

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Savonius-tuuliturbiinin toiminnan parantaminen

Improving the Performance of Savonius Wind Turbine

Työn tarkastaja: Aki Grönman

Työn ohjaaja: Aki Grönman

Lappeenranta 08.04.2020

Hannu Halme

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Hannu Halme

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Aki Grönman

Kandidaatintyö 2020

37 sivua, 30 kuvaa ja 4 taulukkoa.

Hakusanat: tuulivoima, pientuotanto, parantamismenetelmät

Tämän työn tavoitteena on tutustua Savonius-turbiinin toiminnan parantamismenetelmiin. Erityisesti käsitellään turbiinin tuottamaa tehoa, joka on hyötysuhdetta määrittävän tehokertoimen funktio. Lisäksi otetaan huomioon parantamismenetelmien vaikutus turbiinin itsekäynnistyvyyteen. Työssä tutustutaan aiheeseen liittyviin viimeaikaisiin tutkimuksiin, ja esitetään tutkimusten tulokset pääpiirteissään. Työ ei ole kattava listaus kaikista aiheeseen liittyvistä tutkimuksista, vaan kokoelma lupaavia ja innovatiivisia menetelmiä.

Savonius-turbiiniin parantamismenetelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen eri kategoriaan; turbiinin aerodynamiikan tai rakenteen parantamiseen ja augmentointiin. Turbiinin aerodynamiikkaa voidaan parantaa siipiprofiilia optimoimalla tai käyttämällä innovatiivisia ratkaisuja, kuten turbiinin siipiin sijoitettuja venttiilejä. Parhaimmillaan tehokerrointa voidaan parantaa yli 27 prosenttia pelkästään siipiprofiilia optimoimalla. Merkittävästi suurempiin tehokertoimen parannuksiin päästään käsiksi hyödyntämällä virtauksen augmentointia, eli virtauksen ohjausta. Yleisesti virtauksen ohjauksen tavoitteena on ohjata virtaus pois Savonius-turbiinin palaavasta siivestä, ja kasvattaa turbiinin läpi kulkevaa massavirtaa. Parhaimmissa olosuhteissa augmentoinnilla voidaan saavuttaa jopa 160 prosenttia suurempi tehokerroin kuin augmentoimattomalla turbiinilla.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Perinteisen savonius turbiinin optimointi	6
2.1 Siipikaaren kulma.....	6
2.2 Siipien limittäisyys.....	7
2.3 Korkeuden ja leveyden suhde.....	9
2.4 Siipien lukumäärä.....	10
2.5 Päätylevyjen vaikutus.....	11
2.6 Savonius-turbiinin optimaaliset parametrit	12
3 Siipiprofiilin ja turbiinin parantaminen	13
3.1 Kierretty Savonius-turbiini.....	13
3.2 Koukun muotoiset siivet.....	14
3.3 Neljännessiipien lisäys turbiiniin	16
3.4 Kolmisiipinen S-siivillä varustettu turbiini	18
3.5 Optimoitu ja taipuvasiipinen turbiini	19
3.6 Venttiilillä varustettu siipi	21
3.7 Siipiprofiiliin perustuva turbiini	22
3.8 Parannusmenetelmien vertailua.....	23
4 Virtauksen augmentointi	26
4.1 Virtauksen ohjaus molempiin siipiin.....	26
4.2 Tuulensuunnasta riippumaton ohjuri.....	27
4.3 Automaattisesti tuulensuunnan mukaan kääntyvät ohjauslevyt.....	28
4.4 Tuulensuunnan mukaan kääntyvä turbiinikokonaisuus	30
4.5 Nopeussäätö käännettävillä augmentointisiivillä	32
4.6 Augmentoinnin vaikutus siiven optimaaliseen muotoon	33
4.7 Augmentointimenetelmien vertailua	35
5 Yhteenveto	37
Lähdeluettelo	38

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

A	poikkipinta-ala	[m ²]
c_p	tehokerroin	[-]
P	teho	[W]
R	siiven leveys	[m]
T	momentti	[Nm]
U	siiven kärkinopeus	[m/s]
v	virtauksen nopeus	[m/s]

Kreikkalaiset aakkoset

ρ	tiheys	[kg/m ³]
ω	kulmanopeus	[rad/s]
φ	siipikaaren kulma	[°]

Dimensiottomat luvut

AR-suhde	turbiinin korkeuden ja leveyden suhde
OR-suhde	siipien limittäisen etäisyyden suhdeluku
SD-suhde	siipien etäisyyden suhdeluku
TSR	kärkinopeussuhde

Lyhenteet

CFD	numeerinen virtausdynamiikka
max	maksimiarvo

1 JOHDANTO

Savonius-turbiinin kehitti 1920-luvun lopulla Sigurd Johannes Savonius. Savonius-turbiini pyöri pystysuoran akselin ympäri ja ylhäältä päin katsottuna turbiini muodostuu kahdesta puolikaaren muotoon taivutetusta siivestä, jotka sijaitsevat hieman limittäin. Savonius-turbiinin vahvuuksina voidaan pitää yksinkertaista, halpaa ja varmatoimista rakennetta, pientä kokoa ja hiljaista pyörimisnopeutta. Nämä ominaisuudet mahdollistavat turbiinin käytön erityisesti urbaaneissa ympäristöissä ja haastavissa olosuhteissa. Savonius turbiinin ongelmina kuitenkin ovat huono hyötysuhde ja mahdolliset käynnistysongelmat. (Mohamed et al. 2010).

Tässä työssä käsitellään menetelmiä, joilla voidaan parantaa Savonius-turbiinin toimintaa; erityisesti hyötysuhdetta ja käynnistymistä. Työn tavoitteena on tutustua viimeaikaisiin tutkimuksiin ja vertailla eri menetelmiä keskenään. Työ ei ole kattava listaus kaikista aiheeseen liittyvistä tutkimuksista, vaan työhön on poimittu eri tekniikoihin perustuvia lupaavia menetelmiä. Hyötysuhdetta arvioidaan erityisesti tehokertoimen c_p avulla.

2 PERINTEISEN SAVONIUS TURBIININ OPTIMOINTI

Tuuliturbiinin hyötysuhteen arvioimiseen käytetään erityisesti tehokerrointa c_p . Tehokerroin määritetään turbiinin tuottaman mekaanisen tehon P ja turbiinin projektiopinta-alan läpi kulkevan virtauksen kineettisen energian P_{max} suhteena. (Mohammadi 2018).

Kineettinen energia fluidi-virrassa on määritetty (Mohammadi 2018):

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (1)$$

missä: ρ fluidin tiheys
 v virtauksen nopeus
 A virtauksen poikkipinta-ala

Turbiinin tuottama mekaaninen teho voidaan määrittää tehokertoimen c_p avulla (Mohammadi 2018):

$$P = T\omega = P_{max}c_p \quad (2)$$

missä: T momentti
 ω kulmanopeus

Teoreettinen maksimiarvo tehokertoimelle on 0,593 (Betz 1920.)

Tuuliturbiinin tarkastelussa usein käytetty dimensioton suure on kärkinopeussuhde TSR (tip-speed ratio). Kärkinopeussuhde kuvaa siiven uloimman reunan nopeuden suhdetta virtauksen nopeuteen (Hariyanto et al. 2016):

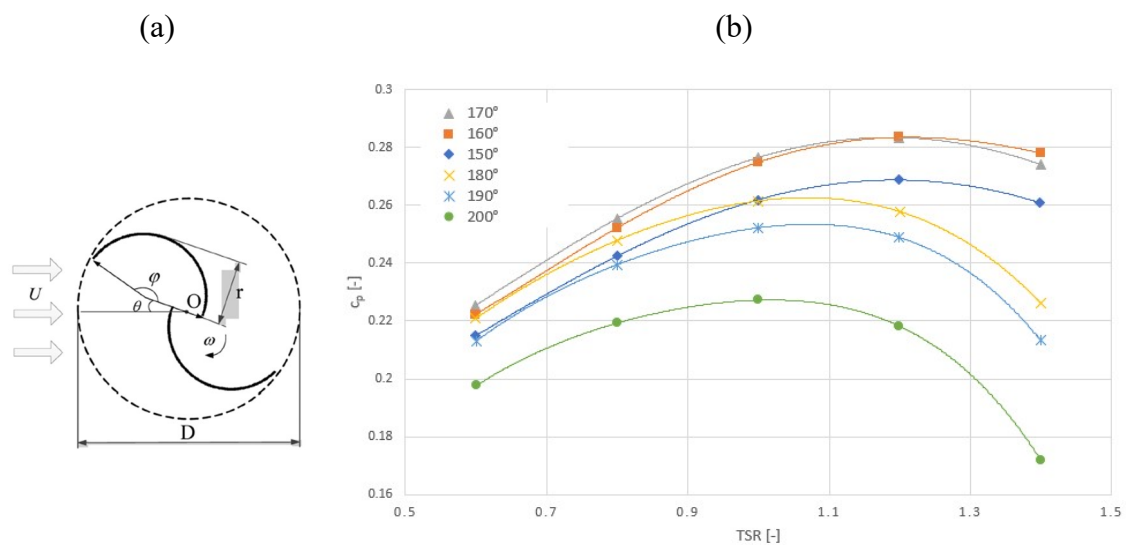
$$TSR = \frac{U}{v} = \frac{\omega r}{v} \quad (3)$$

missä: U siiven kärkinopeus
 r siiven säde

2.1 Siipikaaren kulma

Perinteisesti Savonius-turbiinissa siipi on puolikaaren muotoinen, jolloin siipikaaren kulma on 180 astetta. Zhaoyong ja Wenlong (2014) tutkivat siipikaaren kulman suuruuden vaikutusta turbiinin toimintaan. Kulman kasvattaminen lisää etenevän siiven tuottamaa momenttia, kun taas kulman pienentäminen vähentää palaavan siiven

tuottamaa negatiivista momenttia. Optimoimalla kulman suuruutta voidaan turbiinilla saavuttaa maksimaalinen kokonaismomentti. Tutkimuksessa vertailtiin CFD-menetelmällä 150-200 asteen kulmia kymmenen asteen välein. Vertailu tehtiin viidellä eri kärkinopeussuhteella. Vertailun tulokset ja siipikaaren kulman φ määritelmä on esitetty kuvassa 1. (Zhaoyong & Wenlong 2014).



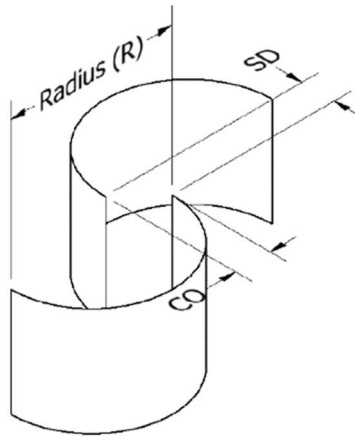
Kuva 1: (a) Siipikaaren kulman määritelmä Savonius-turbiinissa. (b) Tehokerroin eri siipikaaren kulmilla kärkinopeussuhteen funktiona. (Zhaoyong & Wenlong 2014).

Kärkinopeussuhteen ollessa alle 1,2 saavutetaan paras tehokerroin 170 asteen kulmalla ja kärkinopeussuhteen ollessa yli 1,2 saavutetaan paras tehokerroin 160 asteen kulmalla. Sekä 160, että 170 asteen kulmalla paras tehokerroin saavutetaan noin 1,2:n kärkinopeussuhteella, kun perinteisellä 180 asteen kulmalla se saavutetaan noin 1,07:n kärkinopeussuhteella. Korkein tehokerroin saavutettiin 160 asteen kulmaan taivutetulla siivellä ja se oli 8,37 % parempi kuin perinteisellä turbiinilla. (Zhaoyong ja Wenlong 2014).

2.2 Siipien limittäisyys

Siipien limittäiseen etäisyyteen liittyen on tehty useita tutkimuksia. Siipien limittäisyyttä kuvataan yleisesti OR-suhteella (overlap ratio). Siipien limittäisyyteen liittyy myös

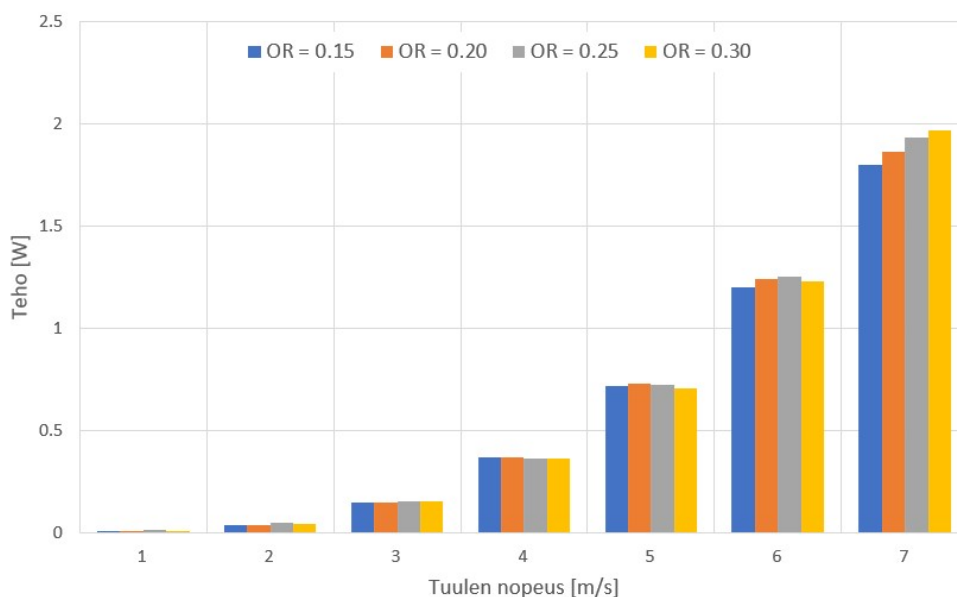
siipien SD-suhde (separation ratio). OR- ja SD-suhteet on määritetty kuvan 2 mukaisesti, jolloin OR-suhde on $CO/2R$ ja SD-suhde $SD/2R$. (Toole et al. 2018).



Kuva 2. Siipien limittäisyyden määritelmä (Toole et al. 2018).

Toole et al. (2018) tutkivat OR- ja SD-suhteiden vaikutusta turbiinin toimintaan tuulitunnelissa, käyttäen turbiinia, jossa siipien sijaintia voitiin muuttaa. OR-suhteen osalta tutkittiin 0.1-0.2:n suhteita, joista paras tehokerroin saavutettiin 0.1:n OR-suhteella. Ongelmana tutkimuksessa oli turbiinin halkaisijan pieneneminen OR-suhdetta kasvatettaessa, jolloin turbiinin poikkipinta-ala ja tuotettu teho pienenivät. Tutkimuksessa pystyttiin kuitenkin muuttamaan SD-suhdetta ongelmitta, ja tulosten perusteella SD- ja OR-suhteiden tulisi olla keskenään samoja. (Toole et al. 2018).

Rus et al. (2018) tutkivat turbiineja, joissa OR-suhteet olivat 0,15; 0,20; 0,25 ja 0,30. Siiven kokoa muutettiin turbiinien kesken, jolloin turbiinien halkaisijat pysyivät samoina. Turbiinien SD-suhde oli 0, kuten useimmissa Savonius turbiineissa. Turbiinien tuottamat tehot eri tuulenopeuksilla on esitetty kuvassa 3. (Rus et al. 2018).

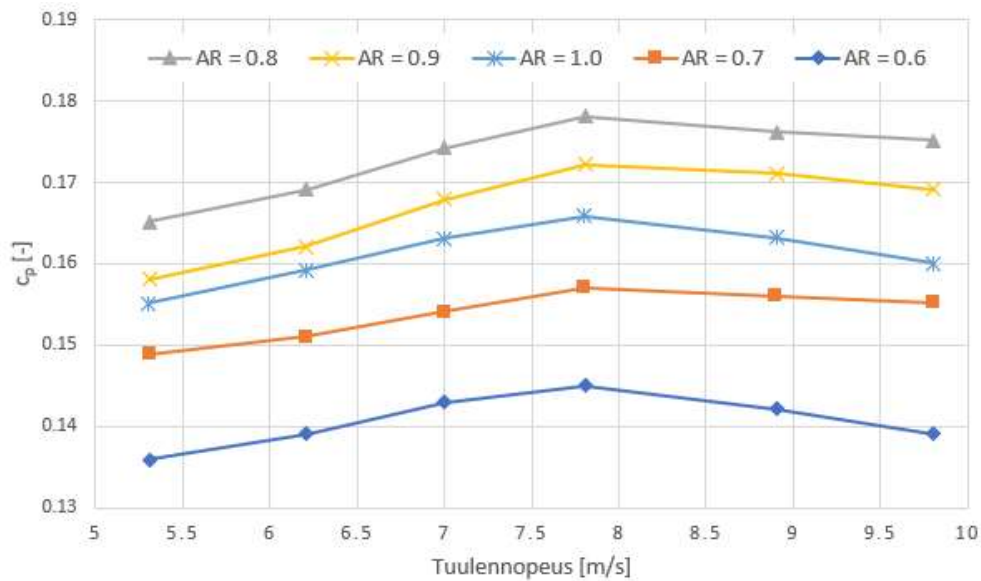


Kuva 3. Savonius-turbiinin teho eri tuulenopeuksilla ja OR-suhteilla (Rus et al. 2018).

Kuvasta 3 nähdään, että optimaalinen OR-suhde riippuu tuulen nopeudesta. Esimerkiksi tuulen nopeuden ollessa 4-5 m/s kaikkein vähiten tehoa tuottaa 0.30 OR-suhteella varustettu turbiini. Tuulen nopeuden ollessa 7 m/s tuottaa 0.30 OR-suhteella varustettu turbiini kuitenkin eniten tehoa. Tuulen nopeuden kasvaessa erot eri turbiinien välillä kasvavat, jolloin 0.30 OR-suhde voidaan todeta parhaimmaksi, ellei sijoituspaikka ole erityisen vähätuulinen. 0.30 OR suhteella saavutetaan keskimäärin 0.29 tehokerroin ja parhaimmillaan 0.30 tehokerroin (Rus et al. 2018).

2.3 Korkeuden ja leveyden suhde

Korkeuden ja leveyden suhde, eli AR-suhde (aspect ratio), on yksi tärkeimpiä Savonius-turbiinin suunnittelun lähtökohtia. AR-suhde lasketaan jakamalla turbiinin korkeus turbiinin halkaisijalla. Saha & Roy (2013a) tutkivat tuulitunnelissa AR-suhteilla 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 ja 1,0 valmistettuja turbiineja. Heidän saamansa tulokset turbiinien tehokertoimille eri tuulenopeuksilla on esitetty kuvassa 4.



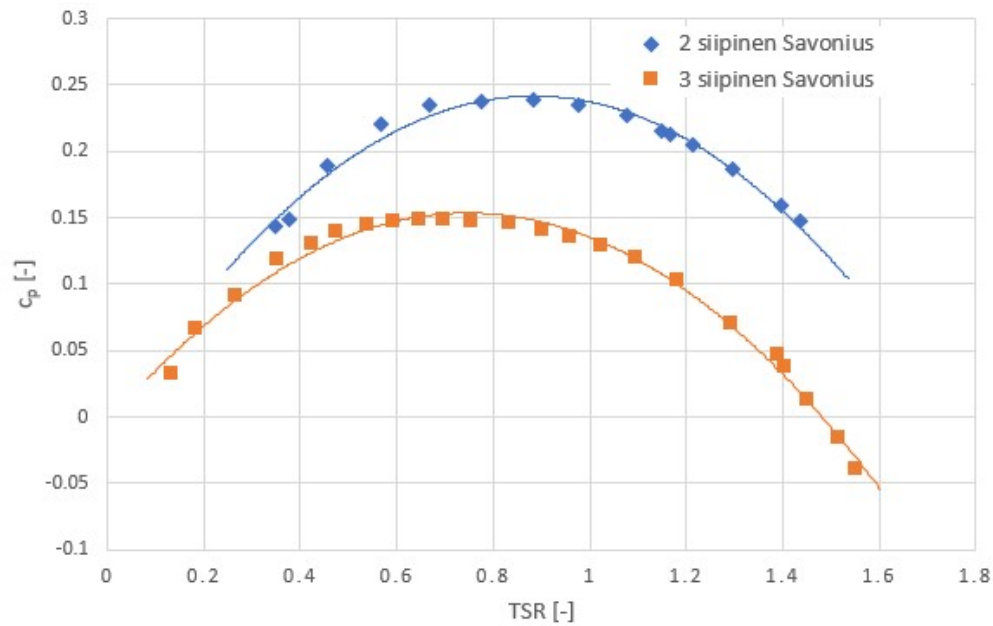
Kuva 4. Tehokertoimen riippuvuus tuulennopeudesta eri AR-suhteilla (Roy & Saha 2013a).

Kuvan 4 tulosten mukaisesti paras tehokerroin saavutetaan AR-suhteella 0,8. Eri AR-suhteiden paremmuusjärjestys säilyy vakiona koko tutkitulla tuulennopeusalueella, ja erot tehokertoimessa eri AR-suhteiden välillä ovat merkittäviä. Todennäköisesti tehokerrointa voitaisiin optimoida vielä lisää toistamalla tutkimus pienemmillä AR-suhteen arvon muutoksilla.

2.4 Siipien lukumäärä

Kahdella siivellä varustetulla Savonius-turbiinilla saavutetaan korkeampi tehokerroin, kuin perinteisen Savonius-turbiinin mallisilla, kolmella tai neljällä siivellä varustetuilla turbiineilla. Kolmella tai neljällä siivellä varustetuilla turbiineilla saavutetaan kuitenkin tasaisempi vääntömomentti pyörähdyksen aikana, ja turbiinin itsekäynnistyvyys on parempi. (Roy & Saha 2013b).

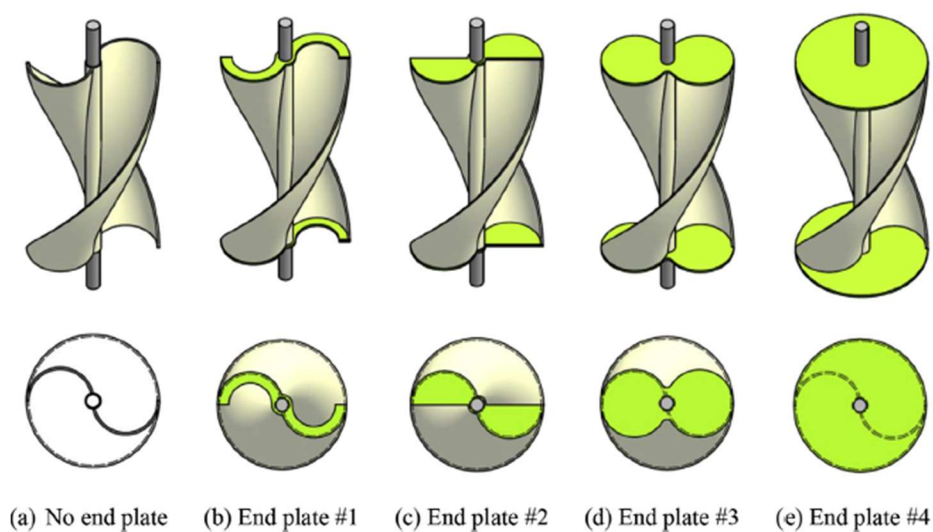
Kaksi- ja kolmisiipisiä turbiineja ovat verranneet keskenään muun muassa Blackwell et al. (1977), joiden saamien tuulitunnelimittausten perusteella kaksisiipisellä roottorilla saadaan noin 60 % korkeampi tehokerroin kuin kolmisiipisellä roottorilla. Mitatut tehokertoimet on esitetty kärkinopeussuhteen funktiona kuvassa 5.



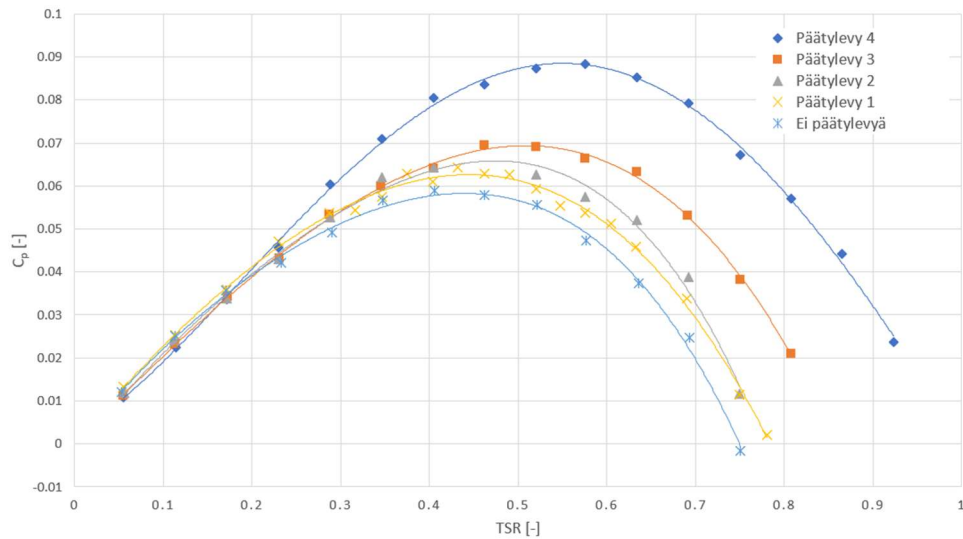
Kuva 5. Kaksi- ja kolmisiipisen Savonius-turbiinin tehokertoimen riippuvuus kärkinopeus-suhteesta (Blackwell et al. 1977).

2.5 Päätylevyjen vaikutus

Jeon et al. (2014) tutkivat tuulitunnelissa erimallisten päätylevyjen vaikutusta kierretyn Savonius-turbiinin toimintaan. Tutkittujen päätylevyjen mallit on esitetty kuvassa 6 ja saavutetut tehokertoimet on esitetty kuvassa 7.



Kuva 6. Tutkimuksessa käytetyt päätylevymallit (Jeon et al. 2014).



Kuva 7. Eri päätylevymalleilla saavutetut turbiinin tehokertoimet (Jeon et al. 2014).

Mittausten perusteella saavutettu tehokerroin on sitä suurempi, mitä suurempi päätylevy on, ja pyöreillä päätylevyillä saavutetaan 36 % suurempi tehokerroin kuin ilman päätylevyjä (Jeon et al. 2014). Vastaaviin tuloksiin on päästy myös perinteisellä Savonius-turbiinilla, jolle suositellaan yleisesti pyöreää päätylevyä halkaisijaltaan 1.1 kertaa turbiinin halkaisija (Akwa et al. 2011).

2.6 Savonius-turbiinin optimaaliset parametrit

Savonius-turbiinin suunnitteluparametrien optimoinnin tuloksena on saavutettu yleiset lähtöarvot turbiinin mitoitukseen. Edellä mainittujen tutkimusten perusteella saavutetut parametrit ovat koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Savonius-turbiinin optimaaliset suunnitteluparametrit.

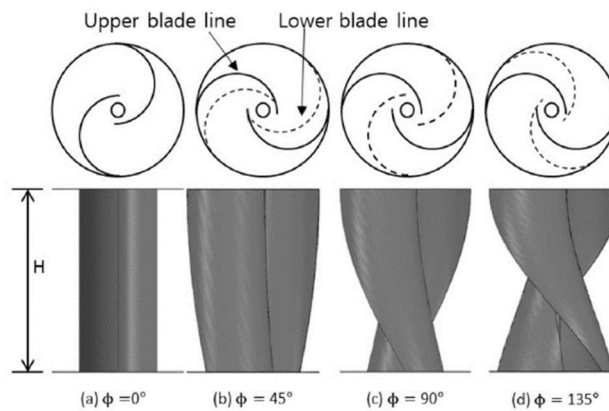
Suunnitteluparametri	Optimaalinen arvo	Lähde
Siipikaaren kulma	170 (TSR < 1,2) 160 (TSR > 1,2)	Zhaoyong & Wenlong 2014
OR-suhde	0,3	Rus et al. 2018
SD-suhde	Sama kuin käytetty OR-suhde	Toole et al. 2018
Korkeuden ja leveyden suhde (AR)	0,8	Roy & Saha 2013a
Siipien lukumäärä	2	Roy & Saha 2013b
Päätylevy	Pyöreä, 1,1-D	Akwa et al. 2011

3 SIIPIPROFIILIN JA TURBIININ PARANTAMINEN

Perinteisen Savonius-turbiinin parametreja on optimoitu useissa eri tutkimuksissa, eikä parametreja lisää optimoimalla ole odotettavissa suuria parannuksia turbiinin toimintaan. Turbiinin toiminnan parantamiseksi on kuitenkin esitetty useita innovatiivisia menetelmiä, joissa turbiinin rakennetta tai siipiprofiilia muutetaan merkittävästi. Tässä kappaleessa esitetään viimeaikaiseen tutkimukseen pohjautuen innovatiivisia ja lupaavia menetelmiä ja käydään läpi niillä saavutettavia parannuksia turbiinin toimintaan.

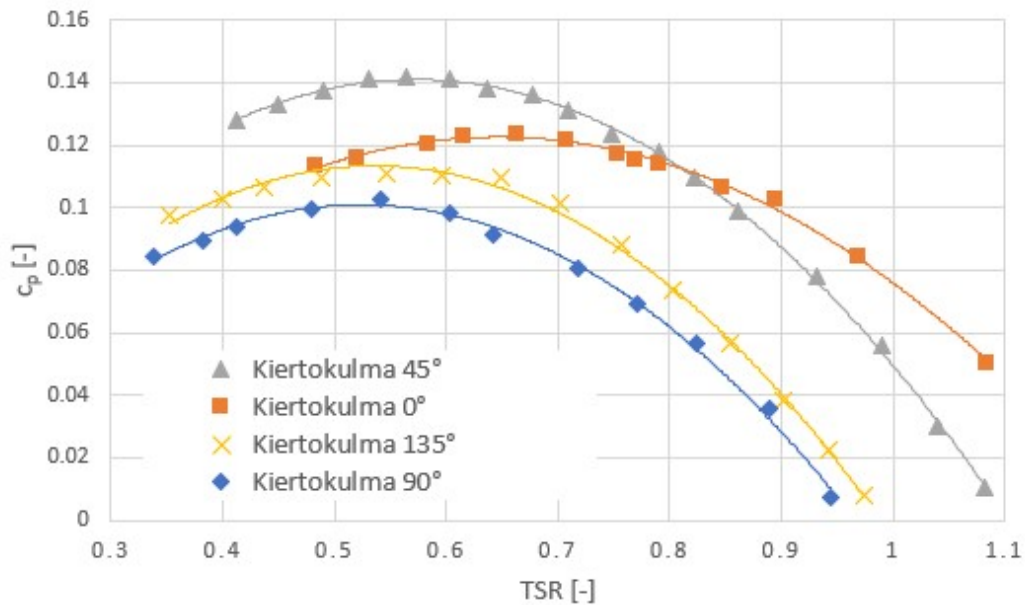
3.1 Kierretty Savonius-turbiini

Yleinen Savonius-turbiinin variaatio on pyörimisakselinsa ympäri korkkiruuvimaisesti kierretty turbiini. Lee et al. (2015) vertasivat perinteistä kiertämätöntä turbiinia ja 45° , 90° ja 135° kulmilla kierrettyjä turbiineja keskenään sekä tuulitunnelissa tehtyjen mittausten perusteella, että CFD-laskentaa käyttäen. Tutkittujen turbiinien rakenteita on havainnollistettu kuvassa 8.



Kuva 8. Kierretty Savonius-turbiini (Lee et al. 2015).

Savonius-turbiinin tuottama teho vaihtelee turbiinin pyörähdyksen aikana siipien asennon muuttuessa suhteessa tuulen suuntaan. Tutkituilla kolmella eri kulmassa kierretyillä turbiineilla tuotettu teho on sitä tasaisempaa, mitä suurempi kiertokulma on. 135° asteen kulmassa kierretyillä turbiinilla päästään kokonaan eroon negatiivisesta vääntömomentista turbiinin epäsuotuisessa asennossa. Turbiinin kiertäminen vaikuttaa myös merkittävästi turbiinin tehokertoimeen, joka on esitetty kuvassa 9. (Lee et al. 2015).

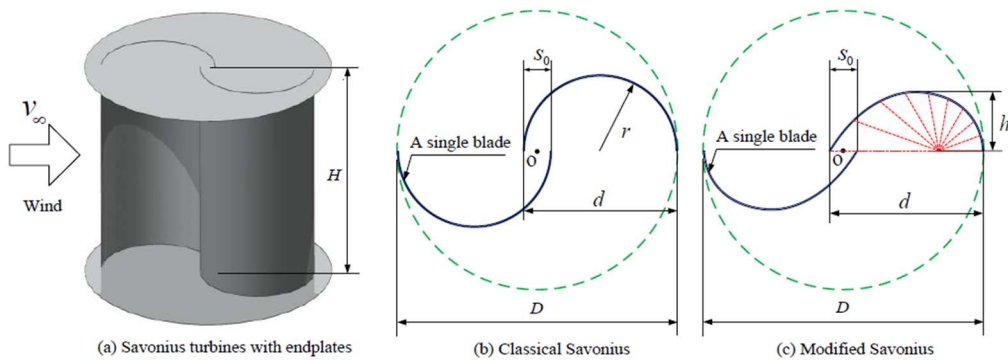


Kuva 9. Kierrettyjen turbiinien tehokertoimet kärkinopeussuhteen funktiona (Lee et al. 2015).

Kuvassa 9 esitetyistä arvoista voidaan havaita, että suurin tehokerroin saadaan 45 asteen kulmassa kierretyllä turbiinilla. Tehokertoimen maksimi-arvo saavutetaan pienemmällä kärkinopeussuhteella, kuin kiertämättömällä turbiinilla. Kärkinopeussuhteen kasvaessa yli 0.8:aan saavutetaan kiertämättömällä turbiinilla suurin tehokerroin. Tasaisimman tehokertoimen tuottavalla 135 asteen kulmassa kierretyllä turbiinilla saavutettava tehokerroin jää vasta kolmannelle sijalle ollen maksimi-arvoltaan noin 10 % matalampi kuin kiertämättömällä turbiinilla ja 22 % matalampi kuin 45 asteen kulmassa kierretyllä turbiinilla.

3.2 Koukun muotoiset siivet

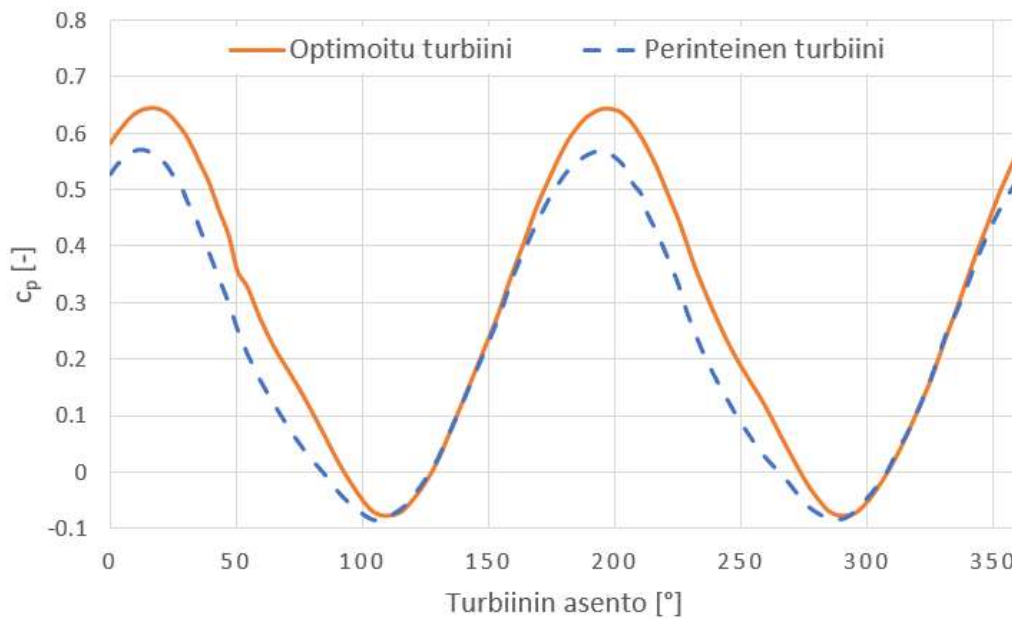
Perinteisen Savonius-turbiinin profiili muodostuu kahdesta tasaisella säteellä taivutetusta siivestä. Turbiinin hyötysuhdetta voidaan kuitenkin parantaa ja painoa pienentää muuttamalla siipiprofiilia hieman koukkumaiseksi, kuten kuvassa 10 on esitetty. (Baoshou et al. 2016).



Kuva 10. Perinteinen ja koukun muotoisilla siivillä varustettu Savonius-turbiini (Baoshou et al. 2016).

Tutkimuksessa määritettiin siipiprofiili hyödyntäen polaarikoordinaatistoa. Optimoinnissa kuitenkin käytettiin toisen asteen polynomiyhtälöä, jolla saatiin polaarikoordinaatiston säteen pituus. Kaikki muut parametrit, kuten siiven pituus d , turbiinin korkeus H , halkaisija D ja siipien limittäinen etäisyys S_0 pidettiin samana. Hyötysuhde laskettiin käyttäen CFD-analyysiä ja 7 m/s tuulenopecta. CFD-mallin paikkansa pitävyys varmistettiin vertaamalla muihin vastaaviin tutkimuksiin. (Baoshou et al. 2016).

Tutkimuksessa analysoitiin 61 eri mallista siipeä, ja parhaimmalla profiililla tehokerroin parani verrokkiarvosta 0,247 arvoon 0,262 ja siiven paino laski 17.9 % (Baoshou et al. 2016). Vaikka optimoidulla profiililla saavutettiin keskimäärin perinteistä turbiinia suurempi tehokerroin, jäi tehokerroin pienimmillään negatiiviseksi perinteisen Savonius-turbiinin tavoin. Tämän takia koukun muotoiset siivet eivät ratkaise turbiinin itsekäynnistyvyysongelmaa. Tehokertoimen vaihtelu turbiinin pyörähdyksen aikana on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Tehokerroin turbiinin asennon funktiona perinteiselle ja koukun muotoisilla siivillä varustetulle Savonius-turbiinille (Baoshou et al. 2016).

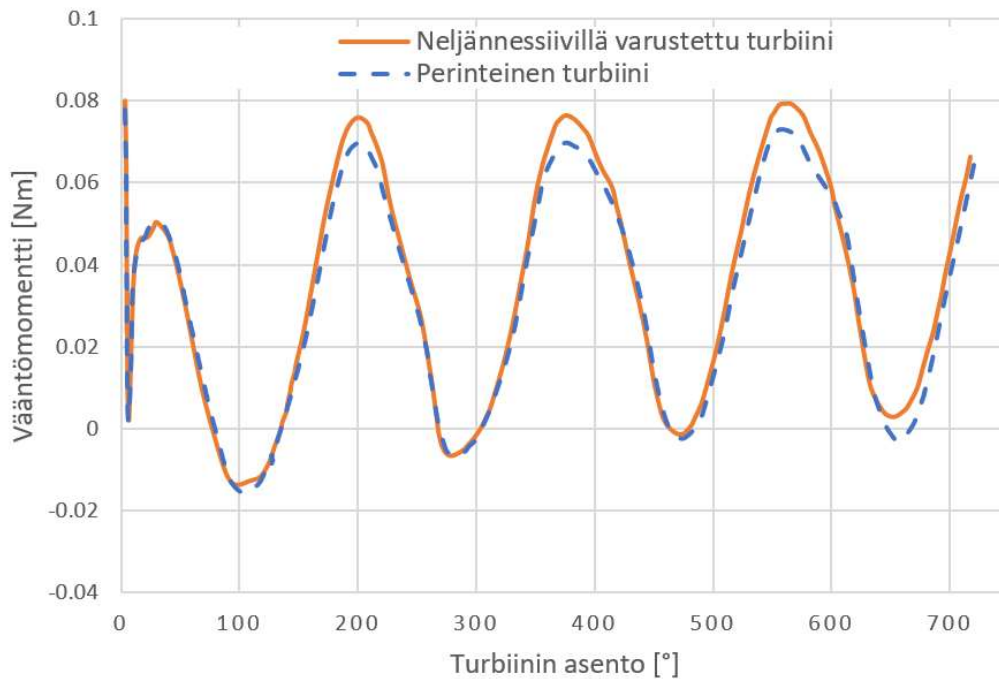
3.3 Neljännessiipien lisäys turbiiniin

Edellä esitetyn koukkumaisen siiprofiilin lisäksi toinen yksinkertainen tapa nostaa Savonius-turbiinin hyötysuhdetta on lisätä neljännessiipiä varsinaisten siipien ulommaisten puoliskojen sisäpuolelle, kuten kuvassa 12 on esitetty (Sharma & Sharma 2016).



Kuva 12. Neljännessiivillä varustettu Savonius-turbiini (Sharma & Sharma 2016).

Neljännessiipien lisäyksen vaikutusta tutkittiin CFD-menetelmällä eri virtausnopeuksilla, joiden arvot olivat 6 m/s ja 10,17 m/s välillä. Virtausnopeuden ollessa 8,23 m/s saavutettiin suurin tehokerroin sekä perinteisellä, että neljännessiivillä varustetulla roottorilla. Tällöin tehokertoimiksi saatiin 0.2081 ja 0,2266, jolloin neljännessiivillä varustetulla roottorilla saavutettiin 8.89 %:n nousu tehokertoimessa. Suurin tehokertoimen nousu turbiinien välillä, 13,69 %:a, saavutettiin virtausnopeuden ollessa 9,21 m/s. Kuvassa 13 on esitetty vääntömomentin riippuvuus roottorin asennosta virtausnopeudella 8,23 m/s. (Sharma & Sharma 2016).

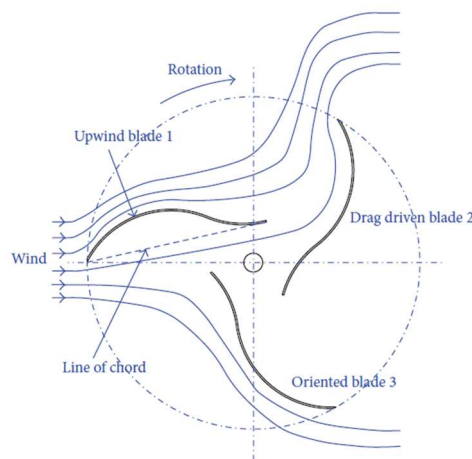


Kuva 13. Vääntömomentti turbiinin asennon funktiona virtausnopeudella 8,23 m/s (Sharma & Sharma 2016).

Kuvasta 13 nähdään, että vääntömomentti paranee erityisesti vääntömomentin maksimi-arvoilla, mutta myös negatiivisilla vääntömomentin arvoilla on mahdollista saavuttaa pieniä parannuksia. Neljännessiipien lisäyksellä ei kuitenkaan pystytä ratkaisemaan itsekäynnistymisongelmaa roottorin pysähtyessä epäsuotuisaan asentoon.

3.4 Kolmisiipinen S-siivillä varustettu turbiini

Yhtenä syynä Savonius-turbiinin heikkoon tehokertoimeen pidetään virtaushäviöitä turbiinin keskiosassa. Virtaushäviöiden pienentämiseksi on esitetty kuvan 14 mukaista turbiinia, josta alkuperäisessä lähteessä käytetään nimitystä ”Fish-ridged wind rotor”. (Song et al. 2016a).

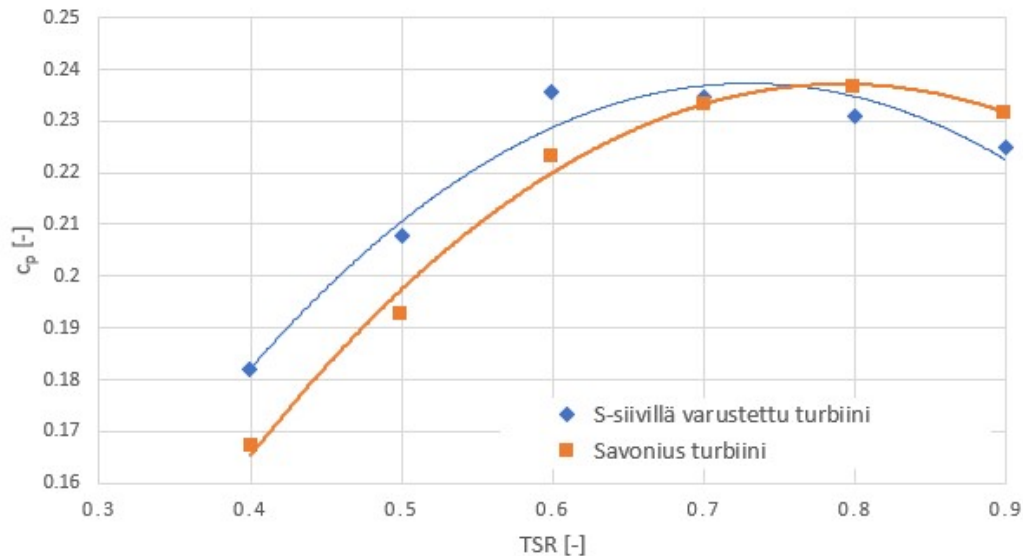


Kuva 14. Kolmilapainen S-siivillä varustettu turbiini (Song et al. 2016a).

Kuvan 14 turbiinissa siiven taivutus S-kirjaimen muotoon auttaa tasoittamaan virtauskenttää turbiinin keskiosassa. Esitetyssä asennossa virtauksen suunnassa oleva siipi (blade 1) toimii tuulen ohjaimena. Kuten perinteisessäkin turbiinissa, etenävä siipi (blade 2) vastustaa virtausta saaden turbiinin pyörimään. Palaava siipi (blade 3) on loivemmassa kulmassa virtaukseen nähden vähentäen virtausvastusta verrattuna perinteiseen turbiiniin. (Song et al. 2016b).

S-siivillä varustettua turbiinia on verrattu CFD-analyysillä perinteiseen Savonius turbiiniin kärkinopeussuhteen ollessa 0,4-0,9. Tulosten perusteella S-siivillä varustettu turbiini saavuttaa suuremman tehokertoimen ja vääntömomentin, kun kärkinopeussuhde on alle 0,7. S-siivillä varustetun roottorin maksimitehokerroin 0,2357 saavutetaan kärkinopeussuhteen ollessa 0,6 ja perinteisen turbiinin maksimitehokerroin 0,2312 saavutetaan arvolla 0,8. S-siivillä varustetulla roottorilla saavutetaan positiivinen

vääntömomenti turbiinin kaikissa asennoissa (Song et al. 2016c). Tehokertoimen riippuvuus kärkinopeussuhteesta on esitetty kuvassa 15. (Song et al. 2017).



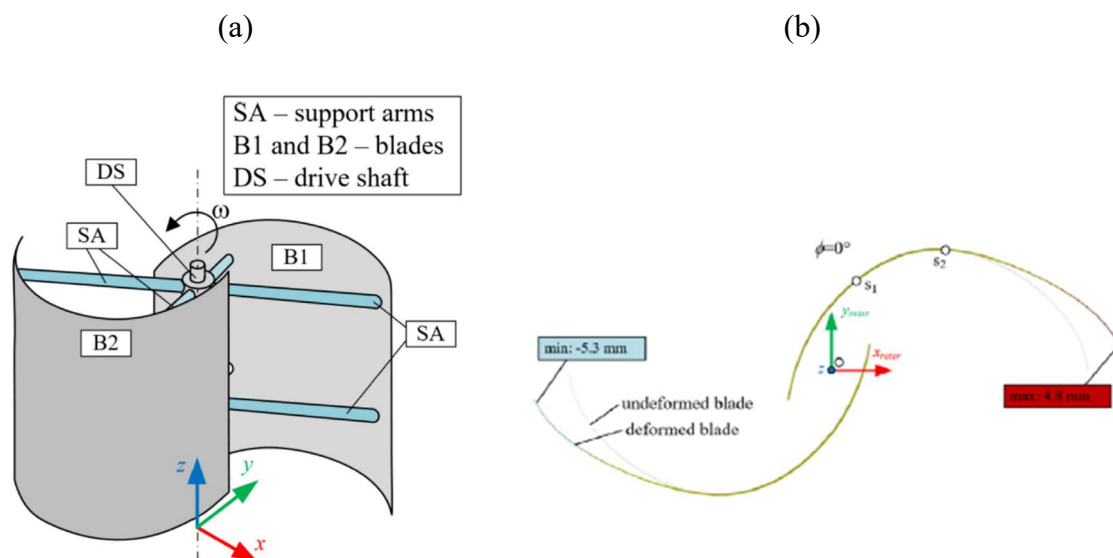
Kuva 15. Optimoidun ja perinteisen Savonius-turbiinin tehokertoimen riippuvuus kärkinopeussuhteesta (Song et al. 2017).

3.5 Optimoitu ja taipuvasiipinen turbiini

Perinteisessä Savonius-turbiinissa etenevän ja palaavan siiven pinta-alat ovat yhtä suuria. Yksi vaihtoehto tehokertoimen kasvattamiseksi on kasvattaa siiven pinta-alaa siiven edetessä ja pienentää pinta-alaa siiven palatessa. Olettaen, ettei siipiprofiilin muutos merkittävästi muuta hyötysuhdetta, saadaan etenevän siiven tuottamaa tehoa kasvatettua ja vastaavasti palaavan siiven virtausvastusta pienennettyä.

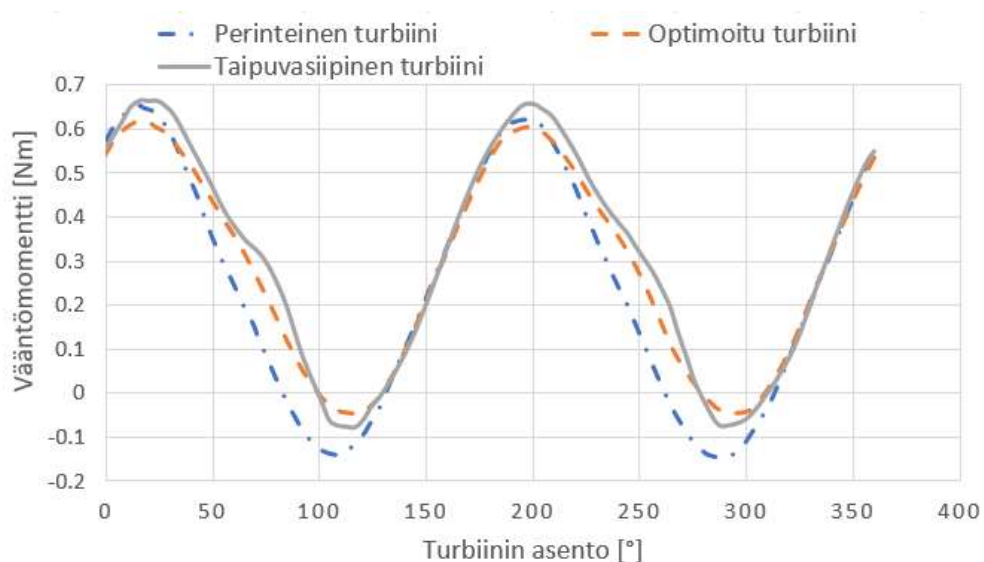
Menetelmään perustuen on esitetty erilaisia menetelmiä siiven pinta-alan muuttamiseksi. Marinic-Kragic et al. (2018) ovat esittäneet turbiinin, jossa siivet on yhdistetty toisiinsa tukivarsilla. Suunnittelun lähtökohtana oli perinteinen Savonius turbiini, jossa OR-suhde oli 0. Turbiinin muotoa optimoitiin CFD-analyysiin perustuvalla algoritmilla, jolla saavutettiin 18% parannus tehokertoimeen. Edelleen käyttämällä taipuvia siipiä saatiin tehokerrointa parannettua 8% verrattuna jäykällä siivillä varustettuun, mutta optimoituun

turbiiniin. Taipuvasiipisen turbiinin rakenne ja optimoitu siipiprofiili on esitetty kuvassa 16. (Marinic-Kragic et al. 2018).



Kuva 16: (a) Taipuvasiipisen Savonius-turbiinin rakenne. (b) Taipuvasiipisen Savonius-turbiinin siipiprofiili. (Marinic-Kragic et al. 2018).

Turbiinin vääntömomentti turbiinin asennon funktiona on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Perinteisen ja optimoitujen Savonius-turbiinien vääntömomentti turbiinin asennon funktiona (Marinic-Kragic et al. 2018).

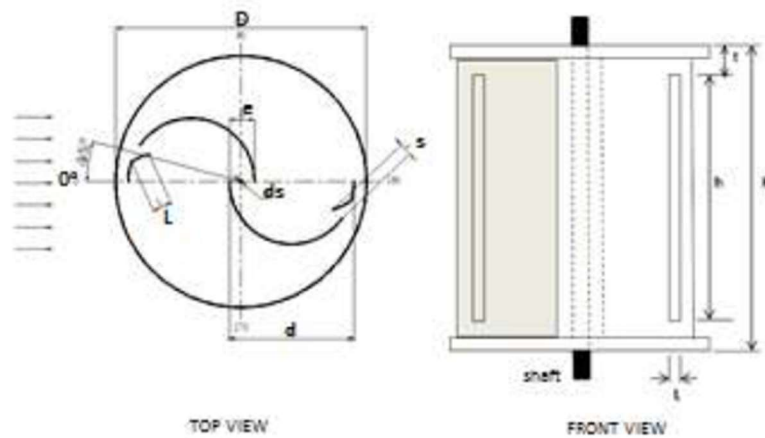
Vertaamalla taipuvasiipistä turbiinia optimoituun, mutta jäykkäsiipiseen turbiiniin, havaitaan tehokertoimen olevan suurempi maksimiarvojen kohdalla, sekä käyrän laskevan osan keskivaiheessa. Minimiarvot puolestaan ovat hieman jäykkäsiipistä turbiinia huonompia. Negatiiviset tehokertoimen arvot eivät kuitenkaan sijaitse laajemmalla kulma-alueella jäykkäsiipiseen turbiinin verrattuna. Tutkimuksessa myös huomattiin siipiprofiilin, ja siten tehokertoimen vaihtelevan sekä kärkinopeussuhteen, että pyörimisnopeuden vaikutuksesta, kun perinteisessä Savonius turbiinissa lähinnä kärkinopeussuhde vaikuttaa tehokertoimeen (Marinic-Kragic et al. 2018).

Taipuvasiipinen turbiini asettaa haasteita muun muassa materiaalien kestävyydelle. Tutkimuksessa tehdyillä oletuksilla kärkinopeussuhteella 0,9 laskettu suurin sallittu pyörimisnopeus on 12 m/s. Tämä aiheuttaa vaatimuksen pyörimisnopeutta rajoittavalle järjestelmälle lisäten tuulivoimalan monimutkaisuutta, kokoa ja hintaa, sekä heikentäen toimintavarmuutta. Materiaalin jännitystä voitaisiin kuitenkin tulevaisuudessa pienentää optimoimalla turbiinin muotoa. (Marinic-Kragic et al. 2018).

Taipuvasiipinen turbiini voi olla haastava myös arktisissa olosuhteissa. Esitetyssä turbiinissa tukivarret kulkevat keskikohdassa kapean aukon läpi, jossa jään tai lumen kertyminen voi estää tukivarsien liikkumisen.

3.6 Venttiilillä varustettu siipi

Savonius-turbiinin vääntömomentti saa negatiivisen arvon, kun tuuli osuu pelkästään siiven ulkokaarteeseen puolelle. Hariyanto et al. (2016) lisäsivät siipeen passiivisen venttiilin 15 asteen päähän siiven ulkoreunasta. Venttiilin lisäys mahdollistaa ilmavirran kulun siiven ulkokaarelta turbiinin sisäpuolelle parantaen turbiinin tehokkuutta. Turbiinin epäsuotuisa asento ja venttiilin sijainti on esitetty kuvassa 18. (Hariyanto et al. 2016).



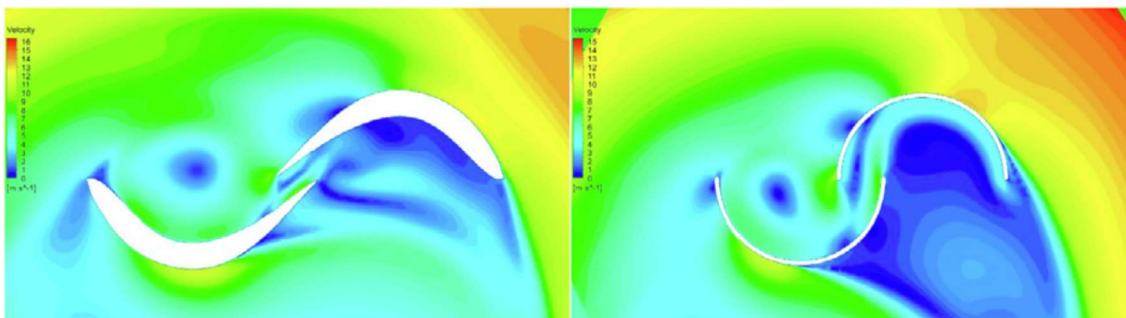
Kuva 18. Venttiileillä varustettu Savonius-turbiini epäsuotuisimmassa asennossa tuulensuuntaan nähden (Hariyanto et al. 2016).

Hariyanto et al. (2016) testasivat tuulitunnelissa kuutta erisuuruksilla venttiileillä varustettua turbiinia. Turbiineja testattiin tuulennopeuksilla 1-7 m/s ja tuulen nopeuden ollessa 5 m/s saavutettiin parhaimmillaan 25% parempi tehokerroin, kuin ilman venttiilejä olevalla turbiinilla. Turbiinin mainitaan kehittävän työtä myös perinteiselle turbiinille epäsuotuisassa asennossa, joten turbiinin pitäisi lähteä käyntiin kaikissa asennoissa. (Hariyanto et al. 2016).

Hariyanto et al. (2016) mainitsevat turbiinien olevan venttiilien lisäyksestä huolimatta yksinkertaisia, halpoja ja helppoja tehdä. Venttiilit ovat rakenteeltaan kiinteitä, jolloin ne eivät lisää turbiiniin liikkuvia osia ja turbiini voidaan perinteisen Savonius-turbiinin tavoin sijoittaa haastaviin olosuhteisiin. Turbiinin luotettavuutta lisää itsekäynnistyvyyden parantuminen.

3.7 Siipiprofiiliin perustuva turbiini

Masdari et al. (2019) optimoivat siiven muotoa käyttäen automaattista algoritmia ja CFD-menetelmää. Siipiprofiiliin perustuvilla optimoiduilla siivillä saavutettiin 27 % parempi tehokerroin, kuin perinteisellä Savonius-turbiinilla. Optimaalinen siipiprofiili ja ilmavirran nopeuskenttä siiven läheisyydessä on esitetty kuvassa 19. (Masdari et al. 2019).



Kuva 19. Ilmavirran nopeuskenttä optimaalisen siipiprofiilin ja perinteisen Savonius-turbiinin ympärillä kärkinopeussuhteen arvolla 0.7 (Masdari et al. 2019).

3.8 Parannusmenetelmien vertailua

Tässä kappaleessa aiemmin käsitellyissä tutkimuksissa saavutetut tehokertoimen maksimiarvon nousut ja vaikutukset itsekäynnistyvyyteen on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Eri menetelmillä saavutetut tehokertoimen nousut ja vaikutus itsekäynnistyvyyteen.

Menetelmä	Tehokertoimen maksimiarvon lisäys	Itsekäynnistyvyys	Lähde
Kierretty turbiini	14.4 % (45°) / -10 % (135°)	Ei (45°) / Kyllä (135°)	Lee et al. 2015
Koukun muotoiset siivet	6,1 % (CFD)	Ei	Baoshou et al. 2016
Neljännessiipien lisäys	8,9% (CFD)	Ei	Sharma & Sharma 2016
Kolmisiipinen s-siivillä varustettu turbiini	1,9 % (CFD)	Kyllä	Song et al. 2017
Optimoitu turbiini	18 % (CFD)	Parempi	Marinic-Kragic et al. 2018
Optimoitu- ja taipuvasiipinen turbiini	27,4 % (CFD)	Parempi	Marinic-Kragic et al. 2018
Venttiilillä varustettu siipi	25%	Kyllä	Hariyanto et al. 2016
Siipiprofiiliin perustuva turbiini	27 % (CFD)	Ei selviä julkaisusta	Masdari et al. 2019

Siipiprofiilin optimoinnilla saadut tulokset tehokertoimen nousussa vaihtelivat parista prosentista 27 prosenttiin. Suurin siipiprofiilin optimoinnilla saavutettu 27 %:n nousu vaatii kuitenkin turbiinin siipien valmistamisen siipiprofiilin muotoiseksi, joka hankaloittaa turbiinin valmistusprosessia. Perinteisesti Savonius-turbiinin siivet on valmistettu taivutetusta teräslevystä, joka on mahdollistanut turbiinin erinomaisen

kestävyyden ja halvan valmistusprosessin. Toisaalta pienen kokoluokan Savonius-turbiineissa voidaan käyttää valmistukseen esimerkiksi 3D-tulostusta, jolloin monimutkaisetkaan siipiprofiilit eivät ole ongelmallisia.

Kaikkein suurin tehokertoimen nousu saatiin käyttämällä optimoitua siipiprofiilia ja taipuvasiipistä turbiinia. Pelkällä optimoidulla profiililla saavutettiin 18 prosentin parannus, ja taipuvilla siivillä 8 prosentin lisäparannus. Materiaalien kestävyys aiheutti kuitenkin ongelmia tuulenopeuden ollessa yli 12 m/s (Marinic-Kragic et al. 2018). Optimoidulla turbiiniprofiililla saatu 18 prosentin parannus on kuitenkin merkittävä turbiinin tehokertoimen kannalta, eikä se vaadi kuin turbiinin siiven taivutuksen eri muotoon. Sarjatuotannossa turbiinin siiven taivutus voitaisiin hoitaa esimerkiksi prässämällä siipi muottien välissä, eivätkä valmistuskustannukset nousisi merkittävästi. Optimoidulla profiililla saavutettiin myös parempi itsekäynnistyvyys.

Lisäämällä passiiviset venttiilit turbiinin siipiin saavutettiin 25 prosentin nousu tehokertoimessa. Tutkimuksessa käytettiin perinteistä Savonius-turbiinin siipiprofiilia, joten siipiprofiilia optimoimalla saatettaisiin saada vieläkin suurempi nousu tehokertoimessa. Venttiilien lisäys ei merkittävästi nosta turbiinin valmistuskustannuksia, tai heikennä turbiinin muita ominaisuuksia. Lisäksi venttiilien lisäyksellä päästiin kokonaan eroon itsekäynnistyvyysongelmasta. Näistä syistä venttiilien lisäys on erityisen lupaava menetelmä Savonius-turbiinin toiminnan parantamiseen.

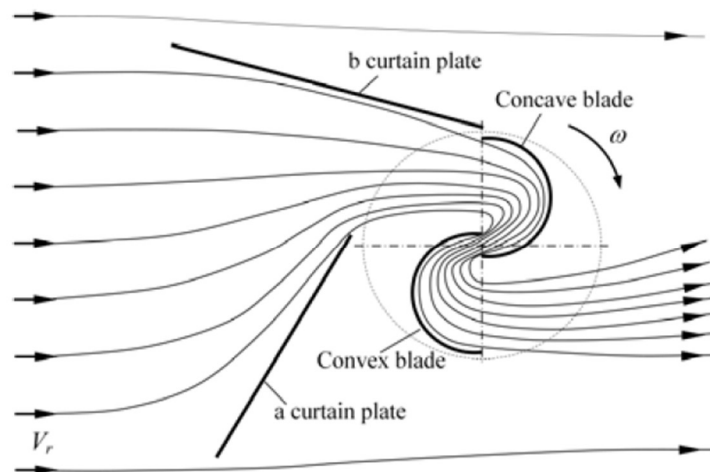
Neljännessiipien lisäyksellä saavutettiin 8,9 prosentin parannus turbiinin tehokertoimeen. Neljännessiipien lisäyksen yhteydessä ei tutkittu siipiprofiilin parantamisen vaikutusta, joten yhdistämällä siipiprofiilin parantaminen ja neljännessiivet voitaisiin mahdollisesti saavuttaa parempi tehokerroin, kuin vain yhdellä edellä mainituista menetelmistä. Neljännessiipien lisäys lisää turbiiniin valmistukseen käytettävän materiaalin määrää ja tuotantovaiheita, lisäten turbiinin valmistuskustannuksia. Lisäksi turbiinin paino kasvaa, eikä itsekäynnistyvyudessa saavutettu merkittävää parannusta.

Kierrettyllä turbiinilla saatiin parannettua joko turbiinin tehokerrointa itsekäynnistyvyuden kustannuksella, tai itsekäynnistyvyyttä tehokertoimen

kustannuksella kiertokulman suuruuden mukaan. Koska turbiinin kiertämisellä ei voida saavuttaa molempia asioita yhtä aikaa, ei turbiinin kiertäminen yksinään ole hyvä parannusmenetelmä. Lisäksi kierretyn turbiinin rakenne ja valmistuskustannukset ovat suorasiipistä turbiinia korkeammat. Optimoiduilla siipiprofiileilla päästiin kuitenkin eroon turbiinin itsekäynnistyvyysongelmista tehokertoimen samalla noustessa, joten yhdistämällä optimoitu siipiprofiili ja pienellä kiertokulmalla kierretty turbiini, voitaisiin saavuttaa vieläkin suurempi tehonlisäys ja pienempi vääntömomentin vaihtelu ilman turbiinin itsekäynnistyvyyden menetystä.

4 VIRTAUKSEN AUGMENTOINTI

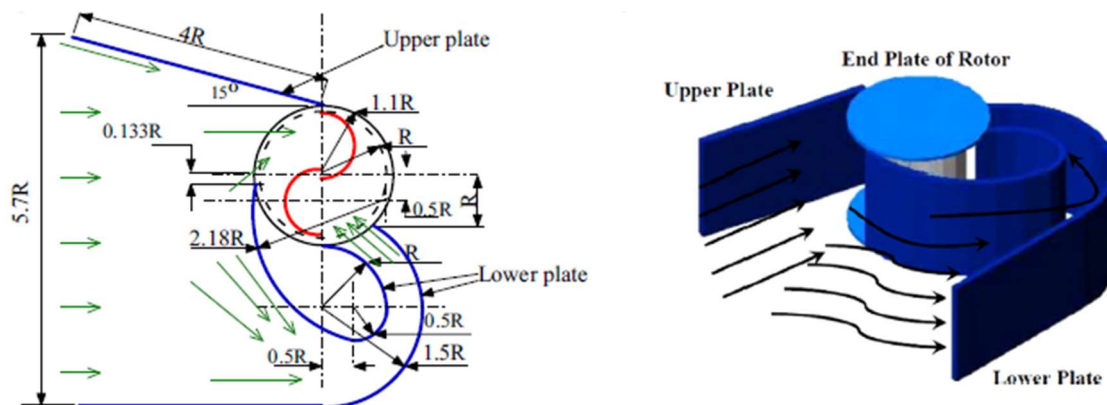
Palaavaan siipeen osuva ilmavirtaus aiheuttaa Savonius-turbiiniin negatiivisen vääntömomentin vähentäen turbiinista saatavaa tehoa. Tehokas keino turbiinin tehokertoimen nostamiseen on ilmavirtauksen ohjaus pois palaavasta siivestä. Yksinkertaisimmallaan virtausta voidaan ohjata verhoamalla roottorin tuulta vasten palaava siipi virtauksen estävällä levyllä. Turbiinin läpi kulkevaa massavirtaa ja siten turbiinin tehoa voidaan lisäksi kasvattaa ohjaamalla virtaus turbiinin etenevään siipeen siiven pinta-alaa suuremmalta alueelta. Kuvan 20 esimerkissä molempia menetelmiä on hyödynnetty turbiinista saatavan tehon kasvattamiseksi. (Altan 2012).



Kuva 20. Savonius-turbiinin virtausta voidaan augmentoida turbiinin eteen asennettavilla levyillä (Altan 2012).

4.1 Virtauksen ohjaus molempiin siipiin

Edellä esitettyssä kuvan 20 esimerkissä turbiinin tehoa nostettiin ohjaamalla etenevään siipeen ilmavirtaus siiven pinta-alaa suuremmalta alueelta ja estämällä virtauksen osuminen palaavaan siipeen. Tavoiteltaessa mahdollisimman hyvää tehokerrointa olisi hyödyksi, jos ilmavirtausta voitaisiin ohjata myös palaavan siiven kuperalle puolelle. El-Askary et al. (2015) ovat suunnitelleet virtauksen augmentointiin ohjuriin, jossa hyödynnetään tätä havaintoa. Kyseinen ohjuri on esitetty kuvassa 21.

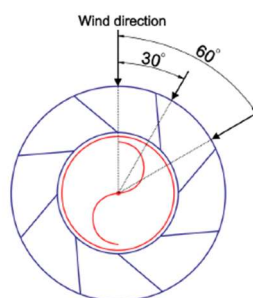


Kuva 21. Ilmavirran ohjaus sekä etenevään, että palaavaan siipeen (El-Askary W.A. et al. 2015).

CFD-analyysin perusteella kuvan 21 ohjurilla on mahdollista saavuttaa jopa 0,52:n tehokerroin. Lisäksi ohjurilla saavutetaan laajempi kärkinopeussuhteen toiminta-alue ja päästään eroon negatiivisesta pyörimismomentista. Ohjurin haittapuolina mainitaan turbiinin taakse syntyvät epäsymmetriset aallot, jotka aiheuttavat mekaanisia rasituksia ja kovaa ääntä. (El-Askary et al. 2015).

4.2 Tuulensuunnasta riippumaton ohjuri

Edellä esitetyissä augmentointimenetelmissä esiintyy ongelmia tuulen suunnan vaihdellessa. Ongelman ratkaisemiseksi on esitetty ohjureita, jotka ottavat huomioon tuulen suunnan muuttumisen. Yksi usein tutkittu kuvan 22 mukainen augmentointimenetelmä koostuu useista turbiinin ympärille viistoon asetetuista levyistä.

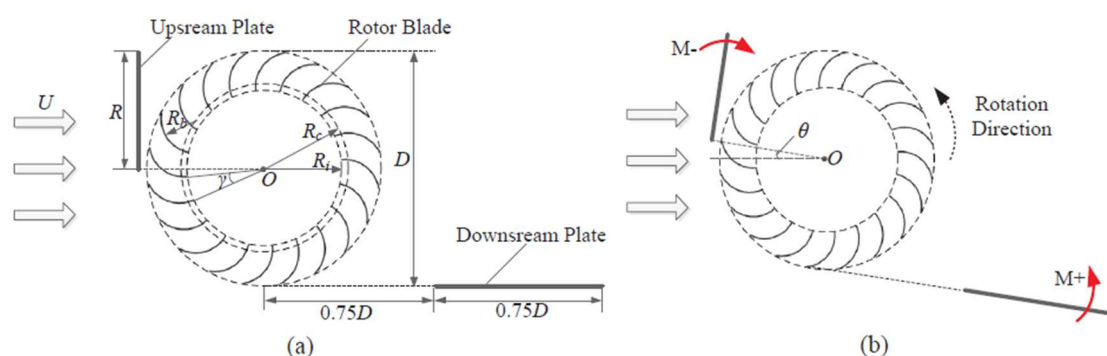


Kuva 10 Kaikilla tuulensuunnilla toimiva ohjuri (Prija et al. 2018).

Kuvan 22 mukaista ohjuria tutkittiin turbulentsissa tuulitunnelissa, joka pienensi turbiinin tehokerrointa verrattuna ideaalisiin olosuhteisiin. Parhaimmillaan ohjuri toimi tuulen suunnan ollessa 60° kulmasta, jolloin tehokerroin parani 41,34%. Tuulen ollessa 30° kulmasta saavutettiin myös merkittävä parannus hyötysuhteeseen, mutta tuulensuunnan ollessa 0° ei augmentointimenetelmä tuonut merkittävää parannusta turbiinin toimintaan. Vaikka tavoitteena on ohjurin toimiminen kaikilla tuulensuunnilla, vaikuttaa tuulensuunta turbiiniin osuvan ilmavirtauksen nopeuteen johtuen ohjauslevyjen muuttuvasta sijainnista turbiinin siipien suhteen. Huonoimmassakin tapauksessa ohjurilla saavutettiin 0,66 prosentin parannus tehokertoimeen ja optimoimalla ohjurin geometriaa on tulevaisuudessa mahdollista saavuttaa parempia tuloksia. (Prija et al. 2018).

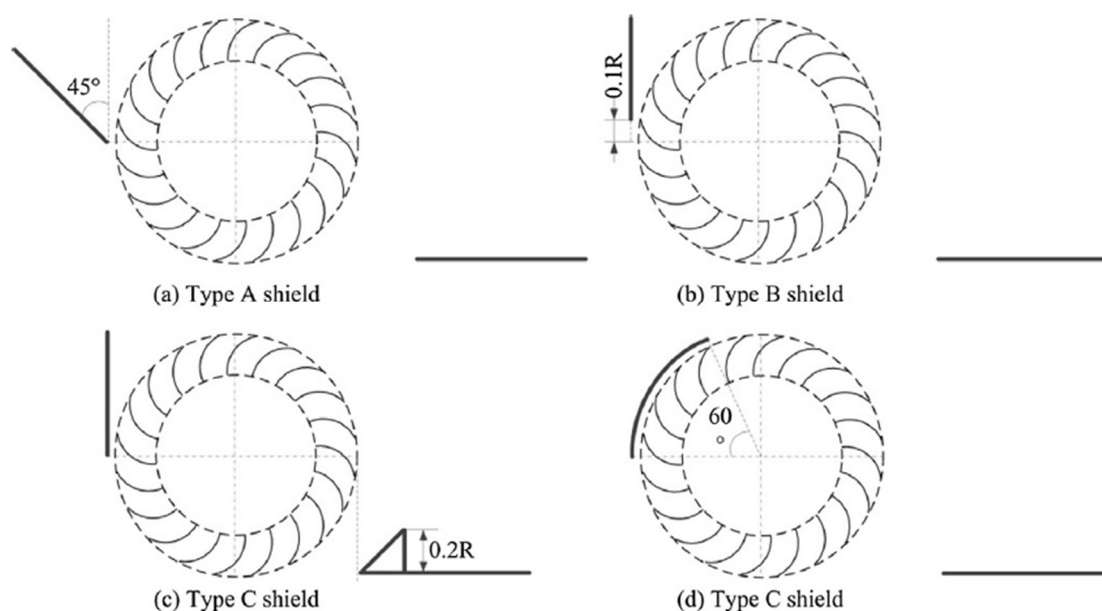
4.3 Automaattisesti tuulensuunnan mukaan kääntyvät ohjauslevyt

Augmentointiin on kehitetty myös augmentointimenetelmiä, jotka muuttavat automaattisesti suuntaansa tuulen suunnan muuttuessa. Yksi lupaavista menetelmistä koostuu kahdesta ohjauslevystä, joista ensimmäinen sijaitsee turbiinin palaavien siipien edessä ja toinen turbiinin takapuolella turbiinin etenevien siipien puolella. Molempiin ohjaussiipiin kohdistuu tuulen vaikutuksesta saman suuruinen, mutta eri suuntaan vaikuttava momentti, jonka ansiosta ohjaussiivet ovat aina samassa kulmassa tuulen suuntaan nähden. Automaattisesti kääntyvien ohjauslevyjen mahdollinen sijainti on esitetty kuvassa 23. (Wenlong et al. 2019).



Kuva 23. Automaattisesti kääntyvät ohjauslevyt (Wenlong et al. 2019).

Wenlong et al. (2019) käyttivät CFD-laskentaa ohjauslevyjen vaikutuksen tutkimiseen. Savonius-turbiini korvattiin Banki-turbiinilla. Banki-turbiinissa vääntömomentti on tasainen johtuen siipien suuresta lukumäärästä, joten muutoksia turbiinin toiminnassa voidaan tarkkailla paremmin. Tehokertoimessa saavutettiin merkittäviä parannuksia koko tutkitulla kärkinopeussuhteella 0,2-0,7. Parhaimmillaan tehokerroin nousi 37,34 prosenttia. Alkuperäisen augmentointimenetelmän lisäksi päätettiin tutkia eri mallisten ohjauslevyjen vaikutusta turbiinin toimintaan. Tutkitut augmentointimenetelmät on esitetty kuvassa 24. (Wenlong et al. 2019).



Kuva 24. Tutkittujen ohjauslevyjen rakenne ja sijainti turbiiniin nähden (Wenlong et al. 2019).

Kuvan menetelmiä tarkasteltiin kärkinopeussuhteella 0,5. Tarkastelun tulokset on esitetty taulukossa 3.

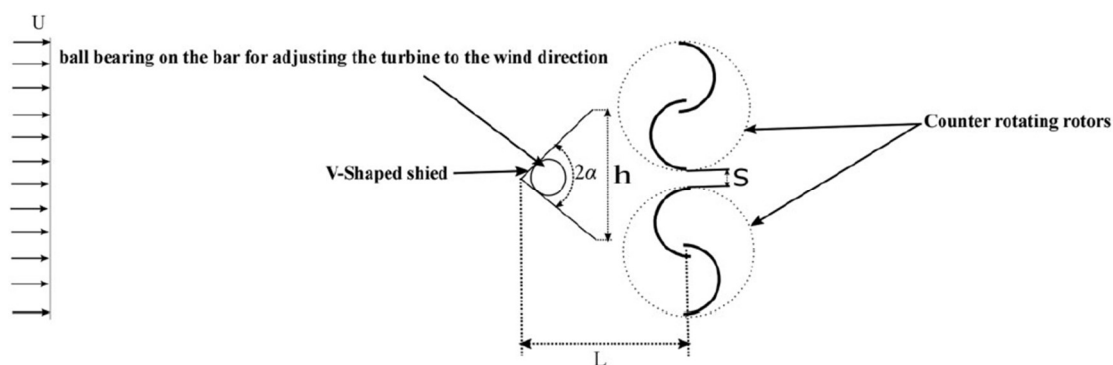
Taulukko 3. Tutkittujen ohjainlevytyyppien vaikutus tehokertoimeen (Wenlong et al. 2019).

Ohjainlevyn tyyppi	Tehokertoimen muutos [%]
Alkuperäinen	37,34
A	46,32
B	39,37
C	38,33
D	16,92

Taulukoiduista arvoista nähdään, että tyypin A ohjainlevyillä saavutettiin suurin tehokerroin. Tyypin A turbiinin edessä oleva ohjainlevy on 45 asteen kulmassa ohjaten turbiinin läpi enemmän massavirtaa, kuin muut tarkastellut mallit. Tyypin A ohjainlevyllä varustetun turbiinin tuottama vääntömomentti kuitenkin vaihtelee syklisesti, kun muilla malleilla saavutetaan ajan funktiona melko tasainen vääntömomentti. Tutkimuksessa saatujen tulosten pohjalta voitaisiin tulevaisuudessa kehittää entistä tehokkaampia augmentointimenetelmiä ja vääntömomentin vaihtelua tyypin A mukaisilla augmentointimenetelmillä voitaisiin vähentää. (Wenlong et al. 2019).

4.4 Tuulensuunnan mukaan kääntyvä turbiinikokonaisuus

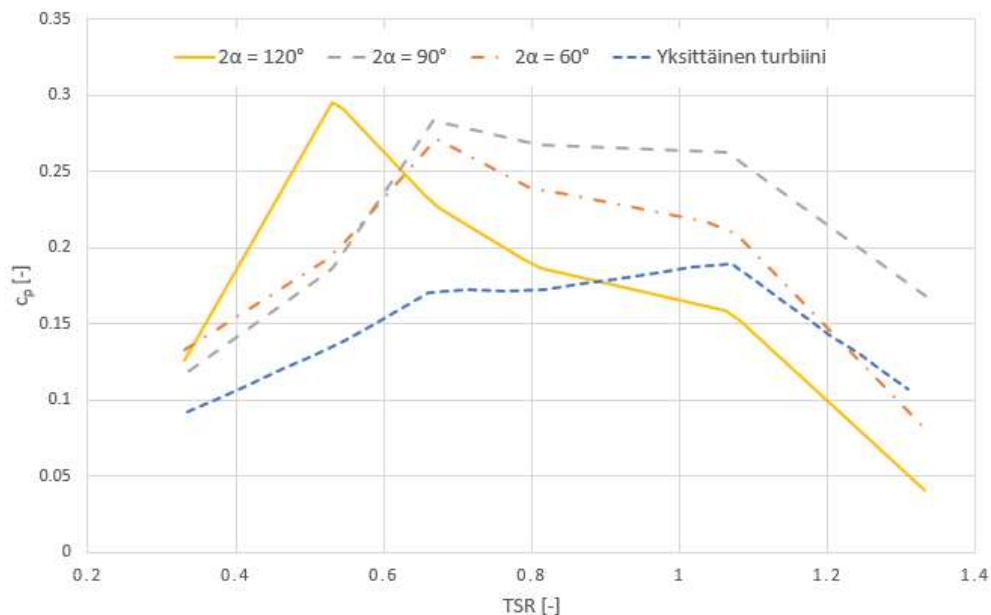
Etemadeasl et al. (2018) ovat esittäneet tuulensuunnasta riippumattoman augmentointimenetelmän, joka koostuu V-mallisesta ohjurista ja sen takana sijaitsevista kahdesta eri suuntaan pyörivistä turbiineista. Turbiinikokonaisuus on laakeroitu ohjurin kohdalta, ja se pääsee pyörimään vapaasti tuulen suunnan vaihtuessa. Turbiinikokonaisuus on esitetty kuvassa 25. (Etemadeasl et al. 2018).



Kuva 25. Automaattisesti kääntyvän turbiinikokonaisuuden rakenne (Etemadeasl et al. 2018).

CFD-laskennan perusteella turbiinikokonaisuutta hyödyntämällä turbiinilla voidaan saavuttaa parhaimmillaan 0.296 tehokerroin, joka on 80 % suurempi kuin augmentoimattomalla turbiinilla. Etemadeasl et al. tutkivat myös V-ohjurin kulman vaikutusta toistamalla laskennat 60, 90 ja 120 asteen kulmilla. Paras tehokerroin

saavutettiin 90 asteen kulmalla. Tehokertoimet nopeussuhteen funktiona on esitetty kuvassa 26. (Etemadeasl et al. 2018).

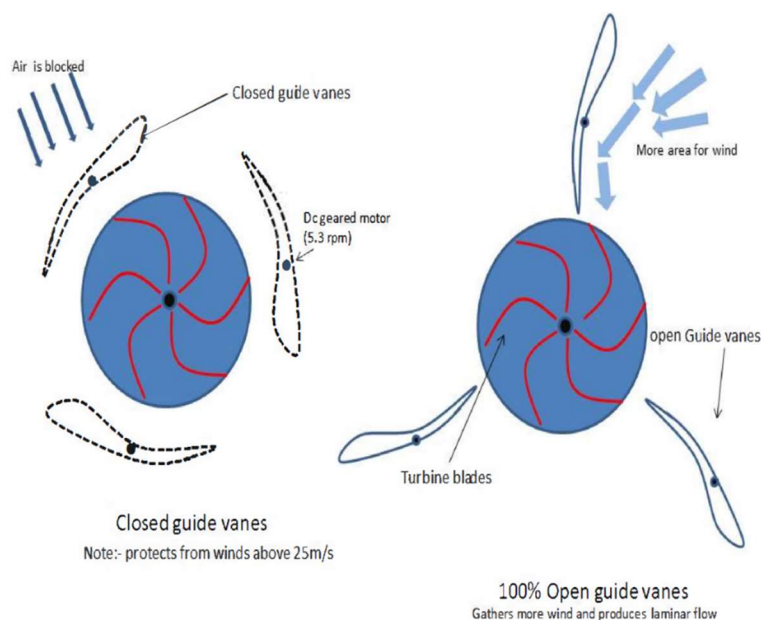


Kuva 26. Tehokertoimet nopeussuhteen funktiona yksittäiselle turbiinille ja tutkituille turbiinikokonaisuuksille (Etemadeasl et al. 2018).

Kääntyvällä turbiinikokonaisuudella voidaan saavuttaa merkittävä parannus Savonius-turbiinin tehokertoimeen, mutta turbiinikokonaisuudella on myös paljon ongelmakohtia, jotka tulee ratkaista. Turbiinikokonaisuudessa molemmat turbiinit generaattoreineen on kannatettu yksittäisen maston varassa, lisäksi vaatimuksia maston lujuudelle ja perustuksille verrattuna yksittäiseen turbiiniin. Generaattoreiden sijaitessa mastossa, tulee sähkö kuljettaa alas mastosta kaapelia pitkin. Kaapelin kiertymisen estämiseksi turbiinikokonaisuus ei voi pyöriä hallitsemattomasti itsensä ympäri, tai kaapelin lisäksi turbiinikokonaisuus pitää varustaa esimerkiksi liukurenkailla. Komponenttien määrän lisääntyminen ja järjestelmän monimutkaisuus lisäävät investointikustannuksia ja voivat heikentää turbiinin toimintavarmuutta.

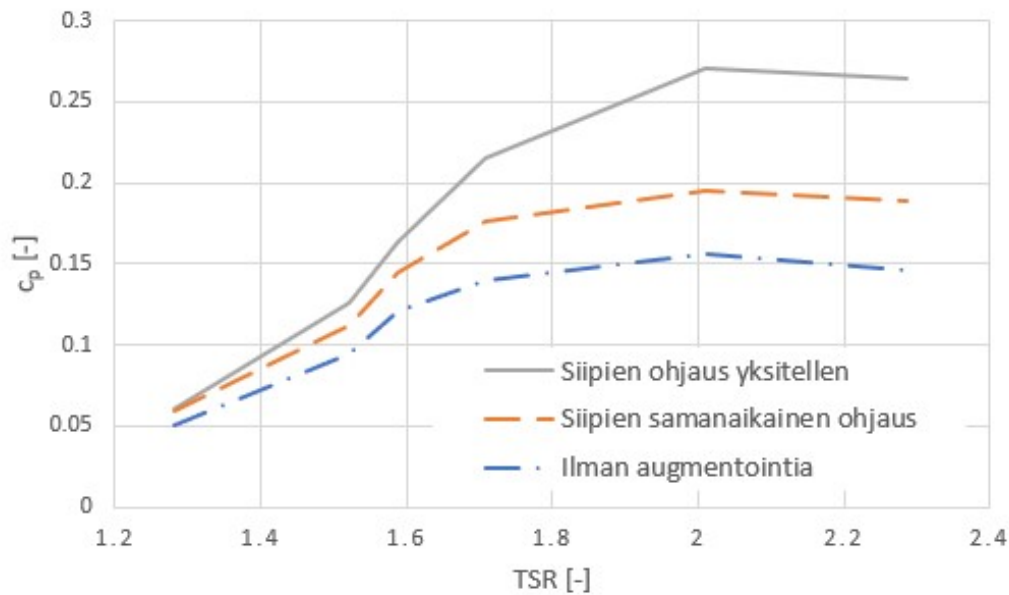
4.5 Nopeussäätö käännettävillä augmentointisiivillä

Yhtenä Savonius-turbiinin vahvuuksista pidetään luotettavaa toimintakykyä haastavissa olosuhteissa, esimerkiksi kovilla tuulenopeuksilla. Augmentoidulla turbiinilla kovat tuulenopeudet voivat kuitenkin olla ongelmallisia turbiinin kestävyiden kannalta. Gupta et al. (2016) ovat kehittäneet augmentointimenetelmän, jolla turbiinin toiminta mahdollistetaan niin matalilla, kuin suurilla tuulenopeuksilla. Kyseinen menetelmä koostuu turbiinin ympärille symmetrisesti sijoitetuista siivistä, joita kääntämällä voidaan rajoittaa tai kasvattaa turbiinin läpi kulkevaa massavirtaa. Siipien sijainti ja toiminta on osoitettu kuvassa 27. (Gupta et al. 2016).



Kuva 27. Turbiinin nopeussäätö turbiinin ympärille sijoitetuilla käännettävillä siivillä (Gupta et al. 2016).

Siipien asennon ohjaukseen voidaan käyttää kahta eri menetelmää. Ensimmäisessä tilassa kaikkia siipiä käännetään synkronisesti samassa asennossa. Toisessa tilassa jokaisen siiven asentoa ohjataan yksitellen toisista siivistä riippumatta. Ohjaamalla siipiä yksitellen saavutetaan suurin tehokerroin, kuten kuvassa 28 esitetyistä CFD-laskentaan perustuvista tuloksista voidaan havaita. (Gupta et al. 2016).

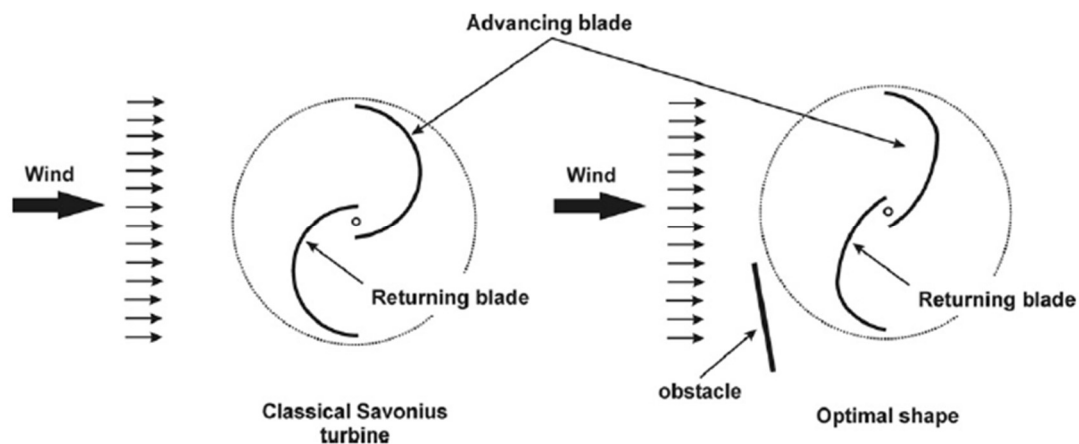


Kuva 28. Tehokertoimen riippuvuus kärkinopeussuhteesta käännettävillä ohjaussiivillä ja ilman augmentointia (Gupta et al. 2016).

4.6 Augmentoinnin vaikutus siiven optimaaliseen muotoon

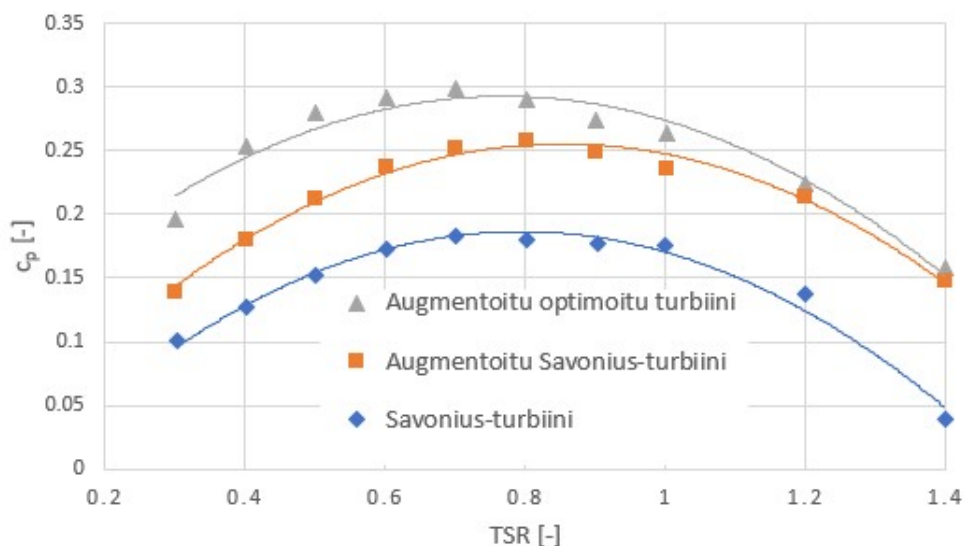
Käytettäessä augmentointimenetelmiä kannattaa virtauskentän muuttuminen ottaa huomioon jo turbiinin suunnittelussa. Augmentointimenetelmät vähentävät takaisin tulevan siiven tuottamaa negatiivista momenttia suhteessa turbiinin tuottamaan kokonaismomenttiin, jolloin siiven koveran puolen tuottaman tehon optimointi on oleellisempaa kuin kuperan puolen häviöiden minimoiminen.

Mohamed et al. (2010) tutkivat augmentoinnin vaikutusta siiven optimaaliseen muotoon. Tutkimuksessa siiven muotoa optimoitiin algoritmilla, jossa siiven sisä- ja ulkoreunan sijainti oli määritetty, mutta siiven muotoa näiden pisteiden välissä muutettiin. Kaikkiaan 210 erilaista turbiinia testattiin CFD-menetelmällä ja parhaat toiminta-arvot saavutettiin koukkua muistuttavilla siivillä, joiden rakenne on esitetty kuvassa 29. (Mohamed et al. 2010).



Kuva 29. Augmentoidun turbiinin siipien optimaalinen muoto (Mohamed et al. 2010).

Augmentoitua ja optimoitua turbiinia verrattiin perinteiseen turbiiniin sekä augmentoituna, että ilman augmentointia. Optimoitu turbiini tuotti suurimman tehokertoimen kaikilla tutkituilla kärkinopeussuhteen arvoilla. Suurilla kärkinopeussuhteen arvoilla ero optimoidun ja optimoimattoman turbiinin välillä pieneni, mutta erityisesti pienillä kärkinopeussuhteen arvoilla ero turbiinien välillä oli merkittävä. Tehokertoimen riippuvuus kärkinopeussuhteesta on esitetty kuvassa 30. (Mohamed et al. 2010).



Kuva 11. Optimoidun ja perinteisen Savonius-turbiinin tehokerroin kärkinopeussuhteen funktiona (Mohamed et al. 2010).

4.7 Augmentointimenetelmien vertailua

Edellä esitellyillä augmentointimenetelmillä saavutetut tehokertoimen maksimiarvojen lisäyksen ovat koottu taulukkoon 4.

Taulukko 4. Augmentoinnin vaikutus tehokertoimen maksimiarvoon.

Augmentointimenetelmä	Tehokertoimen maksimiarvon lisäys	Lähde
Virtauksen ohjaus molempiin siipiin	160 % (CFD)	El-Askary et al. 2015
Tuulensuunnasta riippumaton ohjuri	41,3 %	Prija et al. 2018
Automaattisesti kääntyvät ohjauslevyt	46,3 % (CFD, Banki)	Wenlong et al. 2019
Kääntyvä turbiinikokonaisuus	80 % (CFD)	Etemadeasl et al. 2018
Käännettävät augmentointisiivet	69 % (CFD)	Gupta et al. 2016

Ohjaamalla virtaus molempiin siipiin saavutettiin 0,52 tehokerroin, joka lähestyy jo Betzin teoreettista raja-arvoa 0,593. Ohjaimen ongelmana on kuitenkin sen suuri koko, ja kyvyttömyys huomioida eri tuulensuuntia. Lisäksi turbiinin taakse syntyi epäsymmetrisiä aaltoja, aiheuttaen mekaanisia rasituksia ja kovaa ääntä (El-Askary et al. 2015). Näistä syistä kyseisen mallinen ohjain voisi olla käytännöllinen vain paikoissa, joissa tuulen suunta pysyy usein samana johtuen esimerkiksi alueella olevista suurista rakennuksista.

Tuulensuunnasta riippumaton ohjuri on yksinkertainen ja lupaava ratkaisu saavuttaen parhaimmillaan 41,3 prosentin nousun maksimitehokertoimessa. Valitettavasti ohjurin toiminta ei kuitenkaan ole yhtä hyvä kaikilla tuulensuunnilla, ja huonoimmillaan ohjuri ei juurikaan parantanut turbiinin toimintaa. Optimoimalla ohjurin geometriaa voitaisiin toimintaa kuitenkin parantaa. (Prija et al. 2018).

Automaattisesti kääntyvillä ohjauslevyillä saavutettiin tuulensuunnasta riippumatonta ohjuria merkittävästi suurempi tehokertoimen nousu. Erityisesti tulee huomioida, että automaattisesti kääntyvällä ohjurilla parannus saavutettiin kaikilla tuulensuunnilla, kun taas tuulensuunnasta riippumattomalla ohjurilla tuulensuunta vaikutti tehokertoimen suuruuteen. Automaattisesti kääntyvä ohjuri on kuitenkin rakenteena hieman monimutkaisempi liikkuvien osien takia, ja sen toiminta voi aiheuttaa haasteita

esimerkiksi jään kertymisen vuoksi. Automaattisesti kääntyvää ohjuria voidaan kuitenkin pitää lupaavana menetelmänä Savonius-turbiinin toiminnan parantamiseksi.

Kääntyvällä turbiinikokonaisuudella saavutettiin kaikilla tuulensuunnilla toimivista augmentointimenetelmistä suurin tehokertoimen nousu. Kääntyvän turbiinikokonaisuuden ongelmina ovat kuitenkin sen suuri rakenne, maston ja perustusten lujuudelle aiheutuvat vaatimukset ja kasvaneet investointikustannukset.

Augmentoidun turbiinin haasteena voi olla turbiinin kestävyys kovissa tuuliolosuhteissa. Yhtenä ratkaisumenetelmänä ehdotettiin käännettäviä augmentointisiipiä. Kolmea siipeä käyttämällä saavutettiin 69 prosenttia suurempi maksimitehokerroin ohjaamalla siipiä erikseen ja 25 prosenttia suurempi tehokerroin ohjaamalla kaikkia siipiä samanaikaisesti. Käännettäviä siipiä voitaisiin hyödyntää myös useammalla ohjauslevyllä varustetuissa tuulensuunnasta riippumattomissa ohjureissa. Tällöin kaikki siivet voitaisiin yhdistää yhden säätökoneiston taakse, jolloin turbiinin läpi kulkevaa massavirtaa voitaisiin rajoittaa suurilla tuulennopeuksilla. Käännettävien ohjainsiipien haittapuolena on investointikustannusten nousu ja toimintavarmuuden heikkeneminen liikkuvien osien ja sähköisten komponenttien vuoksi.

5 YHTEENVETO

Savonius-turbiinin suunnitteluparametrien valinnalla on merkittävä vaikutus turbiinin tehokertoimeen. Siipien lukumäärä, siipikaaren kulma, OR- ja AR-suhde, sekä päätylevyjen muoto ovat tekijöitä, joista jokaisen vaikutus tehokertoimeen voi olla yksinään kymmeniä prosentteja. Työssä koottiin optimaaliset arvot tärkeimmille parametreille, ja ne esitettiin taulukossa.

Optimaalisilla parametreilla suunniteltua turbiinia voidaan edelleen parantaa innovatiivisilla ratkaisuilla, kuten turbiinin siipiin sijoitettavilla venttiileillä tai neljännessiipien lisäyksellä. Toisaalta tehokerrointa ja itsekäynnistyvyyttä voidaan parantaa merkittävästi optimoimalla siipiprofiilia puolikaarta monimutkaisempiin muotoihin. Yhdistämällä siipiprofiilin optimoiminen ja muut innovatiiviset menetelmät, esimerkiksi siipiin sijoitettavat venttiilit, voitaisiin turbiinin tehokerrointa todennäköisesti nostaa enemmän kuin siipikaaren optimoinnilla tai innovatiivisilla menetelmillä yksistään.

Erityisen suuriin tehokertoimen parannuksiin päästään virtauksen augmentoinnilla. Yksi augmentoinnin suurimmista haasteista on tuulensuunnan muuttumisen huomiointi. Ongelma voidaan ratkaista esimerkiksi käyttämällä tuulensuunnan mukaan kääntyviä ohjaussiipiä tai kääntyvää turbiinikokonaisuutta. Erityisesti tuulensuunnan mukaan automaattisesti kääntyvillä ohjauslevyillä saavutettiin merkittävä tehokertoimen nousu augmentointimenetelmän ollessa yksinkertainen.

Augmentoidun turbiinin haasteena voi olla turbiinin kestävyys kovissa tuuliolosuhteissa. Käyttämällä käännettäviä augmentointisiipiä voidaan turbiinin läpi kulkevaa massavirtaa rajoittaa tarvittaessa. Mahdollisimman suurta tehokerrointa tavoiteltaessa tulee siipiprofiilin optimoinnissa huomioida augmentoinnin vaikutus virtauskenttään.

LÄHDELUETTELO

Akwa João Vicente, Vielmo Horácio Antonio & Petry Adriane Prisco, 2011. A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) s. 3054 – 3064. [online-tietokanta] [viitattu: 14.1.2020] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112001505>

Altan Burcin Deda & Atilgan Mehmet, 2012. A study on increasing the performance of Savonius wind rotors. *Journal of Mechanical Science and Technology* 26 (5) (2012) s. 1493-1499. [online-tietokanta] [viitattu: 15.11.2019] Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-012-0313-y>

Baoshou Zhang et al., 2016. A Novel Parametric Modelling Method and Optimal Design for Savonius Wind Turbines. *Energies* 2017, 10, s. 301. [online-tietokanta]. [viitattu: 30.10.2019]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/314217945_A_Novel_Parametric_Modeling_Method_and_Optimal_Design_for_Savonius_Wind_Turbines

Betz Albert, 1920. Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren. *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen*.

Blackwell Ben F, Sheldahl Robert E & Feltz Louis V, 1977. Wind Tunnel Performance Data for Two- and Three-Bucket Savonius Rotors. [online-tietokanta]. [viitattu: 27.2.2019]. Saatavissa: <https://www.semanticscholar.org/paper/Wind-tunnel-performance-data-for-two-and-Savonius-Sheldahl-Blackwell/9c43b666ff48d4396dc6a42cb27eb9f6a6563c21>

El-Askary W.A. et al., 2015. Harvesting wind energy for improving performance of Savonius rotor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 139, 2015, s. 8-15. [online-tietokanta]. [viitattu: 31.10.2019]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610515000057>

Etemadeasl Vahid et al., 2018. A novel configuration for improving the aerodynamic performance of Savonius rotors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 0(0) s. 1-11. [online-tietokanta]. [viitattu: 12.2.2020]. Saatavissa: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-novel-configuration-for-improving-the-aerodynamic-Etemadeasl-Esmaelnajad/577e6fb76760657f1ebaef672d1f0ae364a48be1>

Gupta Nitin et al., 2016. Magnetically Levitated VAWT with Closed Loop Wind Speed Conditioning Guide Vanes. 1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES-2016). [online-tietokanta]. [viitattu: 15.11.2019]. Saatavissa: <https://www.semanticscholar.org/paper/Magnetically-levitated-VAWT-with-closed-loop-wind-Gupta-Kumar/abc6ba054f7491ae29f509152dbe24804c9c5f89>

Hariyanto Rudi et al., 2016. Experimental Study On Improvement The Performance Of Savonius Windmill With Ventilated Blade. International Journal of Renewable Energy Research, Volume 6, No. 4, 2016, s. 1403-1409. [online-tietokanta]. [viitattu: 30.10.2019]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/320135131_Experimental_study_on_improvement_the_performance_of_savonius_windmill_with_ventilated_blade

Jeon Keum Soo et al. 2014. Effects of end plates with various shapes and sizes on helical Savonius wind turbines. Renewable Energy 79 (2015) s. 167-176. [online-tietokanta]. [viitattu: 31.10.2019]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148114007502>

Lee Jae-Hoon, Lee Young-Tae & Lim Hee-Chang, 2015. Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine. Renewable Energy 89 (2016) s. 231-244. [online-tietokanta]. [viitattu: 12.02.2019]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148115305164>

Marinic-Kragic Ivo, Vucina Damir & Milas Zoran, 2018. Concept of flexible vertical-axis wind turbine with numerical simulation and shape optimization. Energy, Volume 167, 15.01.2019, s. 851-852. [online-tietokanta]. [viitattu: 30.10.2019] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218322308>

Masdari Mehran et al., 2018. Optimization of airfoil Based Savonius wind turbine using coupled discrete vortex method and salp swarm algorithm. Journal of Cleaner Production 222 (2019), s. 47-56. [online-tietokanta]. [viitattu: 12.2.2020]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619306420>

Mohamed MH et al., 2010. Optimal blade shape of a modified Savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade. Elsevier, Energy Conversion and Management, Volume 52, Issue 1, 2011, s. 236-242. [online-tietokanta]. [viitattu: 30.10.2019]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890410002918>

Mohammadi M et al., 2018. Numerical investigation of performance refinement of a drag wind rotor using flow augmentation and momentum exchange optimization. Energy, Volume 158, 01.09.2018, s. 592-606. [online-tietokanta]. [viitattu: 30.10.2019]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054421831137X>

Prija Tjahjana Dominicus Danardono Dwi et al., 2018. Study on Performance Improvement of the Savonius Wind Turbine for Urban Power System with Omnidirectional Guide Vane (ODGV). Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences [online-tietokanta] [viitattu: 9.1.2020] Saatavissa: http://www.akademiabaru.com/doc/ARFMTSV55_N1_P126_135.pdf

Roy Sukanta & Saha Ujjwal K., 2013a. Investigations on the Effect of Aspect Ratio into the Performance of Savonius Rotors. Proceedings of the ASME 2013 Gas Turbine India Conference, GTINDIA 2013. [online-tietokanta]. [viitattu: 25.2.2019]. Saatavissa:

<https://www.researchgate.net/publication/287602619> Investigations on the effect of aspect ratio into the performance of savonius rotors

Roy Sukanta & Saha Ujjwal K., 2013b. Review of experimental investigations into the design, performance and optimization of the Savonius rotor. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A, Journal of Power and Energy 227(4), s. 528-

542. [online-tietokanta]. [viitattu: 12.2.2019]. Saatavissa: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0957650913480992>

Rus Tania et al., 2018. Experimental Investigation on the Influence of Overlap Ratio on Savonius Turbines Performance. [online-tietokanta]. [viitattu: 13.02.2020]. Saatavissa: <https://www.semanticscholar.org/paper/Experimental-Investigation-on-the-Influence-of-on-Rus-Rus/e9881d444ad54a68fcef4afc1622f557e834a84d>

Sharma Sonu & Sharma Rajesh Kumar, 2016. Performance improvement of Savonius rotor using multiple quarter blades – A CFD investigation. Elsevier, Energy Conversion and Management, Volume 127, 2016, s. 43-54. [online-tietokanta]. [viitattu: 30.10.2019]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416307610>

Song Lei et al., 2016a. Simulation Analysis based Performance Comparison for Vertical Axis Wind Turbines. 2016 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS). [online-tietokanta]. [viitattu: 12.11.2019]. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7813470>

Song Lei et al., 2016b. Orthogonal Analysis Based Performance Optimization for Vertical Axis Wind Turbine. Hindawi Publishing Corporation. Mathematical Problems in Engineering. Volume 2016, Article ID 6241360. [online-tietokanta]. [viitattu: 25.11.2019]. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6241360>

Song Lei et al., 2016c. A Measurement Approach for Average Start-up Torque of Vertical Axis Wind Turbines. 2016 IEEE 13th International Conference on Networking, Sensing, and Control (ICNSC). [online-tietokanta]. [viitattu: 9.1.2019]. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6241360>

Song Lei et al. 2017., Performance study for a novel vertical axis wind turbine based on simulation analysis. 2017 IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). [online-tietokanta] [viitattu: 9.1.2020] Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8000151>

Wenlong Tian, Zhaoyong Mao & Hao Ding, 2019. Numerical study of a passive-pitch shield for the efficiency improvement of vertical axis wind turbines. Energy Conversion and Management, Volume 183, 01.03.2019, s. 732-745. [online-tietokanta] [viitattu: 31.10.2019] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419300391>

Toole Michael, Christian Brizer & Kelso Richard M, 2018. Analysis of the Chord Overlap and Separation Distance of a 2-Bladed Savonius Wind Turbine. 21st Australasian Fluid Mechanics Conference. [online-tietokanta] [viitattu: 13.2.2020] Saatavissa: <https://www.semanticscholar.org/paper/Analysis-of-the-Chord-Overlap-and-Separation-of-a-Toole-Birzer/76f9cd213d90140d60e793a1bc5a1ed1f5c904a7>

Zhaoyong Mao & Wenlong Tian, 2014. Effect of the blade arc angle on the performance of a Savonius wind turbine. Advances in Mechanical Engineering 2015, Vol. 7(5) 1-10. [online-tietokanta] [viitattu: 7.12.2019] Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/277888647_Effect_of_the_blade_arc_angle_on_the_performance_of_a_Savonius_wind_turbine