ABSTRACT

Development and application of wind turbine materials

The paper shows the importance of wind energy and the ways in which it has been used throughout history to the present day. Also, the physical basis of wind energy is explained, along with the development of modern wind turbines. Different types of wind turbines are presented, as well as the way they work. The basic parts and structure of wind turbines are especially emphasized. The paper presents various materials which individual components of wind turbines are made of, together with their properties and influence on the structure of the wind turbine. Finally, the work shows the problems and challenges that arise at the end of the lifetime of wind turbines, as well as the possibilities of solving the mentioned problems.

Key words: wind energy, material structure, wind turbine