

# VJETROELEKTRANE - OBNOVA I/ILI RECIKLIRANJE

## UVOD

Iako su u Republici Hrvatskoj (RH) zbog poglavito političkih razloga vjetroelektrane stavljene u negativni kontekst, nepobitna je činjenica da su one izvor električne energije bez nastanka štetnih emisija za okoliš. Također, ako se u obzir uzmu troškovi za fosilna goriva za potrebe termoelektrana, vjetar je, kada ga ima, potpuno besplatan i valja ga maksimalno iskoristiti. Stoga unatoč određenim negativnim učincima na okoliš i promjeni krajolika, u kontekstu smanjenja emisija CO<sub>2</sub> u atmosferu, korištenje sunca, vode i vjetra neizostavni su faktori u postojećim, ali i budućim energetske politikama zemalja članica Europske unije (EU) pa tako i RH.

U dosadašnjoj praksi se pokazalo da vjetroagregati na kopnu i moru imaju vijek trajanja između 20 i 30 godina. Cirkularna ekonomija koja preferira recikliranje i ponovnu upotrebu, kroz praksu ukazuje da je otprilike 10 do 15 % vjetroagregata problematično za recikliranje, a to su lopatice rotora. Do prije nekoliko godina bilo je prihvatljivo odlaganje problematičnih lopatica, no praksa se mijenja, a od proizvođača se traži primjena novog ekodizajna koji će omogućiti 100 % recikliranja. U EU koja je donijela zabranu odlaganja lopatica vjetroagregata propisima je regulirano da operatori moraju izdvojiti dostatna sredstva potrebna za uklanjanje i ekološko zbrinjavanje vjetroagregata.

Osnovna namjera ovog članka je sagledati razloge primjene ove tehnologije kao i njezine

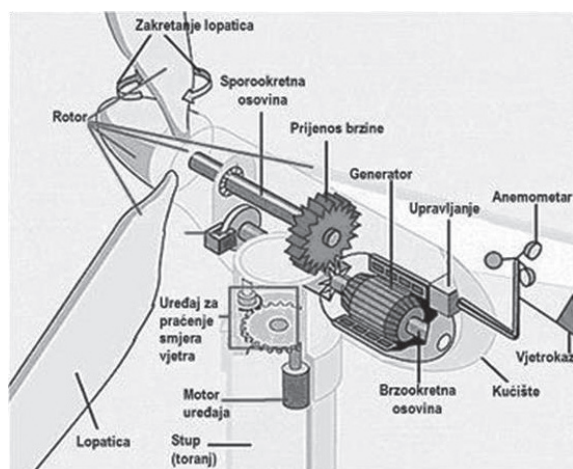
prednosti odnosno nedostatke jer će se i jednog dana RH susresti s problematikom recikliranja vjetroagregata. Najveći broj vjetroelektrana u RH sagrađeno je u razdoblju između 2004. i 2021. godine pa još nisu zabilježena promišljanja kako ih obnoviti odnosno hoće li se reciklirati i kuda s problematičnim otpadom.

## PRETVARANJE ENERGIJE VJETRA U ELEKTRIČNU ENERGIJU

Zbog različitih uvjeta koji se izmjenjuju u Zemljinoj atmosferi, a poglavito zbog razlike u tlaku zraka, dolazi do strujanja zraka iz područja višeg tlaka prema području nižeg tlaka i na taj način neprestano negdje nastaje vjetar. S obzirom da veća razlika u tlaku znači i brži vjetar, što ovisi o geografskim uvjetima i položaju, geografija izrazito utječe na stvaranje vjetra pa se prilikom planiranja vjetroelektrana u obzir moraju uzeti razni faktori kako bi njena gradnja bila opravdana. Lopatice vjetroagregata su aerodinamički konstruirane tako da mogu izdržati i orkanske vjetrove, no za proizvodnju električne energije obično su to brzine vjetra od 4 do 25 m/s.

U osnovi vjetroelektranu čini više samostalnih vjetroagregata koji kinetičku energiju vjetra pretvaraju u mehaničku energiju, a potom preko generatora dobivamo električnu energiju koja se šalje na transformator radi promjene napona. Promjenom napona se dobivena električna energija putem električne mreže šalje sve do krajnjeg potrošača.

Prema mjestima gdje su vjetroelektrane građene možemo ih podijeliti na one u unutrašnjosti, koje mogu biti u ravninama ili u brdovitom krajoliku, odnosno one u priobalju i na pučini, gdje o dubini mora ovisi jesu li im stupovi temeljeni ili plutaju. Iako postoje i vjetroagregati s vertikalnom osi, danas je najčešća izvedba vjetroagregata s tri lopatice i horizontalnom osi. Upravo lokacija tj. nadmorska visina, temperatura i tlak zraka na određenom području utječu na tzv. gustoću zraka pa je lakši zrak s nižim tlakom prisutan na višim nadmorskim visinama, a teži odnosno gušći zrak koji je učinkovitiji za pokretanje lopatica uglavnom dolazi na razini mora.



Slika 1. Prikaz sastavnih dijelova vjetroagregata s horizontalnom osovinom

Kod vjetroagregata prikazanog na slici 1 (*Diplomski rad br. 1242, Priključenje vjetroelektrane na prijenosnu elektroenergetsku mrežu, Ivana Vurbić, Zagreb, srpanj 2015.*) značajno je da se radi o relativno malom broju okretaja osovine koja se kreće uglavnom od 7 do 12 okretaja u minuti, a mjenjačima se prijenos brzine osovine podiže do 1.500 okretaja u minuti. Na taj način se mehanička energija okretanja osovine pomoću generatora pretvara u električnu energiju.

Visine stupova i radijusi lopatica variraju od nekoliko desetaka metara do više od 100 metara tako da najviše izvedbe mogu dosegnuti i 250 m uvis. Kako veličina lopatica odnosno radijus koji one „pokrivaju“ prilikom vrtnje utječe i na snagu vjetroagregata, rasponi snage kreću se od 100 kilovata pa sve do 12 megavata po vjetroa-

gregatu. Što je veći raspon lopatica koji zahvaća horizontalno postavljeni rotor, veća je i proizvodnja električne energije (<https://windeurope.org/about-wind/wind-basics/>). U sklopu nacionalnog istraživačkog centra u Osterildu krajem 2021. godine pušten je u rad i priključen na mrežu vjetroagregat visok 271,4 metra, sa tri lopatice po 108 metara, koji se ubraja među najviše samostojeće građevine u Danskoj (<https://www.jutarnji.hr/planet/Iva-Badanjak,5.1.2022.>). Svakako je potrebno istaknuti da je danski tip vjetroagregata s tri lopatice najrašireniji tip vjetroagregata u svijetu.

## PREDNOSTI I NEDOSTACI VJETROELEKTRANA

Energiju vjetra čovjek već tisućljećima koristi za plovību, sport ili ju pretvara u rad. Također, ključno je to da vjetra ima svugdje, no nema ga uvijek i osjećamo ga od laganog povjetarca do orkanskih udara. Stoga je prilikom projektiranja vjetroelektrana neophodno pronaći pravo područje koje ima sve čimbenike za što češću pojavu vjetra. Bilo da se radi o unutrašnjosti, priobalju ili morskim površinama s pravilnim rasporedom vjetroagregata i veličinom radijusa koji okretanjem oko osi pokrivaju lopatice rotora, moguće je maksimalno iskoristiti energiju vjetra i proizvoditi električnu energiju bez emisija CO<sub>2</sub>.

Ako promatramo projekte poput hidroelektrana, solarnih elektrana i vjetroelektrana koje su planirane i građene na specifičnim lokacijama, za njih je značajno da ne iziskuju dopremu energenata te ne emitiraju nove emisije CO<sub>2</sub> u zrak. Osim dopreme i skladištenja energenata termoelektrane i nuklearne elektrane imaju i dodatni problem sa zbrinjavanjem otpada. Iako hidroelektrana nema emisija u zrak niti otpada poput termoelektrane i nuklearne elektrane, za sve tri tehnologije specifično je da koriste građevine koje se grade na dulje razdoblje i imaju visoke troškove u izgradnji. Uz to utječu čak i na mikroklimu neposrednog okruženja.

Izgradnjom vjetroelektrane krajolik se nepovratno mijenja, no zbog manjih dimenzija temelja stupova te visine na kojoj se lopatice vjetroagregata okreću i dalje je moguće obrađivati okolno poljoprivredno zemljište ili ploviti kroz mrežu

postavljenih vjetroagregata. Iako se radi o građevinskom zahvatu u okolišu, po potrebi je moguće zamijeniti pojedine dijelove vjetroagregata, demontirati cijelu konstrukciju i na taj način ju u potpunosti ukloniti iz okoliša, za razliku od hidroelektrana, termoelektrana ili nuklearnih elektrana.

Trajanje od 20 do 30 godina može biti nedostatak, ali i prednost, jer se već postojeća infrastruktura može u budućnosti iskoristiti za izgradnju novijih i učinkovitijih, odnosno ekološki prihvatljivijih vjetroagregata. Drugim riječima, sruši se stari vjetroagregat i na njegovom mjestu izgradi se novi koji je veći i snažniji. Naposljetku se samo iznova spoji na postojeću mrežu.

Kao nedostatak bitno je istaknuti i buku koju stvaraju rotor i prostor kućišta s generatorom u kojem se okreću zupčanici pa ta buka može u relativno nenaseljenom području utjecati na životinje koje najčešće migriraju iz svog prirodnog staništa. Prvenstveno, to se odnosi na ptice i šišmiše. Okretanje lopatica te udaranje u njih prilikom leta najčešći su razlozi pojedinačnih stradavanja ovih životinjskih vrsta. Ti nedostaci su uglavnom najčešći argumenti udruga za zaštitu životinja protiv izgradnje vjetroelektrana, zbog čega izvođači nastoje smanjiti buku i riješiti probleme s ozljeđivanjem životinja.

Iako se rotor s glavčinom, mjenjačem i generatorom nalazi unutar zatvorenog prostora kućišta, takva tehnologija iziskuje prisutnost ulja i masti. Stoga je tehnički moguće istjecanje ulja i masti prilikom kvara ili oštećenja, a postoji i potencijalna opasnost od onečišćenja neposrednog okoliša. Upravo su održavanje i popravci jedan od nedostataka vjetroagregata jer se moraju odraditi na velikim visinama, a to iziskuje posebne mjere sigurnosti za ljude i korištenje posebnih dizalica ili helikoptera.

## STANJE U SVIJETU I RH

Okretanje iskorištavanju energije vjetra u svijetu započinje 70tih godina 20. stoljeća kao odgovor i pronalaženje energetskih rješenja zbog svjetske naftne krize 1973. godine. Vodeću ulogu su u to vrijeme imale Sjedinjene Američke Države (SAD), gdje se 1980tih posebno isticala Kalifornija. Europa se 1982. godine, izgradnjom prve

europske vjetroelektrane (5 agregata po 20 kW) na grčkom otoku Kythnos, uključuje u projekte izgradnje prvih vjetroagregata. Godine 1991. izgrađena je prva vjetroelektrana na moru Vindeby u Danskoj. U Irskom moru je 2018. godine otvorena najveća priobalna vjetroelektrana na svijetu - Walney Extension s ukupno 87 vjetroagregata, rasprostranjenih na površini od 145 km<sup>2</sup>.

Iako je u brodogradilištu Uljanik još 1988. postavljen prvi vjetroagregat, do realizacije projekta prve vjetroelektrane na otoku Pagu trebalo je proteći još 26 godina, kada je s radom u kolovozu 2004. godine započela vjetroelektrana Ravne-1 sa 7 izgrađenih vjetroagregata. Prema podacima iz Registra obnovljivih izvora energije i kogeneracije te povlaštenih proizvođača (OIEKPP), koji vodi Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, danas su u RH aktivna 52 projekta odnosno 24 vjetroelektrane koje uključuju 325 vjetroagregata s horizontalnom osovinom i koji zajedno postižu električnu snagu od 2 216,33 MW. Vjetroelektrane su građene na otocima i u unutrašnjosti Zadarske, Šibensko-kninske, Splitsko-dalmatinske i Dubrovačko-neretvanske županije. S godinama su se povećavali brojevi vjetroagregata tako da danas najveća vjetroelektrana Krš Pađene ima 48 vjetroagregata, a promjer lopatica rotora se s početnih 52 metra udvostručio na 108 metara, čime vjetroagregati u RH dosežu visinu do 200 metara.

Prema podacima iz Globalnog izvješća o vjetru za 2021. godinu, u svijetu vjetroelektrane predstavljaju 743 GW električne snage. Tijekom 2020. godine dva najveća tržišta energije vjetra, ona SAD-a i Kine zajedno su instalirala gotovo 75 % novih instalacija, čime zauzimaju više od polovice svjetskog tržišta. Znatnu ulogu u instaliranju novih kapaciteta te godine imale su i Rusija, Indija, Kanada te Brazil, dok su zemlje članice EU-a zbog pandemije COVID-19 imale manje zapažen rast.

Udio energije vjetra u potražnji za električnom energijom Europe iznosi oko 17,8 % od čega 13,5 % ili 998 GWh dolazi od vjetroelektrana s kopna, a 4,3 % ili 317 GWh proizvedu vjetroelektrane izgrađene na moru (<https://wind-europe.org/about-wind/wind-basics/>). Nastavno na brojke iz Globalnog izvješća za 2021. godinu energija dobivena od vjetra pokriva gotovo 7 % svjetske potražnje za električnom energijom. Taj

udio bi do 2030. godine još trebao rasti zbog planiranog smanjenja emisija stakleničkih plinova za neto 55 %, a konačni maksimum se očekuje 2050. godine u kontekstu politika „Green Deal“ i postizanja klimatske neutralnosti.

## RECIKLIRANJE VJETROAGREGATA

Kada se kreće u realizaciju projekta kojem je planirani vijek trajanja između 20 do 30 godina, to ostavlja dovoljno vremena za razmišljanje o fazama održavanja, zamjene dijelova kao i o uklanjanju, pogotovo kada se misli na vjetroagregate. Ključno je i to da se u tom razdoblju mijenjala sama tehnologija, materijali koji se danas koriste, a promijenjen je i stav u razmišljanju što s uređajima, opremom i otpadom kada vjetroagregat više neće moći obavljati svoju funkciju.

Također, najlakše je učiti na primjerima drugih i njihovoj prilagodbi današnjim politikama cirkularne ekonomije, zbog čega su se morala iznaći nova tehnološka rješenja za recikliranje odnosno zbrinjavanje dijelova vjetroagregata. Tu je možda najbolji primjer za proučavanje, slučaj SAD-a koji je 90tih godina prošlog stoljeća izgradio na desetke tisuća vjetroagregata koji su u posljednjih 10 godina postali problem. Prema podacima iz izvješća Nacionalnog laboratorija za obnovljivu energiju u SAD-u (<https://www.usgs.gov/faqs/what-materials-are-used-make-wind-turbines>) kod vjetroagregata koji su izgrađeni do 2015. godine u SAD-u, ovisno o proizvođaču i tipu, na čelik otpada 66 – 79 % ukupne mase vjetroagregata, na stakloplastiku, smole ili plastike 11 – 16 %, željezo ili lijevano željezo 5 – 17 % te bakar 1 % i aluminijski 0 – 2 %. Ovisno o veličini i proizvođaču, za izgradnju jednog vjetroagregata upotrijebljeno je od 164 do 334 tone navedenih materijala, a tome još treba dodati više od 1 000 tona betona i armaturnog željeza upotrijebljenih za temelje i potkonstrukciju.

Kompozitni materijali od kojih su tada rađene lopatice rotora za vjetroagregat nisu bili pogodni za recikliranje pa su deseci tisuća komada prerezanih lopatica završavali na odlagalištima gdje su strojno prekriveni zemljom. Danas ta opcija više ne dolazi u obzir, jer je promijenjen i zakonodavni okvir, a zbog stalnog povećanja broja izgra-

đenih vjetroelektrana na kopnu i moru, postavlja se logično pitanje gdje bi ih se uopće moglo postaviti odlagati. Dakle, u jednadžbu zbrinjavanja ulazi recikliranje i uporaba materijala, a opcije su limitirane i trenutno postoji mali broj tvrtki koje su u mogućnosti reciklirati sve materijale korištene kod izgradnje „starijih“ tipova vjetroagregata. Za „nove“ vjetroagregate već se u planiranju vodila briga o upotrebi ekološki prihvatljivih materijala, stoga neki proizvođači ponosno ističu mogućnost 100 % recikliranja svih korištenih materijala. Zbog trenda ponovne upotrebe neki operateri koriste opciju da „malo“ korištene vjetroagregate prve generacije jednostavno demontiraju i prodaju u druge zemlje gdje ih ponovno montiraju, dok tehnološki zastarjele vjetroagregate i postrojenja tzv. druge generacije, zbog složenosti i troškova nema smisla ni ekonomskog opravdanja da ih se instalira negdje drugdje.

Prilikom uklanjanja vjetroagregata za demontažu je potrebno angažirati specijalne strojeve i dizalice, jer se kućišta s generatorom i rotor s lopaticama nalaze na visinama višim od 50 odnosno 100 m iznad tla odnosno na moru iznad površine mora, što u tom slučaju uključuje i posebna plovila. Nakon demontaže cijelog postrojenja slijedi rezanje pojedinih dijelova radi uporabe u pogonima, dok se dio reciklira izravno na mjestu gdje je vjetroagregat i izgrađen. Tu se prvenstveno misli na temelje i potkonstrukciju, gdje se beton i armaturno željezo nakon usitnjavanja mobilnim uređajem i odvajanja mogu ponovno upotrijebiti. Usitnjeni mineralni agregat moguće je ponovno upotrijebiti dijelom za novi beton ili za nasipni materijal u niskogradnji, a armaturno željezo i čelik od stupova odlaze u čeličane za dobivanje novih metalnih proizvoda. Tehnički najsloženiji dio vjetroagregata kojeg čini kućište s generatorom, prikazano na slici 1 također ne predstavlja veći izazov za recikliranje jer se ionako svi obojeni metali i elektronički otpad uspješno recikliraju, a otpadna ulja i masti ako se ne mogu reciklirati mogu biti energetske oporabljene. Bitno je istaknuti da se u postupku demontaže i do potpunog uklanjanja mora voditi posebna briga o okolišu kako bi se lokacija mogla vratiti u ekološki ispravno stanje.

Na kraju se dolazi do „problematičnih“ lopatica rotora, koje kao što smo vidjeli mogu biti i

preko 100 m dužine, stoga postoji problem njihovog transporta do pogona za obradu i recikliranje. Iako se radi o materijalima koji nisu toksični, njihovo odlaganje ili spaljivanje u cementarama više nisu opcija, jer EU novim politikama nastoji sprovesti zabranu odlaganja na odlagalištima do 2025. godine. Neke od specijaliziranih tvrtki koje se danas bave recikliranjem lopatica, uglavnom nastoje na samome mjestu izrezati lopatice na manje komade koji se potom prevoze te dodatno režu i drobe na postrojenjima s ciljem dobivanja sitnijeg granulata za daljnju obradu. Kao što je i na samom početku istaknuto taj udio od 10 do 15 % predstavljaju kompozitni materijali. Dio izdvojenog bakra i aluminijskih ugrađenih unutar lopatica odlazi također u ljevaonice, dok stvarni problem predstavljaju kompoziti tj. plastični materijali sa staklenim ili ugljičnim vlaknima. Ovisno o proizvođaču, ugljična ili staklena vlakna korištena su jer su lagana i moguće ih je oblikovati u željeni oblik, a osiguravaju i veliku izdržljivost lopatica koje su izložene velikim naporima u svim smjerovima ovisno o vjetru. Dakle, s pravom tehnologijom, koja osim mehaničkog usitnjavanja uključuje i kemijske postupke za odvajanje, moguće je odvojiti organski materijal od staklenih odnosno ugljičnih vlakana. Time se omogućuje ponovno korištenje svake komponente zasebno. Zbog svojih svojstava ugljična i staklena vlakna mogu se ponovno koristiti u sektorima industrije kao što su zrakoplovstvo, automobili, pomorski promet, aeronautika, oprema za slobodno vrijeme i sport te građevinarstvo. Na polju recikliranja kompozitnih materijala u EU ističu se Njemačka, Španjolska i Danska, a glavni cilj je postići 100 % recikliranja lopatica vjetroatregata.

## ZAKLJUČAK

Procjenjujući prednosti i nedostatke vjetroelektrana, uz dodatno stavljanje u kontekst smanjivanja utjecaja fosilnih goriva na energetski sektor, može se zaključiti da će se u svijetu nastaviti graditi nove vjetroelektrane, a njihova tehnologija će se i dalje razvijati kako bi taj sektor omogućio

što više električne energije iz obnovljivih izvora. RH će s vremenom također nastojati povećati udio električne energije putem vjetra jer joj je to predviđeno u strategiji razvoja, ali i zbog obveznog doprinosa u globalnom smanjenju emisija CO<sub>2</sub>. Hoće li se projekti s priobalnog dijela preseliti i na kontinentalni dio pokazat će vrijeme, jer to iziskuje i nova zemljišta za izgradnju, ali i prihvaćanje od strane lokalnih zajednica.

Nakon prihvaćanja novih politika u EU i uvođenja zabrane odlaganja lopatica vjetroatregata, najveći trenutni izazov je učiniti tehnologije recikliranja komercijalno održivima, a za to je potrebna koordinacija kreatora politike, drugih korisnika kompozita i industrije recikliranja. RH je kao članica EU-a također dužna svoje zakone uskladiti s EU, stoga će uz propise doći i preuzimanje obveza.

S obzirom na sve navedeno, bitno je sagledati u kakvoj situaciji će se uskoro naći hrvatske tvrtke, budući da se nekim vjetroatregatima približava kraj trajanja. Neminovno je da će se s vremenom postojeća infrastruktura nastojati iskoristiti, zbog kompliciranih procedura prilikom same izgradnje i puštanja u pogon, a „stare“ modele će najvjerojatnije zamijeniti novi, veći i snažniji vjetroatregati. Sa svoja sveukupno 325 vjetroatregata, RH neće imati značajnije količine otpadnih lopatica na razini godine, s obzirom da je naša prva vjetroatregat puštena u rad 2004. godine, a i one izgrađene kasnije su imale uglavnom manji broj vjetroatregata starije generacije. Tri nove vjetroelektrane puštene u rad 2021. godine imaju 105 vjetroatregata koji bi trebali biti novije generacije pa će i njihova eventualna ponovna upotreba ili recikliranje za nekih 20tak godina biti manji tehnički problem.

Do sada nije bilo potrebe za izgradnjom vlastitog pogona u kojem bi se u RH moglo reciklirati problematične lopatice pa će skupi transport i zbrinjavanje u nekoj od članica EU-a biti najizglednija opcija. Taj trošak će morati snositi sami operateri vjetroelektrana, a za to su unaprijed morali osigurati namjenska sredstva.

*dr. sc. Branimir Fuk, dipl. ing. rud.*