LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Toni Nuutinen

Joustavarakenteinen tuuliturbiinin siivistö

Työn tarkastajat: TkT Aki Grönman

TkT Jonna Tiainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Toni Nuutinen

Joustavarakenteinen tuuliturbiinin siivistö

Diplomityö

2020

Tarkastajat: TkT Aki Grönman

TkT Jonna Tiainen

48 sivua, 25 kuvaa ja 3 taulukkoa

Hakusanat: CFD, joustava siipimateriaali, uusiutuva energia, tuuliturbiini, Savonius-turbiini

Tässä työssä tutkittiin joustavan materiaalin käyttömahdollisuutta tuuliturbiinin siivissä. Työssä tutustuttiin lyhyesti tuuliturbiineihin, tuulivoiman historiaan ja sen tulevaisuuteen. Testiturbiineina toimivat Solidworks-ohjelmistolla piirretyt ja 3D-tulostimella tulostetut Savonius-turbiinit. Savonius-turbiini on erittäin yksinkertainen turbiinimalli. Se koostuu kahdesta puolisylinteristä, jotka on asetettu eri päin, pystyssä olevan akselin molemmille puolille. Savonius turbiini on erinomainen turbiinivalinta itsenäiseen toimintaan, mutta sen käynnistysmomentti on heikko.

Työssä pohdittiin joustavan materiaalin vaatimuksia ja ongelmia turbiinikäytössä sekä tutustuttiin joustavan siiven aerodynamiikkaan. Testiturbiineista toinen on perinteinen jäykkäsiipinen malli, joka rakennettiin PLA-muovista ja toinen turbiini rakennettiin osittain kumista. Työssä käytettiin CFD-mallinnusta tukemaan mittauksia. Tuloksista huomattiin, että varsinkin pienemmillä pyörimisnopeuksilla joustavarakenteisen turbiinin hyöty on merkittävä. Suuremmilla nopeuksilla ero oli pienempi ja joustavan turbiinin tärinä kasvoi niin suureksi, että mittaukset piti lopettaa ennenaikaisesti.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology

School of Energy Systems

Energy Technology

Toni Nuutinen

Elastic wind turbine blades

Master's Thesis

2020

Examiners: TkT Aki Grönman

TkT Jonna Tiainen

48 pages, 25 figures and 3 tables

Keywords: CFD, elastic blades, renewable energy, wind turbine, Savonius-turbine

This Master's thesis investigated the use of elastic material in wind turbine blades. This thesis briefly reviewed the history and future of wind power and compared different wind turbine types. Wind turbine type chosen for this experiment was Savonius-turbine. Two prototype turbines were designed by using Solidworks software and printed using a 3D-printer. Savonius-turbine is extremely simple turbine design. The rotor of Savonius-turbine consists of two half-cylinder blades placed to a rotating vertical axis. It is excellent choice for independent turbine, but it lacks starting torque.

Thesis considered requirements and problems caused by flexible rotor blades and investigated the aerodynamics of elastic wings. One of the test turbines was rigid and build from PLA plastic. Another turbine was partially elastic. The elastic parts were built from rubber sheet. Turbines were measured in wind tunnel and results were compared to CFD simulations. Experiment and CFD simulations showed that the elastic wind turbine version generated significantly better tip-speed ratios at lower wind speeds. The difference was smaller at higher speeds, but still noticeable. Higher inlet velocity also resulted in more vibrations in the elastic turbine, so experiment had to be prematurely stopped.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä **2**

Abstract **3**

Sisällysluettelo **4**

Symboli- ja lyhenneluettelo **5**

1 Johdanto **7**

2 Tuuliturbiinit **11**
2.1 Vaaka-akseliset tuuliturbiinit 12
2.2 Pystyakseliset tuuliturbiinit 14
2.3 Savonius-turbiini 15

3 Materiaalit **17**
3.1 Materiaalin vaatimukset tuuliturbiinikäytössä 17
3.2 Joustava siipimateriaali 18

4 Turbiinin suunnittelu ja valmistus **22**
4.1 3D-tulostaminen 24
4.2 Tulostusmateriaalit 26

5 CFD-mallinnus **28**
5.1 Laksentahila ja laskenta-alue 29
5.2 Numeerisessa analysoinnissa tapahtuvat virheet 31
5.3 Numeerisen mallinnuksen lopettaminen 32

6 Mittaukset **33**
6.1 Tuulitunnelimittaukset 33
6.2 Mittausten toteutus 35
6.3 Mittausten virhetarkastelu 37

7 Tulokset **39**

8 Yhteenveto ja johtopäätökset **42**

9 Lähdeluettelo **44**

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

A	turbiinin siipien muodostama pinta-ala	m^2
$A_{tunneli}$	tuulitunnelin testausalueen pinta-ala	m^2
$A_{turbiini}$	turbiinin pinta-ala edestä katsoen	m^2
c	profiilin jänteen pituus	m
D	halkaisija	m
C_d	voimasuhde	-
C_{D0}	ilmanvastuskerroin	-
C_l	nostovoimakerroin	-
C_p	painesuhde	-
C_P	tehokerroin	-
C_T	momenttikerroin	-
e	turbiinin roottoreiden välinen mitta	m
E	kokonaisenergia	J
E_φ	kohtauskulman muutoksen energia	J
E_h	siiven taittumisen energia	J
h	siiven taittuma	m
l	jänneväli	m
L	siiven pituus	m
N	lukumäärä	kpl
p	paine	Pa
P_w	tuulen energia	J
q	tunnelikorjaus dynaamiselle paineelle	Pa
R	roottorin säde	m
Re	Reynoldsin luku	-
S_T	turbiinin siipien pyyhkäisypinta-ala	m^2
T	turbiiniin vääntömomentti	Nm
T_{tuuli}	tuulen tuottama teoreettinen maksimivääntömomentti	Nm
u	fluidin nopeus	m/s

v	kinemaattinen viskositeetti	m^2/s
V	ilman virtausnopeus	m/s
y	etäisyys lähimmästä seinämästä	m
Y	nostovoima	N

Kreikkalaiset aakkoset

α	muotokerroin	-
β_1	päällekkäisyyssuhde	-
ε_{sb}	kiinteän kappaleen aiheuttama vastus tuulitunnelissa	-
ε_t	kappaleen aiheuttama kokonaisvastus tuulitunnelissa	-
ε_{wb}	pyörivän kappaleen aiheuttama vastus tuulitunnelissa	-
λ	kärjennopeussuhde	-
μ	dynaaminen viskositeetti	kg/ms
ω	kulmanopeus	rad/s
φ	kohtauskulma	°
ρ	tiheys	kg/m^3

Alaindeksit

CO	korjattu arvo

Lyhenteet

ABS	acrylonitrile butadiene styrene
CFD	computational fluid dynamics
EROI	energy return on investment
FDM	fused depsition modeling
HIPS	high impact polystyrene
PLA	polylactic acid
PETG	polyethylene terephthalate glycol
TPU	thermoplastic polyurethane

1 JOHDANTO

Maailmanlaajuinen vakaus energian suhteen kasvavassa energiantarpeessa sekä kasvihuonekaasujen ja fossiilisten polttoaineiden vähentämisen vaatiminen aiheuttavat lukuisia haasteita. Kehittyvissä maissa talouden nopea kasvu ja maapallon lisääntyvä väestömäärä aiheuttaa lisääntyvän tarpeen energialle vuosikymmeniksi. Ennustettu enrergian käytön kasvu on noin 2,1 % vuodessa vuoteen 2035 asti. Maapallon rajalliset fossiiliset energiavarastot sekä niiden polttamisesta aiheutuvat saasteet pakottavat ihmiset siirtymään tulevaisuudessa yhä enemmän kestäviin energiaratkaisuihin. (Breyer 2012, 11, 28–29.)

Ilmaston lämpenemisen ehkäisemiseksi kasvihuonekaasuja tuottavia energiantuotantomuotoja tulee välttää ja uusituvaa energiantuotantoa tulee lisätä. Kaikki energiantuotantoteknologiat aiheuttavat epäsuoria kasvihuonepäästöjä vaikka niitä ei käytön aikana muodostu. Eri energiantuotantomuotoja voidaan verrata tarkastelemalla niiden hiilidioksidipäästöjä suhteutettuna tuotettuun sähköenergiaan. Lisäksi erilaisten energiantuotantomuotojen vertailuun voidaan käyttää EROI-suhdetta, joka tulee sanoista ”energy return on investment”. Se tarkoittaa suhdetta saadusta energiahyödystä investointia kohden. Mitä pienempi luku, niin sitä taloudellisempi energiantuotantomuoto on. (Breyer 2012, 147–150.)

Taulukossa (1) on vertailtu eri energiatuotantomuotojen kannattavuutta ja kestävyyttä vertailemalla niiden EROI-suhdetta sekä niiden aiheuttamia CO_2 -päästöjä tuotettuun sähköenergiamäärään nähden. Taulukossa ei ole ilmoitettu fossiilisten polttaineiden EROI-suhdetta, koska nykytekniikalla kyseiset energiantuotantomuodot eivät ole kestäviä ratkaisuja tai polttoaineen määrä maapallolla on rajallinen. Breyer (2012, 149) mainitsee, että kivihiilen EROI-suhde olisi erittäin kilpailukykyinen, mutta kivihiili ei ole kestävä energiaratkaisu.

Taulukko 1. Eri energiamuotojen kannattavuutta on verrattu CO_2-päästöjen ja kestävyyden suhteen. (Breyer 2012, 149)

Energiantuotantomuoto	**CO_2-päästöt [g/kWh$_{el}$]**	**EROI**
Vesivoima	17–14	100:1
Tuulivoima	7–24	20:1–50:1
Aurinkopaneelit	12–42	16:1–51:1
Aurinkolämpö	22–33	50:1–70:1
Maalämpö	15–120	30:1–50:1
Biomassa	120	ei tiedossa
Ruskohiili	1150–1210	-
Hiilivoima	900–950	-
Hiilivoima varustettuna hiilidioksin suodatuksella	255–440	-
Maakaasu	400–760	-
Öljy	880	-
Ydinvoima	66	-

Kasvihuonekaasujen lisäksi, poltettavista fossiilisista polttaineista kulkeutuu palokaasujen mukana myrkyllisiä raksasmetallihiukkasia hengityksen välityksellä ihmisten keuhkoihin. Pääosin pienhiukkaspäästöt aiheutuvat hiilen ja öljyn polttamisesta. Nämä saasteet aiheuttavat ihmisille sairauksia ja ennenaikaisia kuolemia. Markandya & Wilkinson (2007, 981) arvioivat, että Euroopassa fossiilisen polttaineen polttamisesta aiheutuvat ilmansaasteet aiheuttavat 25–30 kuolemaa, 225–300 vakavaa sairastumista sekä 13300–17700 lievempää sairastumista jokaista tuotettua terawattituntia energiaa kohden. Väestön terveys paranisi merkittävästi, jos saastuttavasta fossiilisesta energiantuotannosta luovuttaisiin ja siirryttäisiin uusituvaan energiaan mahdollisuuksien mukaan. (Breyer 2012, 150–151.)

Taulukosta (1) nähdään, että tuulivoiman EROI-suhde on erinomainen ja sen hiilidioksidipäästöt ovat pienet suhteessa tuotettuun sähköön nähden. Tuulivoimalla saadaan tuotettua sähköä hyvin taloudellisesti, eikä se aiheuta merkittäviä vahinkoja luonnon ekosysteemille. Tuulivoima on ehtymätön luonnonvara ja maapallolla oleva vuosittainen tuulivoimapotentiaali ylittää koko maailman energiantarpeen moninkertaisesti. Millään perinteisillä tällä hetkellä käytössä olevilla voimalaitoksilla ei

päästä tämänhetkisiin ilmastotavoitteisiin. Ydinvoima ei aiheuta käytönaikaisia hiilidioksidipäästöjä eikä myrkyllisiä ilmansaasteita niin kuin poltettavat polttoaineet, mutta ydinvoimaloiden hiilidioksidipäästöt ovat silti yli kolme kertaa suuremmat, kuin uusiutuvissa energianlähteissä. (Breyer 2012, 150.)

Jotta tuulivoiman asemaa eri energiatuotantomuotojen joukossa saataisiin parannettua, täytyy tutkia erilaisia vaihtoehtoja tuulivoiman kannattavuuden lisäämiseksi. Tuulivoimaloiden hyötysuhteen parantaminen, valmistus- ja käyttökustannusten vähentäminen sekä vuotuinen käytettävyyden parantaminen on keinoja, joilla tuulivoimasta saadaan houkuttavampi vaihtoehto fossiilisille polttoaineille.

Työn tavoitteena on tutkia joustavarakenteista tuuliturbiinimateriaalia. Onko sen avulla mahdollista parantaa turbiinin hyötysuhdetta, mikä lisäisi tuulivoimalan kannattavuutta ja mahdollistaisi tuulivoiman käytön myös köyhemmillä alueilla. Työhön valitaan Savonius-turbiini, joka on erittäin yskinkertainen turbiinimalli. Savonius-turbiinit ovat erinomaisia turbiineja käytettäväksi itsenäisenä tuuliturbiinina, koska tuulen suunnalla ei ole merkitystä turbiinin toimintaan. Lisäksi Savonius-turbiinin investointi- ja käyttökustannukset ovat pieniä. Turbiinin huonona ominaisuutena on heikko vääntömomentti matalilla kierrosnopeuksilla. Halpojen kustannusten ja itsenäisesti toimivan turbiinin takia Savonius-turbiinit sopivat erinomaisesti sähköntuotantoon maaseuduille, talojen katoille sekä köyhille alueille. Savonius-turbiinien käyttöä on myös testattu teiden varsilla keräämässä ohi ajavien autojen tuottaman ilmavirran energian talteen. (Santhakumar et al. 2018, 1–2)

Työ aloitetaan tutustumalla ensin tuuliturbiineihin ja niiden teoriaan. Tutustutaan nykyään tuuliturbiineissa käytettäviin siipimateriaaleihin sekä niiden siiville asetettuihin vaatimuksiin. Lisäksi pohditaan joustavan siipirakenteen tuomia käytännön ogelmia sekä minkälaisia haasteita se aiheuttaa materiaalin suhteen. Turbiineita sunnitellaan kaksi kappaletta, joista toisessa on joustavarakenteiset siivet ja toinen on täysin jäykkärakenteinen. Näin saadaan vertailtua turbiinien eroa. Saadaanko joustavalla materiaalilla parannusta jäykkään versioon nähden ja saadaanko joustavalla materiaalilla parannettua Savonius-turbiinin heikkoa vääntömomenttia matalilla kierroksilla.

Turbiineista rakennetaan prototyypit, joita testataan tuulitunnelissa. Tuulitunnelimittauksia tukemaan turbiineja simuloidaan tietokoneella CFD-ohjelmalla, minkä jälkeen saatua dataa verrataan tuulitunnelissa suoritettaviin mittauksiin. Tuloksien pohjalta tehdään johtopäätöksiä jatkotutkimusten tarpeellisuudesta.

2 TUULITURBIINIT

Aluksi tuulta käytettiin hyödyksi purjeveneissä ja -laivoissa. Ensimmäiset merkit tuulella toimivista tuulikoneista löytyy jo ajalta 600 vuotta ennen ajanlaskun alkua. Aluksi tuulella toimivia tuulimyllyjä käytettiin koneiden energianlähteenä, esimerkiksi viljan tai maissin jauhamiseen. Tuulimyllyt ja vedellä toimivan myllyt olivat pääasiallinen energianlähde ennen 1700-luvulla tapahtunutta teollista vallankumousta. Teollisen vallankumouksen jälkeen tuulimyllyt korvattiin höyryllä, hiilellä tai nestemäisillä polttoaineilla toimivilla moottoreilla. (Ragheb 2017, 127–129.)

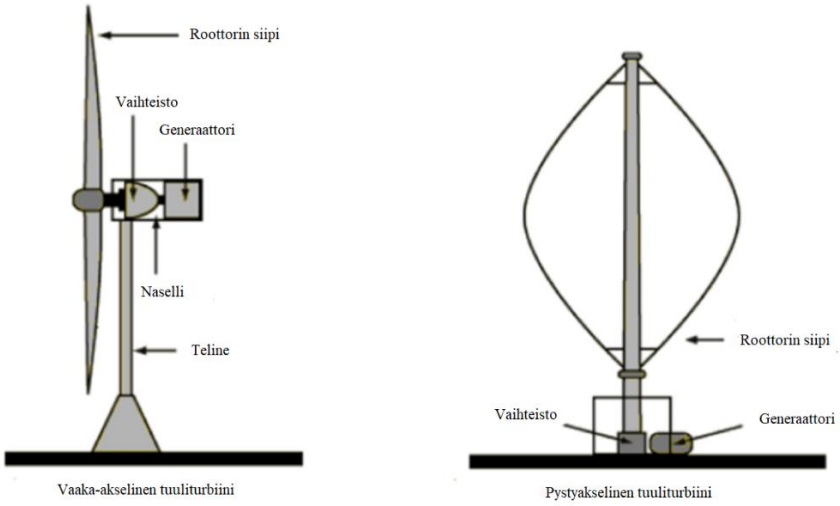
Idealtaan tuulimylly ja tuulivoimala on hyvin samanlaisia. Molemmissä tuuliturbiini siirtää tuulessa olevaa kineettistä energiaa turbiinin akselille. Tuulivoimalassa akseli pyörittää generaattoria, joka tuottaa sähköä, ja tuulimyllyssä energia siirttyy koneen mekaaniseksi energiaksi.

Ensimmäiset tuuliturbiinit energiantuotantoon valmistettiin 1940-luvulla, mutta ongelmana oli turbiinin siipimateriaalin kestävyys. Ensimmäinen onnistunut turbiinimalli oli Gedster-turbiini, joka toimi 11 vuotta ilman huoltoa. Se pystytettiin vuosina 1956–1957 Tanskaan, Gedsterin rannalle. Gedster-turbiinin teho oli 200 kW ja siinä oli kolme, 24 metriä pitkää siipeä. Kuvassa (1) on Gedster-tuuliturbiini. (Mishnaevsky et al 2017, 1.)

Kuva 1. Gedster-turbiini Tanskassa. (Mishnaevsky et al 2017, 2.)

Tekniikan kehittyessä tuuliturbiinien siipien koko, muoto, materiaaliominaisuudet, turbiinin teho sekä tekniikka on muuttunut merkittävästi. Tällä hetkellä tehokkain tuulivoimala on Haliade-X. Siinä on 107 metriä pitkät siivet, se on 206 metriä korkea ja sen teho on 12 MW (GE Renewable Energy). Tuulivoimaloita voidaan asentaa maalle tai merelle. Tuulipuistot ovat alueita johon on asennettu paljon tuuliturbiineita lähelle toisiaan.

Tuuliturbiinit jaotellaan kahteen kategoriaan, vaaka- ja pystyakselisiin tuuliturbiineihin. Seuraavaksi käydään läpi vaaka- ja pystyakselisten tuuliturbiinien eroavuuksia, hyviä sekä huonoja puolia, minkä jälkeen käsitellään Savonius turbiinia. Kuvassa (2) on esitetty pysty- ja vaaka-akselisten turbiinien rakenne sekä pääkomponentit.



Kuva 2. Pystyakselinen ja vaaka-akselinen tuuliturbiini sekä niiden pääkomponentit. (Al-Kharbosy 2013, 7.)

2.1 Vaaka-akseliset tuuliturbiinit

Vaaka-akseliset tuuliturbiinin siivet ovat kohtisuorassa tuuleen virtaukseen nähden. Pääasiallinen vaaka-akselista tuuliturbiinia pyörittävä voima on siipiin kohdistuva aerodynaaminen nostovoima. Vaaka-akseliset tuuliturbiinit ovat yleistyneet pystyakselisia selvästi enemmän ja niitä myös on tutkittu paljon enemmän, koska vaaka-akselisen turbiinin hyötysuhde on selvästi pystyakselista parempi. Tämä johtuu siitä, että

vaaka-akselinen turbiini pystyy siirtämään tuulesta energiaa koko pyörähdyksen matkalta toisin kuin pystyakselisessa turbiinissa. (Johari et al 2018, 75.)

Vaaka-akselisen turbiinin heikkous on, että sen asento tuuleen suuntaan nähden täytyy olla oikea. Vaaka-akselisen turbiinin optimaalinen kulma tuuleen nähden on kohtisuorassa sitä vastaan. Pienemmissä turbiineissa on siiveke, joka kääntää turbiinin oikeeseen asentoon, mutta isommat turbiinit käyttävät siihen erillistä anturia ja moottoreita. Vaaka-akseliset turbiinit tuottavat enemmän melusaastetta kuin pystyakseliset. Etuna pystyakseliseen turbiiniin verrattuna on että, vaaka-akseliset turbiinit voidaan paremmin asentaa korkealle, missä tuulen nopeudet ovat suurempia. (Johari et al 2018, 75.)

Vaaka-akselisen tuuliturbiinin aerodynaamiseen kuormaan vaikuttaa siipiprofiilin muodosta riippuen tuulenvastuksesta aiheutunut ilmanvastusvoima sekä nostovoima. Voimien suuruudet riippuvat ilman virtausnopeudesta, siiven kohtauskulmasta, siiven nopeudesta sekä siiven kiertymisestä pystyaskeliin nähden. (Moushine et al 2018, 749–751.)

Tuuliturbiinien kuvaajana tärkeä yksikötön suure on Reynoldsin luku. Momentti- ja voimasuhteet on Reynoldsin luvun funktioita. Turbiinin roottorin suunnittelussa käytetään nostovoimasuhdetta ja ilmanvastussuhdetta erilaisilla Reynoldsin luvuilla sekä siipien kohtauskulmilla. Tärkeitä yksiköttömiä suureita Reynoldsin luvun lisäksi on siiven kärjen nopeuksien suhde, momentti-, teho- sekä nostovoimakerroin, Nostovoimakerroin, C_l saadaan yhtälöstä

$$C_l = \frac{\frac{L}{l}}{\frac{1}{2}\rho V^2 c} \tag{1}$$

missä ρ on ilman tiheys

L on siiven pituus

l on jänneväli

V on ilman virtausnopeus

c on profiilin jänteen pituus

Ilmanvastuksen vastusvoimakerroin, C_d ja työntövoiman suhde, C_T saadaan yhtälöistä:

$$C_d = \frac{\frac{D}{l}}{\frac{1}{2}\rho V^2 c} \tag{2}$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A V^2} \tag{3}$$

missä D on halkaisija

A on tuuliturbiinin siipien muodostama pinta-ala

T on turbiinin vääntömomentti

(Moushine et al 2018, 749–751.)

2.2 Pystyakseliset tuuliturbiinit

Pystyakseliset tuuliturbiinit pyörivät kohtisuorassa maata vasten. Niitä liikuttavat voimat koostuvat ilmanvastuksesta ja nostovoimasta. Pystyakselisen turbiinin etu vaaka-akselisiin turbiineihin nähden on, että turbiinien ei tarvitse olla kohtisuorassa ilmavirtaan nähden vaan ne toimivat joka suunnasta tulevalla virtauksella. Pystakselisen tuulivoimalan komponentit voidaan asentaa lähemmäs maata, joka tekee niiden huoltamisesta helpompaa ja halvempaa. Huonoina puolina vaaka-akseliseen turbiiniin nähden on pystyakselisen turbiinin matala asennuskorkeus. Lähellä maata tuulen voimakkuudet ovat pienempiä sekä maaston muodoista johtuen virtauksessa on enemmän turbulenssia. Pystakselisilla turbiineilla on möys ongelmia niiden dynaamisen vakauden kanssa sekä huono hyötysuhde kovatuulisessa ympäristössä. (Johari et al 2018, 75.)

Pystyakselista tuuliturbiinia voidaan mitata teho- ja vääntökertoimien avulla. Teho saadaan laskettua vääntömomentin ja kulmanopeuden avulla:

$$P_T = T\omega \tag{4}$$

missä ω on kulmanopeus. Tuulen potentiaalinen energia turbiinin pinta-alaa kohden saadaa kineettisen energian ja massavirran avulla:

$$P_W = \frac{1}{2}\rho S_T V^3 \tag{5}$$

missä S_T on siipien pyyhkäisypinta-ala. Pyyhkäisypinta-ala saadaan kertomalla roottorin halkaisija, D roottorin korkeudella, H. Savonius turbiinin kärkinopeussuhde, λ saadaan yhtälöstä:

$$\lambda = \frac{V_{turbiini}}{V} = \frac{\omega R}{V} \tag{6}$$

missä $V_{turbiini}$ on turbiinin pyörimisnopeus

ω on kulmanopeus

R on roottorin säde

Nyt saadaan laskettua turbiinin tehokerroin, C_P ja turbiinin momenttikerroin, C_M

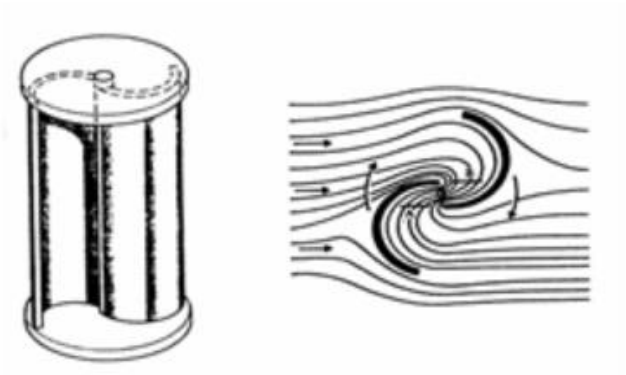
$$C_P = \frac{P_T}{P_W} = \frac{P_T}{\frac{1}{2}\rho S_T V^3} \tag{7}$$

$$C_M = \frac{T}{T_{tuuli}} = \frac{4T}{\rho S_T V^3} \tag{8}$$

missä, T_{tuuli} on tuulesta saatava teoreettinen maksimivääntömomentti. (Zemamou et al 2017, 384–385.)

2.3 Savonius-turbiini

Savonius-turbiini on pystyakselinen tuuliturbiini. Se on erittäin yksinkertainen turbiinimalli, joka kostuu kahdesta puolisylinteristä, jotka on asennettu eri päin, pystyssä olevan akselin eri puolille. Savonius turbiiniin kohdistuu ilmavastuksen aiheuttama voima ja nostovoima. Alussa ilmanvastuksen aiheuttama voima on pääasiallinen turbiinia pyörittävä voima. Se kohdistuu kuppipuoleen ja kuperaan puoleen ja näiden voimien summa määrittää turbiinin pyörimisen. Suuremmissa nopeuksissa pääasiallinen vaikuttava voima on nostovoima. Kuvassa (3) on esitetty Savonius-turbiini ja virtauksen virtaviivat. (Zemamou et al 2017, 384.)

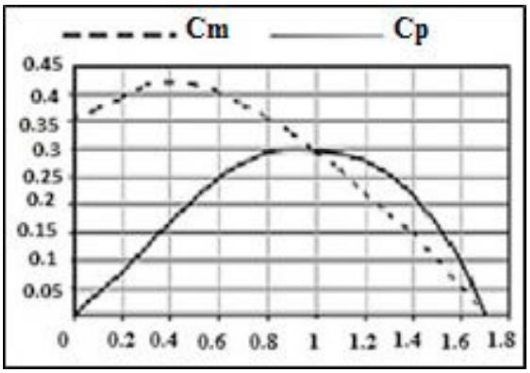


Kuva 3. Kuvassa on vasemmalla Savonius-turbiini ja oikealla sen pystyleikkaus sekä virtauksen virtaviivat. (Worasinchai 2018, 1.)

Savonius-turbiinin toimintaan vaikuttavia parametrejä on siipien lukumäärä, muotokerroin, α sekä siipien päällekkäisyyssuhde. Optimaalinen siipien määrä Savonius-turbiinille on kaksi. Silloin sen hyötysuhde ja tehokerroin ovat mahdollisimman suuria. Turbiinin muotokertoimella on myös merkittävä vaikutus turbiinin tehokertoimeen. Tutkimusten perusteella paras muotokerroin on 0,7. Muotokerroin on dimenisioton suhdeluku ja se saadaan, kun roottorin korkeus, H jaetaan roottorin halkaisijalla, D. Päällekkäisyyssuhde on myös dimensioton suhdeluku ja se saadaan yhtälöstä:

$$\beta_1 = \frac{e}{D} \tag{9}$$

missä D on roottorin halkasija. Päällekkäisyysuhdeluvulla 0,1–0,15 saavutetaan parhaita tuloksia. Perinteisen kaksisiipisen Savonius-turbiinin teho- ja momenttikertoimet on esitetty kuvassa (4) eri kärkinopeussuhteille. (Zemamou et al 2017, 385–386.)



Kuva 4. Perinteisen kaksisiipisen Savonius-turbiinin tehokerroin, C_P ja momenttikerroin, C_M. kärkinopeussuhteen funktiona. (Zemamou et al 2017, 384.)

3 MATERIAALIT

Tuuliturbiinien siivissä käytettävillä materiaaleilla on suuret vaatimukset, koska siipien tulee kestää turbiinin koko käyttöikä. Tällä hetkellä asennettujen tuuliturbiinien odotettu käyttöikä on 30 vuotta. Materiaalin tulee olla kevyttä ja sillä pitää olla korkea vahvuus-paino-suhde. Tuuliturbiineja rakennetaan paljon ja niiden olisi tarkoitus yleistyä, joten siipimateriaalit eivät saisi olla kovin kalliita tai harvinaisia. (Sutherland 1999, 2.)

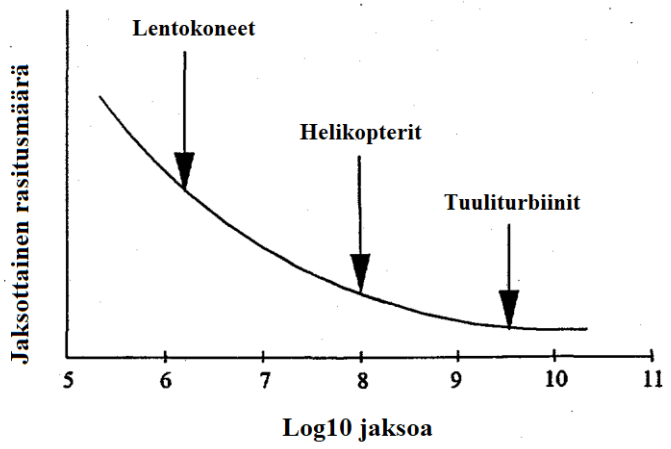
Alussa tuulimyllyjen turbiinit rakennettiin puusta. Puu on hyvä materiaali, mutta sillä on tyypillisä ongelmia kosteuden, liitosten ja stabiliteetin suhteen. Ensimmäisten tuulivoimaloiden turbiinien siivissä käytettiin terästä, mutta se ei ollu kovin kestävä vaihtoehto. Teräs on myös suhteellisen painava materiaali tuuliturbiinikäyttöön, mikä rajoittaa turbiinien käyttökohteita. Tänä päivänä erilaiset komposiittimateriaalit ovat yleistyneet turbiinien siivissä. Niiden korkea vahvuus, jäykkyys ja muovattavuus ovat tehneet niistä yleisesti käytetyn siipimateriaalin. (Sutherland 1999, 3.)

3.1 Materiaalin vaatimukset tuuliturbiinikäytössä

Kun tuuliturbiini otetaan käyttöön, turbiinin siivet joutuvat koviin olosuhteisiin. Asennuspaikasta riippuen lämpötilan vaihtelu voi olla –40–35 ºC. Siivet altistuvat auringon ultraviolettisäteilylle, myrskytuulille, happosateille sekä merelle asennetut suolaiselle merivedelle. Luonnonvoimien lisäksi siipien tulee kestää pyörimisestä aiheutuvat tangentiaaliset ja aksiaaliset voimat. Siipiin muodostuu myös erilaisia värinöitä ja siipien sisäiset jännitykset rasittavat materiaaleja. Uusissa turbiineissa siipien kärkinopeudet ovat suuria ja isoissa turbiineissa siipien pituus ylittää 100 metriä, mikä aiheuttaa suuren väännön materiaaliin.

Suurin osa väsymisestä johtuvista hajoamisista aiheutuu tuuliturbiinin siipien materiaalin väsymisestä. Turbiinin komponentit joutuvat kestämään $4x10^8$ rasitusjaksoa. Tämä on paljon pidempään, mitä vaaditaan suurimmalta osalta ihmisten rakentamia laitteita tai rakennelmia. Kauemmin kuin lentokoneet, sillat tai auton moottorit. Rasitusjaksolla tarkoitetaan rasitusten ja voimien jakautumista kappaleeseen ajan kuluessa. Materiaalin väsyminen päätellään kohdistamalla kappaleeseen rasitusta määrätyn jakson ajaksi. Näitä jaksoja tehdään niin monta kunnes materiaali hajoaa. Vakioamplitudilla tehtävässä

testissä kappaleeseen kohdistetaan rasitusjaksoja vakiovoimakkuudella. Kuvassa (6) on esitetty rasitusjakson suuruus rasitusjaksojen lukumäärän funktiona eri laitteille. (Uysal 2009, 2–3.)



Kuva 5. Rasitusjaksojen määrä suhteessa rasitumäärään jaksoa kohti lentokoneelle, helikopterille ja tuuliturbiinille. (Sutherland 1999, 2.)

3.2 Joustava siipimateriaali

Joustava siipimateriaali lisää vaatimuksia materiaalille. Siiven tulee joustaa tarpeeksi, mutta se ei kuitenkaan saa joustaa liikaa tai hajota. Materiaalin jäykkyyden lisäksi siiven muodonmuutokseen käytön aikana vaikuttaa sen pyörimisnopeus sekä ilman virtausnopeus ja turbulenssi. Joustavarakenteisen tuuliturbiinin suunnittelu laajalle käyttöalueelle on todennäköisesti vaikeampaa kuin jäykkärakenteisessa, koska joustava materiaali tulee suunnitella määrätyille voimille oikean joustomäärän saamiseksi. Jos siipeen vaikuttavat voimat ovat pienemmät tai suuremmat, kuin mille siipi on suunniteltu, niin se vaikuttaa siiven muodonmuutokseen. Tätä voisi koittaa kiertää siipeen asennettavalla tekniikalla, joka auttaa siipeä adaptoitumaan erilaisiin tuuliolosuhteisiin, tai säätämällä siiven muotoa elektronisesti. Tekniikan lisääminen siipeen lisää sen painoa ja valmistuskustannuksia. Lisäksi turbiinin tasapainotus hankaloituu, sillä joustavan materiaalin massakeskipiste muuttuu jouston mukaan.

Joustava siipirakenne tulee suoraan luonnosta. Hyvänä esimerkkinä ovat lepakot, joilla on ohuet ja joustavat membraanit siivet. Värähtelyt membraanissa siivessä aiheuttaa muutoksia ilman virtaukseen siiven ympärillä. Vaatimuksena tälläiselle siivelle on ominaisuus siirtää energiaa virtaukseen, mikä auttaa energian siirtymistä siiven

rajakerroksen ja vapaavirtauksen välillä. Siiven muotoa muuttamalla voidaan siiven kohtauskulmaa muuttaa, joka mahdollistaa suuremman maksiminostovoiman. Tälläiset siivet parantavat lento-ominaisuuksia matalilla ja keskimatalilla Reynoldsin luvuilla 10000–100000. (Bleischwitz et al 2017, 1.)

Membraania siipeä ja maaefektin vaikutuksia on tutkittu mahdollisuutena lennokkien aerodynamisten lento-ominaisuuksien parantamiseen. Samat perusperiaatteet pätee myös turbiinin siivissä, joten olisko mahdollista joustavalla siivellä parantaa turbiinin siipien aerodynaamisia ominaisuuksia.

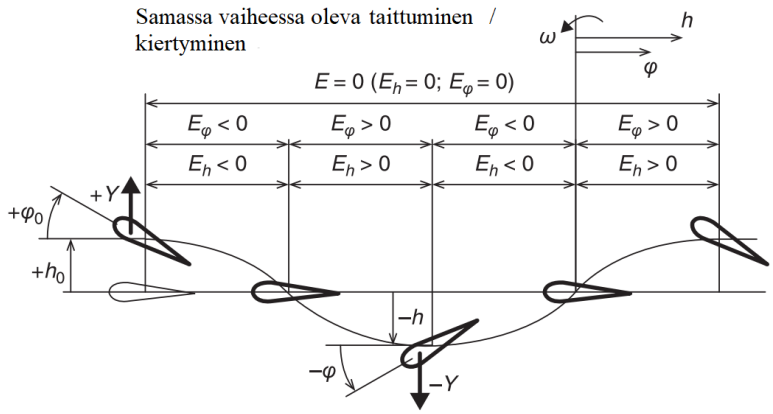
Fluidin aiheuttamia muodonmuutoksia joustavassa siivessä kutsutaan aeroelastisuudeksi. Sillä tarkoitetaan fluidin ja joustavan kiinteän kappaleen välistä vuorovaikutusta. Yleisesti aeroelastisuudesta puhutaan lentokoneiden yhteydessä, mutta se on tärkeänä osana myös konetekniikassa, siltojen ja rakennusten suunnittelussa sekä muiden ajoneuvojen suunnittelussa. Aeroelastisuus jaetaan staattiseen ja dynaamiseen aeroelastisuuteen. Staattisella aeroelastisuudella tarkoitetaan jatkuvien aerodynaamisten voimien ja elastisten voimien keskinäistä vuorovaikutusta. Staattinen aeroelastisuus aiheuttaa kiertymäpoikkeaman, missä materiaali kiertyy staattisten rasitusten vaikutuksesta. Tämä lisää siiven efektiivistä kohtauskulmaa, mikä aiheuttaa ylimääräisen nostovoiman siipeen. (Čečrdle 2015, 1–12.)

Dynaaminen aeroelastisuus taas aiheutuu epävakaista aerodynaamisista voimista, inertiavoimista ja elastisista voimista. Siihen kuuluu muun muassa lepatus (flutter), dynaamisen voiman aiheuttama aeroelastinen reaktio, säädettävä aeroelastisuus sekä dynaaminen vakautus ja hallinta. (Čečrdle 2015, 6–7.)

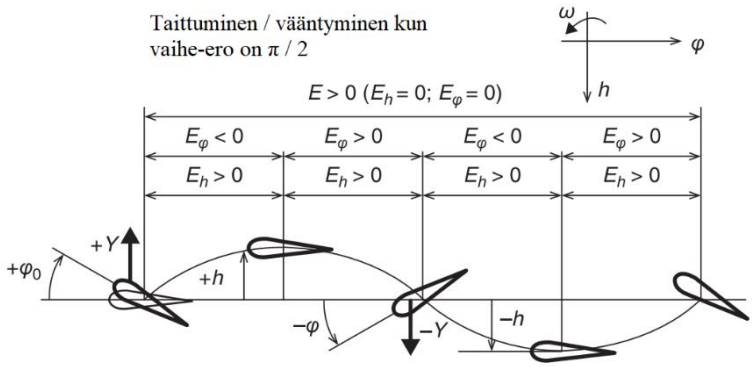
Lepatus saa energiansa ilmavirtauksesta. Se on itseään ruokkiva ilmiö ja sen mahdollistaa häiriöt aeroelastisessa systeemissä, jotka ovat alttiita aerodynaamisen kuorman oskillaatioon. Oskillaation aiheuttaa ilman pyörteilyn resonanssit. Liikkeen kriittisessä vaiheessa ilmavirrasta siipeen siirtyvä energian määrä vastaa siiven sisäisten värinää vaimentavien voimiin kuluvaa energiamäärää. Pienillä nopeuksilla värinä vaimenee ja siipi pysyy vakaana, mutta suuremmilla nopeuksilla värinä aiheuttaa epävakautta systeemiin. Koska värinä on itseään ruokkiva ilmiö, niin sen aiheuttaman värinän amplitudi voi teoriassa kasvaa lyhyessä ajassa kuinka suureksi vain. Tämä aiheuttaa

siipiprofiiliin muodonmuutoksia, materiaalin väsymistä ja pahimmassa tapauksessa siiven hajoamisen. (Čečrdle 2015, 7–11.)

Siiven kuorman aiheuttama harmoninen liike ja sen vaikutus nostovoimaan, Y on esitetty kuvissa (7–8). Siiven taittumisen ja kiertymisen siirtymä on esitetty koko jakson ajalta. Kuvassa (7) taittuminen ja kiertyminen ovat samassa vaiheessa keskenään ja kuvassa (8) ne ovat eri vaiheissa. Samassa vaiheessa tapahtuvassa taittumisessa ja kiertymisessä jakson kokonaisenergia, E on nolla. Eri vaiheessa tapahtuvan taittumisen energia, E_h ja kiertymisen jakson energia, E_φ ovat positiivisiä. Positiivinen energia mahdollistaa siivessä aiheutuvan lepatuksen. (Čečrdle 2015, 6–10.)



Kuva 6. Samassa vaiheessa tapahtuva taittuminen ja kiertyminen. E_h on taittumisen energia, E_φ on kiertymisen energia ja Y on nostovoima. (Čečrdle 2015, 9.)



Kuva 7. Eri vaiheissa olevat taittuminen ja kiertyminen. (Čečrdle 2015, 9.)

Aeroelastinen reaktio dynaamisiin kuormiin aiheutuu epävakaista voimista, kuten turbulenssista ja tuulenpuuskista. Se aiheuttaa vastareaktion joustavassa siipirakenteessa, mikä johtaa siiven muodonmuutokseen. (Čečrdle 2015, 12.)

Säädettävällä aeroelastisuudella tarkoitetaan servomoottoreilla säädettävää siiven muodonmuutosta. Esimerkkinä lentokoneen siivessä olevat siivekkeet, joilla säädetään siiven efektiivistä pinta-alaa nousu- ja laskuvaiheessa. Muuttamalla siiven muotoa voidaan myös lisätä siiven vakautta. (Čečrdle 2015, 12.)

Membraanin siiven värähtelyä ja siiven aeroelastista lepatusta on tutkittu, mutta vielä ei olla päästy varmuuteen, millä tavalla aeroelastinen lepatus esiintyy membraanissa siivessä. Sygulski (2007, 198) tutki kahdesta päästä kiinni olevaa membraania kumia ja huomasi sen värähtelevän, kuin siinä olisi seisova aaltoliike. Hän päätteli tämän värähtelyn olevan hajaantunutta aeroelastista lepatusta. Jotkut tutkijat ovat myös sitä mieltä, että aeroelastinen lepatus ilmenee membraanissa siivessä siinä vaiheessa, kun siiven positiivinen vaimennus loppuu. (Wu et al 2015, 656–657.)

Esimerkki joustavasta materiaalista valmistetulle siivelle on NASA:n suunnittelema HALE-lennokki. Se on suunniteltu lentämään mahdollisimman pitkälle, mahdollisimman vähällä. HALE:n siipien kärkiväli on 75 metriä ja muotosuhde 30. Lennon aikana lennokin siivet muuttavat paljon muotoaan staattisen ja dynaamisen aeroelastisuuden vaikutuksista. Kuvassa (9) on HALE-lennokki. (Schoř 2017, 271–272.)

Kuva 8. Joustavilla siivillä varustettu HALE-lennokki. (Schoř 2017, 272.)

4 TURBIININ SUUNNITTELU JA VALMISTUS

Turbiinit suunnitellaan ja mallinnetaan Solidworks-ohjelmistolla. Turbiinin äärimittoihin vaikuttavat tuulitunnelin koko ja valmistuksessa vastaan tulevat rajoitukset. Tuulitunnelin mitat ovat 50 cm x 25 cm x 40 cm. Turbiinin materiaalivaihtoehdoiksi mietitään ohuesta metallilevystä muotoiltua tai muovista 3D-tulostimella tulostettua turbiinia.

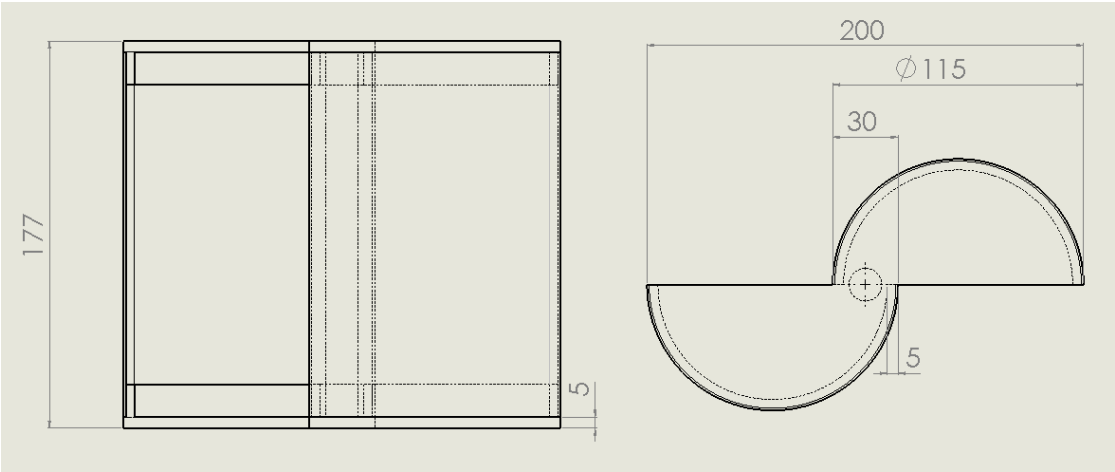
Helppouden ja hinnan perusteella päädytään 3D-tulostettuun vaihtoehtoon. Yliopiston tiloissa sijaitsevasta Jamie Hyneman center -työpajasta löytyy 3D-tulostin, jota voi käyttää tässä projektissa. Tulostimena käytetään FDM-tyyppistä Prusa i3, MK3 -tulostinta. Tulostimessa käytetään 0,4 millimetrin suutinta ja 1,25 millimetriä paksua filamenttia. Tulostimen valinnan jälkeen loput valmistettavien kappaleiden äärimitat tulevat tulostimen tulostusmahdollisuuksien mukaan. Prusan i3 -tulostimella suurin kappalekoko on 21 cm x 21 cm x 25 cm. Turbiinille valitut ominaisuudet ja mittasuhteet on esitetty taulukossa (2).

Taulukko 2. Taulukossa turbiinin mittasuhteet

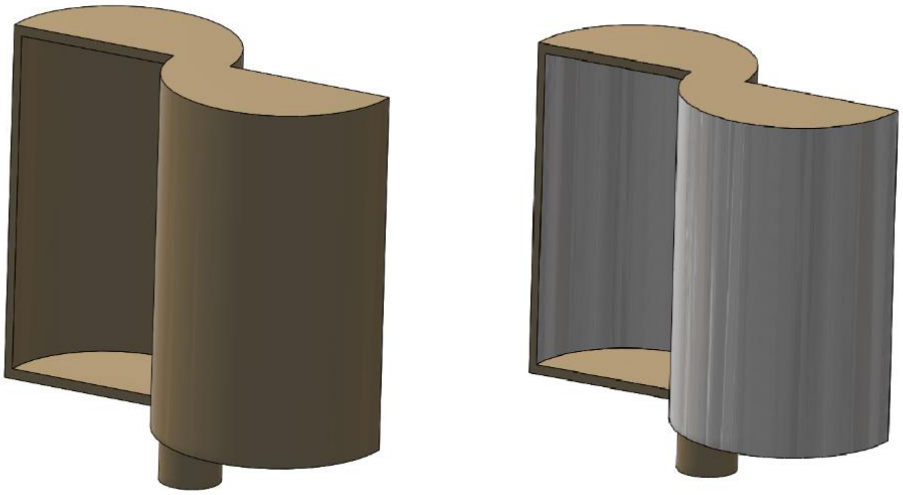
Siipien määrä	2
Muotokerroin	0,88
Päällekkäisyyssuhde	0,15

Turbiinista suunnitellaan kaksi erilaista versiota. Toinen on täysin jäykkä ja toinen osittain joustavasta materiaalista valmistettu. Joustavaksi materiaaliksi valitaan millimetrin paksuinen kumimatto. Se leikataan sopivan kokoiseksi ja kiinnitetään jäykkään turbiiniosaan liimaamalla. Ainoa ero näiden kahden turbiinin välillä on siiven paksuudessa. Jäykkä siipi on viisi millimetriä paksu ja joustava siipi on yksi millimetriä paksu. Ero johtuu siitä, että joustava materiaali ei olisi ollut tarpeeksi joustavaa paksumpana eikä jäykkä materiaali olisi ohuempana kestänyt. Joustavan materiaalin olisi voinut valmistaa myös jostakin sopivasta komposiittimateriaalista niin olisi turbiinit saatu identtisiksi, mutta oikean materiaalin etsiminen olisi vaatinut oman tutkimuksensa sekä turbiinin hinta olisi noussut liian korkeaksi.

Näiden lisäksi turbiinille suunnitellaan akseli, teline ja telineeseen suunnitellaan kaksi paikkaa laakereille. Teline on 10 cm korkea ja akselin paksuudeksi tulee 25 mm. Laakereiksi valikoitui akselin paksuuden ja arvioidun turbiinin pyörimisnopeuden perusteella 16005-kuulalaakerit. Niiden ulkohalkasija on 47 mm ja sisähalkaisja 25 mm. Kuvissa (9–10) on esitetty turbiinin mitat ja joustavan ja jäykän turbiinin eroavuudet.



Kuva 9. Kuvassa on turbiinin mitat edestä ja ylhäältä. Mitat on millimetreissä.



Kuva 10. Solidworks-ohjelmalla piirretyt Savonius-turbiinit. Oikealla puolella olevassa turbiinissa harmaat osat ovat joustavasta materiaalista valmistettu.

4.1 3D-tulostaminen

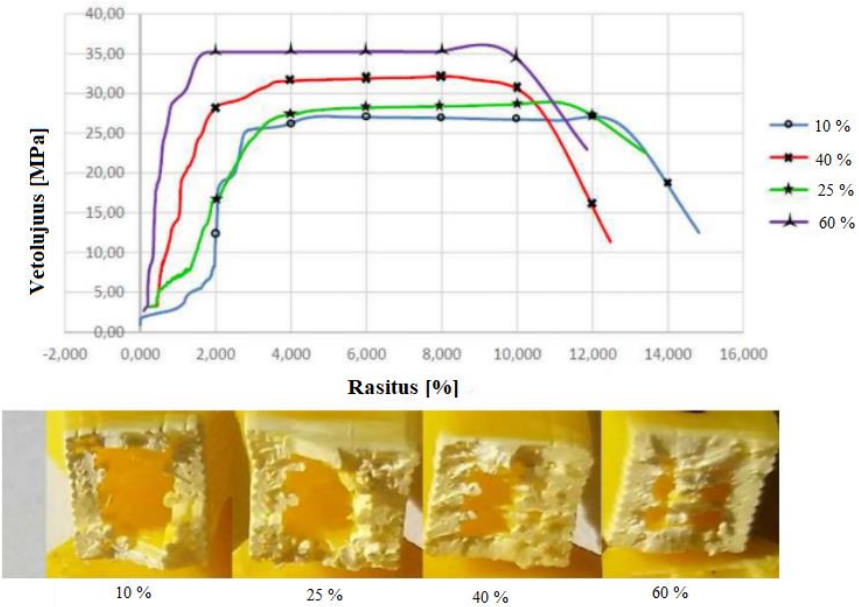
Kappaleet tulostetaan Prusa i3, mK3 -tulostimella. Kuvassa (11) on esitetty työssä käytetty tulostin.

Kuva 11. Kuvassa Prusa i3 MK3 -tulostin. Tulostettu kappale on tulostusalustalla ja tulostimen päällä on rulla oranssia filamenttia. (3d printing industry.)

Tulostukseen käytetään FDM-tulostinta, eli fused deposition modeling -tulostinta. FDM-tulostimet ovat yleisimpiä tulostintyyppejä markkinoilla. FDM-tekniikka käyttää tulostamiseen muovilankaa, jota kutsutaan filamentiksi. Filamentit toimitetaan yleensä rullissa, joista ne on helppo käyttää. Filamenttejä on eri paksuuksia, mutta yleisin paksuus on 1,75 millimetriä. FDM-tulostimessa askelmoottori syöttää filamenttia johdinta pitkin kuumaan suuttimeen missä se sulaa. Tämän jälkeen sula materiaali pursotetaan suuttimen läpi tulostusalustalle. Tulostimen toimintaperiaate perustuu kerroksittaiseen tulostamiseen. Tulostin tulostaa yhden kerroksen kerrallaan ja tämän jälkeen jo jähmettyneen kerroksen päälle tulostetaan toinen kerros. Tämä aiheuttaa sen, että kappaleen pintaan jää näkyville kerrosten rajat. FDM-tulostuksen etuna on kuitenkin sen edullisuus, helppokäyttöisyys eikä tulostuksessa tarvitse käyttää voimakkaita kemikaaleja. (Lohilahti 2018.)

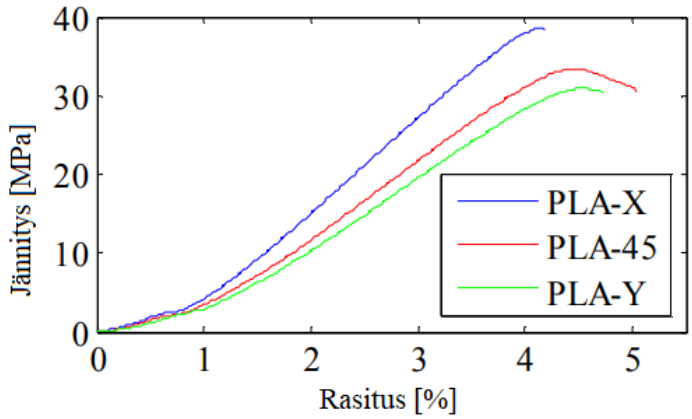
Tulostetun kappaleen kestävyyteen vaikuttaa useat tekijät, muun muassa kappaleen seinämäpaksuus, tulostussuunta, kappaleen täyttöaste, tulostuksen päällekkäisyys, kuinka hyvin kappaleen kerrokset ovat liimautuneet toisiinsa sekä kappaleen täytön

ominaisuudet. Suuri osa näistä määräytyy tulostusnopeuden, filamentin syöttönopeuden sekä tulostuslämpötilan perusteella. Kappaleen täyttöasteella tarkoitetaan prosenttiosuutta, kuinka suuri osa kappaleen seinämien sisälle jäämästä alueesta täytetään. Täyttöaste vaikuttaa merkittävästi tulostukseen kuluvaan aikaan ja kappaleen vaatimaan materiaalimäärään. Kuvassa (12) on vertailtu PLA-materiaalista tulostettujen kappaleiden kestävyyttä eri täyttöasteilla. Kuvassa on myös esitetty katkenneiden kappaleiden poikkileikkaukset. (Ćwikla et al 2017, 3–4.)



Kuva 12. Kuvassa kappaleen kestämä rasitus ja kappaleen vetolujuus eri täyttöasteilla. (Ćwikla et al 2017, 5.)

Kuvasta (12) huomataan, kuinka täyttöasteen lisäys tekee kappaleesta jäykemmän ja kappaleen kestävyyteen vaikuttaa täyttöasteen tiheys. Kappaleen tulostussuunta vaikuttaa kappaleen kestävyyteen sillä perusteella, kuinka hyvin tulostetut kerrokset tarttuvat toisiinsa. Paras kestävyys saavutetaan, kun tulostetaan x-suunnassa, eli pursotussuunnan mukaisesti. Tällöin sula muovi on liimautunut vierekkäin, joten kerrosten väleihin ei kohdistu samanlaista rasitusta. Kuvassa (13) on esitetty PLA-muovin kestävyyttä eri tulostussuunnissa.



Kuva 13. Eri suuntaan tulostettujen kappaleiden kestävyys. Tulos x- ja y-suuntaisesti sekä 45 asteen kulmassa. (Afrose 2014, 34.)

Kuvasta (13) huomataan, kuinka pituussunnassa tulostettu kappale kestää parhaiten jännitystä. Tähän työhön kappale tulostetaan y-suuntaisesti, koska se tekee tulostujäljestä paljon parempaa ja vaati tästä johtuen vähemmän viimeistelyä tulostamisen jäljiltä. FDM-tulostimet eivät kykene tulostamaan tyhjän päälle suurissa kulmissa vaan vaativat tätä varten tulostusalustaan tulostettavat tukirakenteet. Tukirakenteiden lisääminen kuluttaa enemmän materiaalia ja lisää merkittävästi tulostamiseen kuluvaa aikaa. Lisäksi tukirakenteen päälle tulostetut kerrokset ovat fyysisesti liimautuneet tukirakenteeseen kiinni ja irrottaminen jättää kappaleen pinnan rosoiseksi. Varsinkin turbiinin pyöreän akselin, pyöreiden laakereiden, sekä turbiinissa oleva pyöreä paikka akselille vaativat tarkan tulostuslaadun, jotta kappaleet menevät paikoilleen tulostamisen jälkeen. Koska turbiinin osat täytyy tulostaa pystyssa, niiden täyttöaste nostetaan 60 % kestävyyden takaamiseksi. Kokonaisuudessaan tulostaminen kestää noin 5 vuorokautta ja materiaalia siihen kuluu noin 1,2 kg.

4.2 Tulostusmateriaalit

Yleisimmät ja eniten käytettyt materiaalit FDM-tulostimissa on Acrylonitrile budiene strene (ABS) ja Polylactic acid (PLA). Erilaisia materiaaleja ovat esimerkiksi, High impact polystyrene (HIPS), Nylon, Polyethylene terephthalate glycol (PETG), Thermoplastic polyurethane (TPU) ja monia muita, mutta valinta tähän projektiin tehdään ABS:n ja PLA:n väliltä niiden edullisuuden ja saatavuuden perusteella.

PLA on kaikista eniten käytetty materiaali FDM-tulostimissa. Se on hajuton eikä se vaadi korkeita tulostuslämpötiloja. Lisäksi sitä voidaan tulostaa ilman lämmitettyä koteloa. Yleisesti PLA:n tulostamiseen käytetty suuttimen lämpötilä on 178–240 asetetta ja sen vaatima tulostusalustan lämpötila 0–60 astetta. Eri valmistajan materiaalit ovat kuitenkin erilaisia niin jokaiselle materiaalille ja tulostimelle täytyy etsiä sopiva lämpötila. PLA on helppo tulostaa ja sillä saadaan hyvää tulostuslaatua. Se on ominaisuuksiltaan jäykkää, mutta väännön alla murtuu helposti. PLA on biohajoava materiaali, joten ulkokäyttöön sitä ei suositella. (Rogers 2015.)

ABS on yleinen teollisuudessa käytetty muovi. Tunnettuja ABS-muovista valmistettuja esineitä on Lego-palikat. ABS on paljon vaikeampi tulostaa kuin PLA ja se vaatii tulostimelta korkeamman suuttimen lämpötilan sekä korkeamman tulostusalustan lämpötilan. ABS vaatii myös lämmitetyn kotelon ettei kappale vääristy tai hajoa liian nopeasti jäähtyessään. ABS:n suositeltu tulostuslämpötila on 255 astetta ja alustan lämpötila 80–110 asteen välillä. ABS on jäykkä ja kestää vääntöä hyvin, mutta tulostetteassa siitä irtoaa hajuja sekä ihmisille haitallisiaa hiukkasia. ABS-muovia tulostettaessa täytyy huolehtia rittävästä ilmanvaihdosta aiheuttamatta kuitenkaan lämpötilavaihtelua joka vaikuttaa negatiivisesti tulostuslaatuun. (Prusa3d.)

Tulostusmateriaaliksi valitaan PLA sen hinnan, saatavuuden, helpon tulostettavuuden sekä sen jäykkyyden vuoksi.

5 CFD-MALLINNUS

Computational fluid dynamics, CFD on laskennallista virtausmekaniikkaa, joka suoritetaan tietokoneiden avulla. Se perustuu numeerisiin laskentametodeihin, missä tietokone ratkaisee iteratiivisesti fluidien välisiä interaktioita erilaisia turbulenssimalleja hyödyntämällä. CFD-mallinnuksessa kaikki pinnat määritellään ja niille asetetaan raja-arvot. Navier-Stokes:n yhtälöitä hyödyntämällä ohjelma ratkaisee jatkuvia tai muuttuvia tiloja. (Tillman et al 2012, 279–280.)

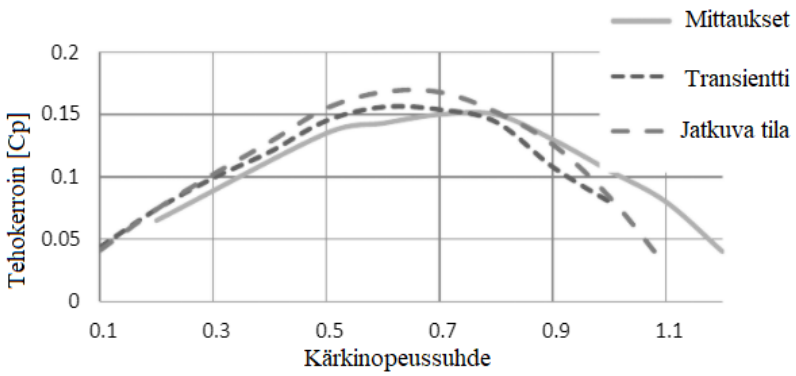
CFD-mallinnuksessa voidaan käyttää tutkimuksen vaatimuksista riippuen yksinkertaisempia yksiyhtälöisiä turbulenssimalleja tai sitten monimutkaisempia moniyhtälöisiä malleja. Ferrari et al (2016, 6) vertasivat yksiyhtälöistä ja kaksiyhtälöistä turbulenssimallia SST-malliin. Siinä verrattiin mittaustuloksiin eri turbulenssimallien tuottamia painekertoimia ja momenttikertoimia kärkinopeussuhteella 0,81. Tuloksena oli, että yksi- ja kaksiyhtälöiset mallit aliarvioivat tuloksen 10 % SST-mallia enemmän.

Faruk (2017, 238) tutki SST-mallin ja mittaustulosten eroa kärkinopeussuhteella 0,71. Tuloksena oli, että SST-malli yliarvioi tuloksen 4,7 % mittaustuloksiin verrattuna. Tämän perusteella tähän työhön valitaan turbulenssin mallinnukseen SST k-ω -malli, joka pohjautuu Reynold shear stress transport (SST) -malliin. Sen soveltuvuus Savonius-turbiinin simulointiin on hyvä eikä se ole laskennallisesti niin vaativa kuin monimutkaisemmat turbulenssimallit, jotka ovat laskennallisesti aivan liian vaativia suhteutettuna tähän työhön.

SST k-ω on kaksiyhtälöinen turbulenssimalli, joka toimii myös matalilla Reynoldsin luvuilla ilman lisämääritteitä. Se yhdistää k-ε- ja k-ω-mallien parhaat puolet. K-ε-mallia käytetään vapaavirtaustilanteissa niin saadaan kumottua k-ω-mallin yliherkkyys sisääntulon turbulenssin ominaisuuksissa. K-ω-mallia käytetään tilanteissa, joissa virtaus irtaantuu tai tilanteissa, missä on sille epäsuotuisia painegradientteja. (Moushine et al 2018, 752.)

Tässä työssä käytetään laskennassa steady state -mallinnusta, eli tila pysyy muuttumattomana eikä muutu ajan suhteen. Transientti simulaatio laskee tarkemmin turbiinin pyörimisestä aiheutuvia ilmiöitä fluidissa, mutta se vaatii laskennallisesti paljon

enemmän resursseja. Samiran et al (2013, 272) mukaan jatkuva tila aiheuttaa ylikorostuneen tuloksen matalilla ja keskikorkeilla kärkinopeussuhteilla. Kuvassa (16) on vertailtu jatkuvan ja transientin simulaation tuloksia mittaustuloksiin.



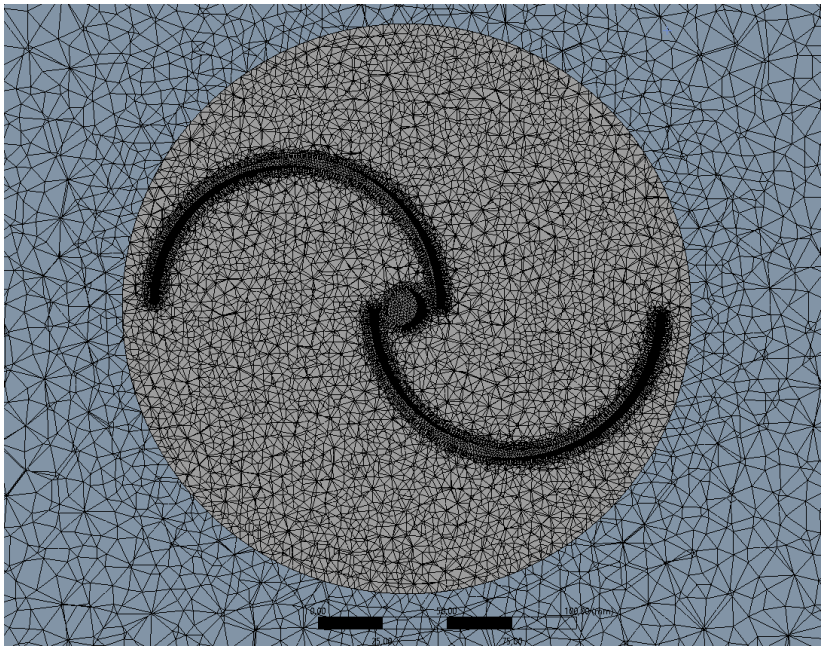
Kuva 14. Transientin ja jatkuvan tilan ero mittaustuloksiin eri kärkinopeussuhteilla. (Samiran et al 2013, 272.)

5.1 Laksentahila ja laskenta-alue

Tässä työssä käytetään turbiinin laskentahilan luomiseen ja tulosten analysointiin. Ansys-ohjelmiston versiota 2020 R2.

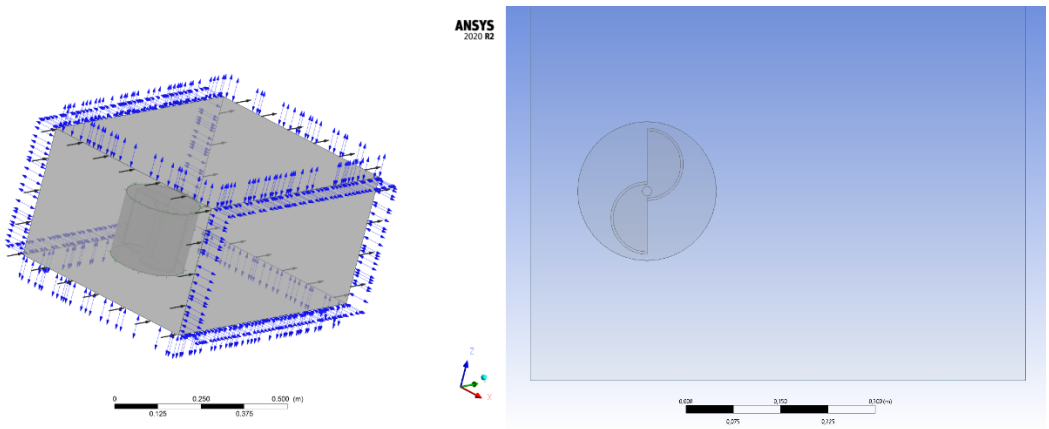
Turbiinin ympärille muodostettavaa laskenta-aluetta mietittäessä tulee ottaa huomioon, ettei sen seinämät ole liian lähellä mitattavaa kohdetta ja vaikuta tulokseen. Lisäksi alueen ei ole järkevä olla liian iso, koska se lisää solmujen määrää ja laskenta-aikaa merkittävästi.

Aluksi turbiinin geometria tuodaan Solidworks-ohjelmasta Ansyksen Design Modeler -ohjelmaan. Sisääntulo on 18,5 cm etäisyydellä turbiinin keskipisteestä ulostulo on 60 cm etäisyydellä turbiinin keskipisteestä. Turbiinin ympärille tehdään sylinterin muotoinen pyörivä laskenta-alue, jonka halkaisija on 22 cm ja korkeus 18,5 cm. Sisemmän laskenta-alueen elementtikoko on 5 mm ja ensimmäisen kerroksen etäisyys seinämästä on 0,3 mm. Laskentahilan kasvukerroin seinämästä on 1,1. Sisemmän laskenta-alueen ympärille tehdään suorakulmaisen särmikkään muotoinen laskenta-alue, jonka mitat ovat 78,5 cm x 40 cm x 60 cm. Sen elementtien koko on 8,5 mm ja kasvukerroin 1,85. Kuvassa (15) on esitetty elementtien jakautuminen sisemmällä laskenta-alueella ja sen ulkoreunoilla.



Kuva 15. Poikkileikkaus sisemmästä laskenta-alueesta ja sen ympäristöstä.

Laskenta-alueille asetetut tärkeimmät reunaehdot ovat sisääntulolle: sisääntulo määritellään virtausnopeuden perusteella ja sen turbulenssin intensiteetti on 1 %, lämpötila 18 astetta ja fluidina on ilma ideaalikaasu. Laskenta-alueiden välissä on rajapinta ja sisemmän laskenta-alueen seinämät ovat sileitä. Ulomman alueen reunat ovat symmetria-reunaehdolla ja ulostulo on määritellään paineen mukaan ja sen referenssipaine on 0 Pa. Paineeksi simulaatiossa on asetettu 101,3 kPa. Kuvassa (16) on esitetty laskenta-alueet.



Kuva 16. Laskenta-alueet.

Laskentahilalle tehdään hilatarkastelu, jossa analysoidaan laskentahilan riittävyyttä suorittamalla simulointi kolmella eri hilatiheydellä. Taulukossa (3) on esitely eri laskenta-alueet, niiden elementtien määrä sekä vertailtu vääntömomentin muuttumista elementtien määrän kasvaessa.

Taulukko 3. Taulukossa on vertailtu kolmea eri laskentahilaa.

Hilatiheys	**Elementtien määrä [kpl]**	**Sisempi laskenta-alue [kpl]**	**Ulompi laskenta-alue [kpl]**	**Vääntömomentti [mNm]**
Harva	2 598 994	2 375 135	193 859	0,1
Keskitiheä	3 634 112	2 645 950	892 429	4,0
Tiheä	4 091 113	3 051 647	1 039 466	4,3

Taulukosta (3) huomataan, että tiheän ja keskitiheän hilan välillä vääntömomentti muuttuu enää 9,3 %. Kun verrataan harvan ja keskitiheän hilan eroa tiheän ja keskitiheään, niin päätetään, että käytössä oleva tiheä hila on riittävä simuloinnin toteutukseen.

5.2 Numeerisessa analysoinnissa tapahtuvat virheet

Numeerisesti laskettua tulosta täytyy tarkastella kriittisesti. Eri vaiheessa mallinnusta saattaa syntyä virheitä, jotka muuttavat merkittävästi tuloksia. Suuremmat virheet huomaa yleensä siinä vaiheessa kun simulointi epäonnistuu tai simuloinnin monitoroinnin tulos aiheuttaa epäilystä ratkaisun epästabiliudesta. Vaikka simulointi saavuttaa sille asetetut konvergenssimääritteet niin se ei poista virheen mahdollisuutta. Yleisimpiin numeriisen laskennan virheisiin lasketaan pyöristämisvirheet, iteraatio- ja konvergenssivirheet, geometrian virheet sekä virheet diskreetin mallin luomisessa. (Marmutova 2016, 28.)

Pyöristysvirheet muodostuvat tietokoneella käytettävänä olevasta rajallisesta määrästä desimaaleja. Laskentaa voidaan suorittaa joko yksittäisellä tai tuplatarkkuudella. Tuplatarkkuutta käyttämällä desimaalien määrä lisääntyy seitsemästä 15:een. (Marmutova 2016, 28.)

Iteraatiovirheet vaikuttavat lopputulokseen vaikka konvergenssimääritteet saavutettaisiinkin. Vaikka käytetään erittäin tiheää hilaa, niin liian suuren aikavälin johdosta laskennassa saattaa syntyä virheitä, koska liian suuren aikavälin johdosta ohjelma ei pysty tarkkaan seuraamaan muutoksia fluidin liikkeissä. Konvergenssivirheitä aiheuttaa simulaation liian aikainen lopettaminen. CFD-mallinnuksessa täytyy ottaa huomioon projektin vaatimukset ja laskentaan käytettävät resurssit. Liian tiheä hila, liian tiukat konvergenssimääritteet, vaativa turbulenssimalli tai turhan monimutkainen geometria vaikuttaa kuinka vaativa ja aikaavievä laskenta on toteuttaa. Täydellinen simulaatio onkin hyvä kompromissi kaikesta. (Marmutova 2016, 28.)

5.3 Numeerisen mallinnuksen lopettaminen

Ohjelmaan täytyy määrittää milloin iteroimisen voi lopettaa ja tulos on riittävän tarkka. Tässä työssä turbiinin vääntömomentti on asetettu simulaation tarkastelupisteeksi. Sen lisäksi simulaation tarkasteluun käytetään laskenta-alueen epätasapainoja. Kun momentin muutos on alle 0,01 mNm iteraatiokerran aikana eikä epätasapainoissa tapahdu muutoksia, niin laskemisen voi lopettaa.

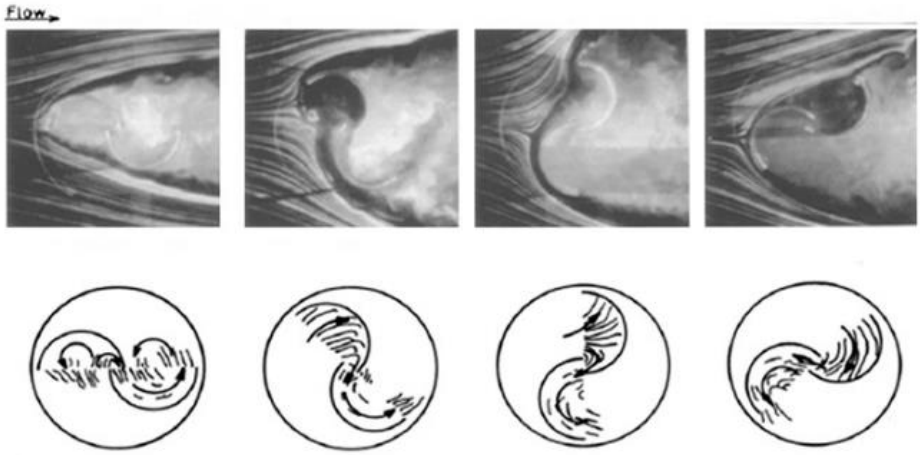
6 MITTAUKSET

Mittaukset suoritetaan tuulitunnelissa. Mittausten avulla voidaan selvittää millainen vaikutus joustavalla siipirakenteella on turbiinin toiminnan kannalta. Lopussa mittauksia verrataan tietokonesimulaation tuloksiin ja tehdään niiden pohjalta johtopäätelmiä.

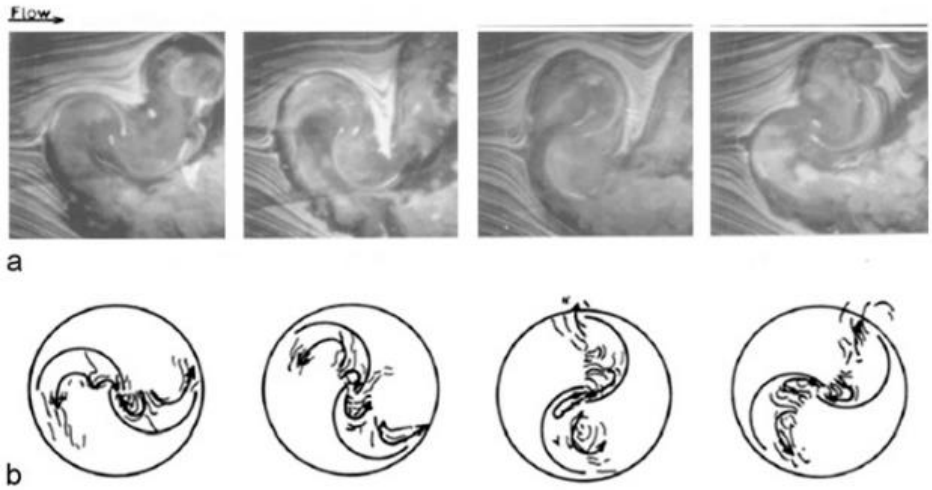
6.1 Tuulitunnelimittaukset

Tuulitunnelimittaukset on kätevä tapa testata prototyyppiä erilaisilla tuulennopeuksilla ja tuulitunnelissa voidaan tehdä mittauksia eri kokoisilla prototyypeillä. Tuulitunnelissa täytyy huomioida kappaleen aiheuttama vastus virtaukselle ja sen vaikutukset mittaustuloksiin.

Kun turbiini laitetaan tuulitunneliin, niin se aiheuttaa vapaavirtaukseen vastuksen. Tämä aiheuttaa muutoksia virtausnopeuksiin, painejakaumaan kappaleen kohdalla sekä sen ympärillä. Virtauksen ja painejakauman mallintaminen on erilaista riippuen, pyöriikö turbiini vai onko se paikallaan. Pyörivä turbiini aiheuttaa suuria häiriöitä turbiinin jälkeiseen jättövirtaukseen ja tekee turbiinin jälkeisen virtauksen mallinnuksen erittäin haastavaksi. Jättövirtauksen keskinopeus on vapaavirtausta paljon alhaisempi sekä jättövirtauksen ulkopuolinen virtausnopeus on suurempi, kuin jättövirtauksen virtausnopeus. Tämä aiheuttaa suuria paine-eroja mittausaleelle. Kuvissa (17–18) on esitetty paikallaan olevan ja pyörivän turbiinin aiheuttaman vastuksen vaikutukset virtaukseen. (Ross 2011, 524–525.)



Kuva 17. Kuvassa paikallaan oleva turbiini virtauskentässä. Kuvassa näkyy virtauksen virtaviivoja ja eri vaiheessa pyörimistä olevan turbiini aiheuttamat häiriöt virtaukseen. Virtaus vasemmalta oikealle. (Ross 2011, 525.)



Kuva 18. Kuvassa on pyörivä turbiini virtauskentässä. Kuvassa näkyy eri vaiheessa pyörimistä olevan turbiini aiheuttamat häiriöt virtaukseen. Virtaus vasemmalta oikealle. (Ross 2011, 525.)

Kappaleen aiheuttama vastuksen korjauskerroin määräytyy vastuksen aiheuttamasta virtauksen nopeuden kasvamisesta. Matalilla virtausnopeuksilla on ehdotettu tunnelin poikkileikkauspinta-alan ja turbiinin pyörähdyksen pinta-alan suhteelle 1–10 %. Pyörähdyksen pinta-ala saadaan kertomalla turbiinin halkaisija, D sen korkeudella, H. Turbiinin nopeuskojaus, V_{co} saadaan yhtälöstä:

$$V_{co} = V_u(1 + \varepsilon_t) \tag{10}$$

missä V_u on virtausnopeus vapaavirtauksessa. ε_t saadaan yhtälöstä:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{sb}\varepsilon_{wb} = \frac{1}{4}\frac{A_{turbiini}}{A_{tunneli}} \tag{11}$$

missä ε_{sb} on kiinteän kappaleen vastus

ε_{wb} on pyörivän kappaleen aiheuttama vastus

$A_{tunneli}$ on tuulitunnelin testausalueen pinta-ala

$A_{turbiini}$ on turbiinin pinta-ala edestä katsoen

Tuulitunnelikorjaus dynaamiselle paineelle, q sekä Reynoldsin luvulle, Re saadaan yhtälöistä:

$$q = q_u(1 + 2\varepsilon_t) \tag{12}$$

$$Re = Re_u(1 + \varepsilon_t) \tag{13}$$

missä q_u on dynaaminen paine vapaavirtauksessa

Re_u on Reynoldsin luku vapaavirtauksessa

Ilmanvastussuhde saadaan jättögradientin ja dynaamisen paineen avulla:

$$C_{D0} = C_{D0u}(1 - 3\varepsilon_{sb} - 2\varepsilon_{wb}) \tag{14}$$

Siipien kärkinopeussuhde saadaan korjattua nopeuskorjauksen avulla:

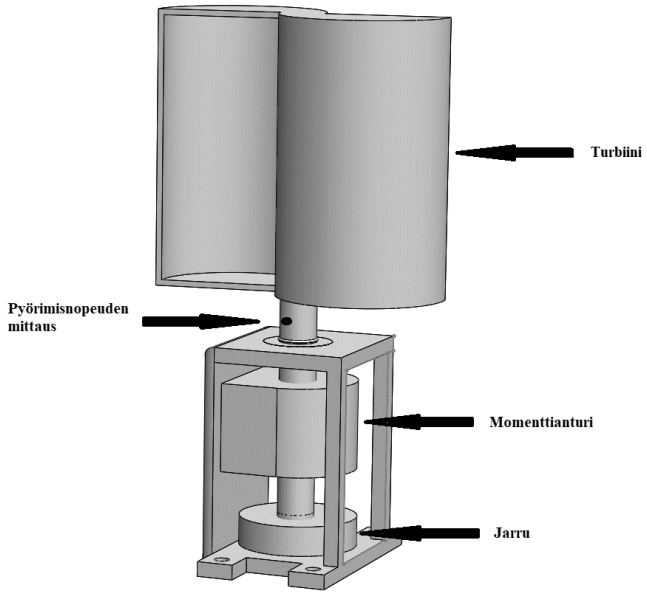
$$\lambda_{co} = \lambda\frac{1}{V_{CO}} \tag{15}$$

(Ross 2011, 526.)

6.2 Mittausten toteutus

Tässä työssä mittaukset toteutetaan energiatekniikan laboratoriossa, Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston tiloissa olevassa tuulitunnelissa. Sen mitat on 50 cm x 25 cm x 40 cm. Siinä voidaan simuloida tuulennopeuksia 30 m/s asti.

Aluksi mittausten toteutuksen ideana oli, että molempia turbiineja pyöritetään samalla tavalla erilaisilla virtausnopeuksilla ja turbiinien pyörimisnopeus sekä akseliin vaikuttama vääntömomentti mitataan. Turbiineja jarrutetaan käyttäen hystereesista jarrua (Magtrol HB-3M-2), niin saadaan mitattua turbiinien toimintakentät sekä maksimivääntömomentit. Turbiinien pyörimisnopeus mitataan takometrilla (Shimpo EE-2) ja momentin mittaamiseen käytetään momenttianturia (Straintech TP-2KCD, E). Kuvassa (19) on alun perin suunnitellut mittausjärjestelyt.



Kuva 19. Kuvassa alun perin suunniteltu mittauskokoonpano.

Covid19-epidemian takia mittaukset täytyy toteuttaa pienemmässä mittakaavassa. Mittaukset toteutetaan mahdollisimman pienellä henkilömäärällä ja niiden aikana noudatetaan annettuja hygienia- ja maskisuosituksia.

Mittauksissa pyöritetään molempia turbiineja suunnitellusti eri virtausnopeuksilla ja mitataan turbiinien pyörimisnopeudet takometrilla (Shimpo EE-2). Tuloksissa verrataan mittaustuloksia laskennallisesti saatuihin tuloksiin. Kuvassa (20) on toteutettu mittauskokoonpano. Turbiinin prototyyppi on asennettu tulostettuun telineeseen tuulitunneliin mittauksia varten ja tuulitunneliin tehdystä pienestä reijästä virtausnopeus mitataan takometrillä.

Kuva 20. Joustavasiipinen turbiini on asennettuna tuulitunneliin. (Kuva: Aki Grönman)

6.3 Mittausten virhetarkastelu

Mittauksia suoritettaessa täytyy ottaa huomioon mahdollinen virheen määrä. 3D-tulostimella tulostetun kappaleen pinta on epätasainen, joka vaikuttaa ilman virtaukseen kappaleen pinnalla. Joustavan ja jäykkärakenteisen turbiinin mitat eivät ole täsmälleen samanlaisia. Seinämäpaksuus jäykässä versiossa ja joustavassa versiossa eroavat neljä millimetriä. Lisäksi kumikankaan kiinnityskohdat turbiinissa monimutkaistaa turbiinin pinnan muotoja. Näiden vaikutusta tulee miettiä lopullisia tuloksia analysoidessa.

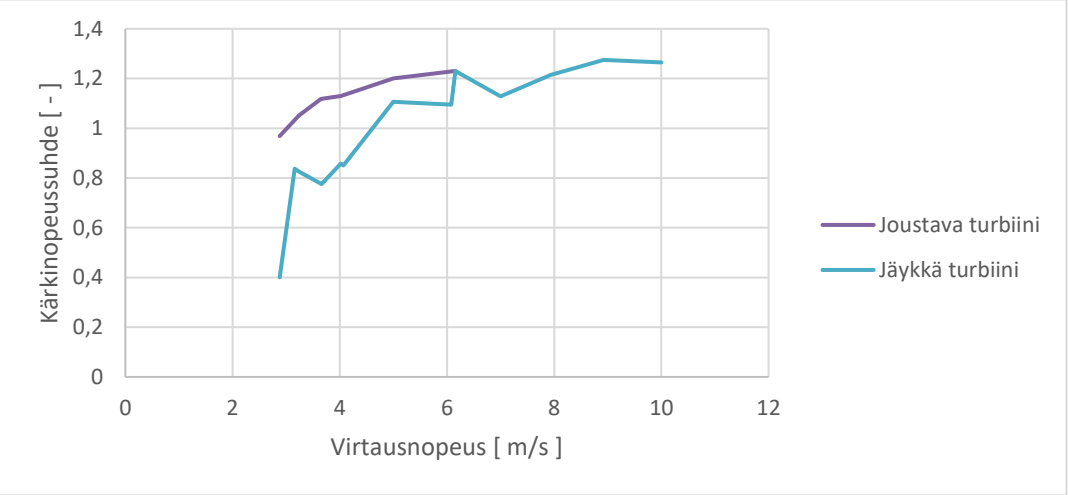
Kumikankaaseen joustavana rakenteena päädyttiin hinnan ja helpon saatavuuden johdosta. Kumikankaan paksuus oli vain yksi millimetri, mutta jäykkärakenteisen turbiinin vastaavat osat ovat viisi millimetriä paksua. PLA-muovista tulostettu yksi millimetriä paksu seinämä ei olisi jäykkä ja taas viiden millimetrin paksuisesta kumikankaasta valmistettu seinämä ei olisi tarpeeksi joustava. Joustavaan turbiiniin olisi

voinut teetättää sopivan komposiittimateriaalin testejä varten, mutta se olisi ollut liian kallista ja aikaavievää suhteutettuna tähän työhön.

Lisäksi turbiinin koko tuulitunneliin oli erittäin suuri. Suositusten mukaan turbiinin koko on suurimmillaan 30 % mitattavan alueen pinta-alasta. Päätökseen turbiinin suuresta koosta päädyttiin, että turbiinista saataisiin mitattavaa vääntömomenttia pienemmilläkin virtausnopeuksilla. Pienemmällä turbiinilla olisi pitänyt ilman virtausnopeuden olla merkittävästi suurempi, mikä ei ole turbiinin kestävyyden kannalta hyvä asia. Lisäksi suuret virtausnopeudet tuulitunnelissa olisivat mahdollisesti aiheuttaneet turbulenssiä, joka olisi vaikuttanut mittaustuloksiin.

7 TULOKSET

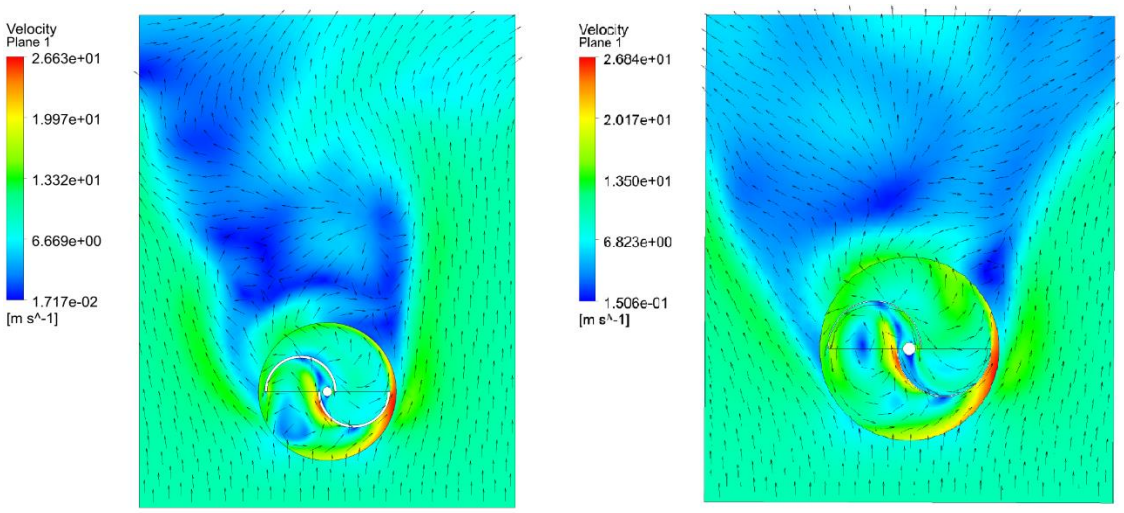
Mittauksissa testattiin jäykkärakenteista turbiinia 2,9–10 m/s virtausnopeuksilla ja joustavarakenteista turbiinia 2,9–6,2 m/s virtausnopeuksilla. Joustavarakenteista turbiinia ei testattu suuremmilla nopeuksilla, koska se alkoi täristä niin paljon, että irtosi akselistaan. Huomattiin, että joustavarakenteisen turbiinin pyörimisnopeudet olivat selvästi suurempia samoilla virtausnopeuksilla kuin vastaavan jäykkärakenteisen. Kuvassa (21) on esitetty mittauksista saadut korjatut turbiinin kärkinopeussuhteet virtausnopeuden funktiona.



Kuva 21. Kuvassa korjatut turbiinien kärkinopeudet eri virtausnopeuksilla.

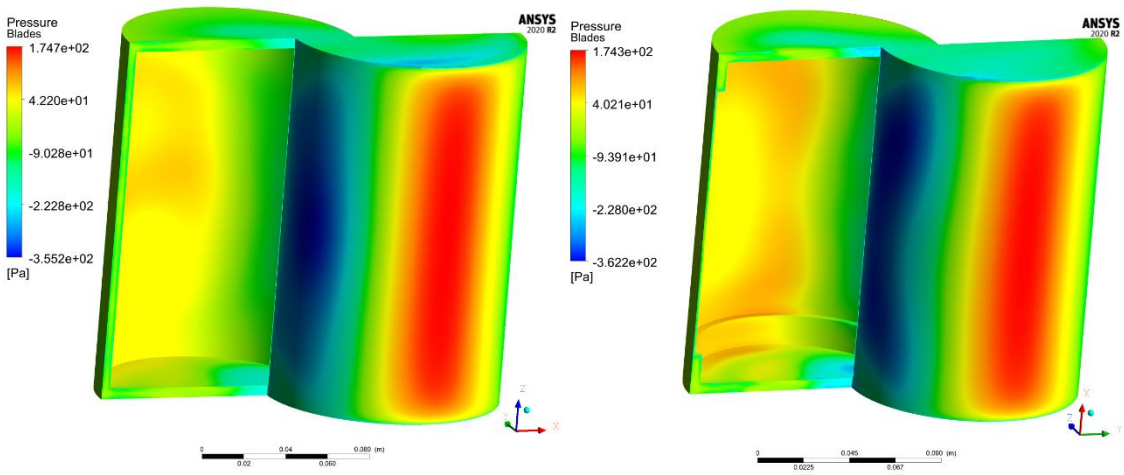
Mittaustuloksista huomattiin, että kärkinopeussuhde oli joustavarakenteisessa turbiinissa parhaillaan 142 % suurempi, kuin jäykässä versiossa. Keskiarvoltaan joustavarakenteisen turbiinin kärkinopeussuhde oli 42 % suurempi, kuin jäykkäräkenteisessa. Mittaustulosten perusteella joustava siipimateriaali lisää merkittävästi turbiinin hyötyä matalilla virtausnopeuksilla.

Joustavan turbiinin jäykän version ja jäykän turbiinin virtauskenttien eroavaisuuksia simuloitiin tietokoneella. Tuloksissa huomattiin, että eri turbiinien tuottaman vääntömomentin ero oli vain 0,5 %, kun virtausnopeus oli 10 m/s. Tämä tarkoittaa, että joustavan ja jäykän turbiinin tulokset ovat erittäin vertailukelpoisia. Kuvassa (22) on vertailussa saadut virtausnopeuskentät.



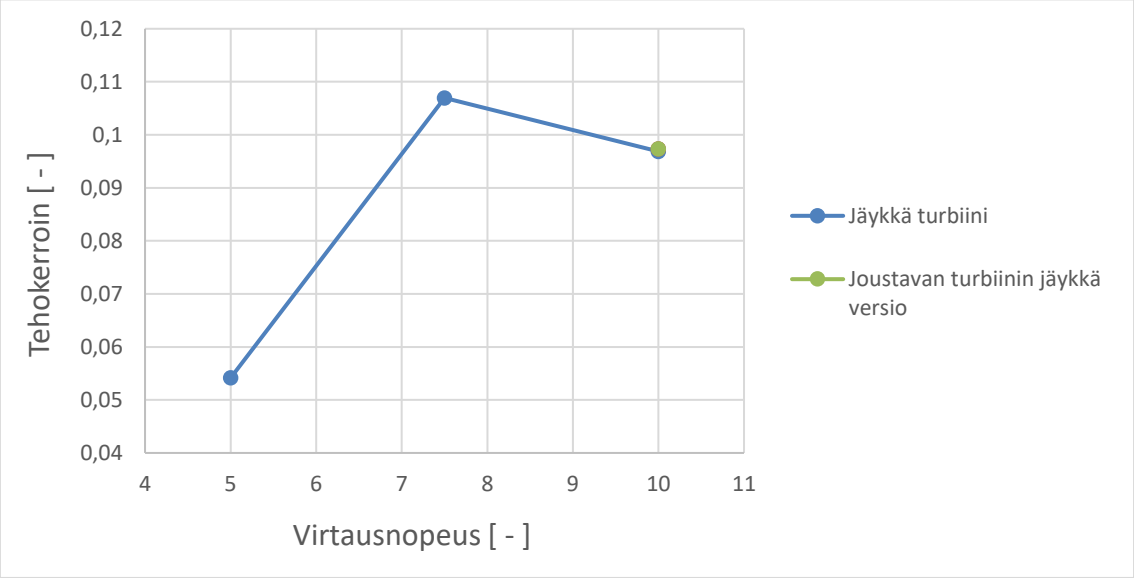
Kuva 22. Kuvassa on verrattu jäykän ja joustavan turbiinin jäykän version virtauskenttiä sekä virtasnopeuden vektoreita toisiinsa. Vasemmalla on jäykkä turbiini ja oikealla joustavan turbiinin jäykkä versio.

Kuvasta (22) huomataan, että virtauskentät sekä virtausnopeudet ovat hyvin samanlaisia. Pientä erovaisuuttaa havaittavissa turbiinin jälkeisessä virtauksessa, mutta se saattaa johtua eri vaiheessa lopetetusta laskennasta. Kuvassa (23) on esitetty jäykän turbiinin ja joustavan turbiinin jäykän version painejakaumat. Niistä huomataan, että joustavassa turbiinissa paine jakautui tasaisemmin siiven koveralle puolelle. Lisäksi joustavan turbiinin siipien päällekkäisyyspisteessä on alhaisempi paine. Tämä johtuu todennäköisesti ohuemmasta siivestä. Siipien väli ei ole täysin umpinainen vaan siinä kulkee akseli. Ohuemman siiven ja akselin väliin jää suurempi tila niin se saattaa selittää paine-erot jäykän turbiinin kanssa.



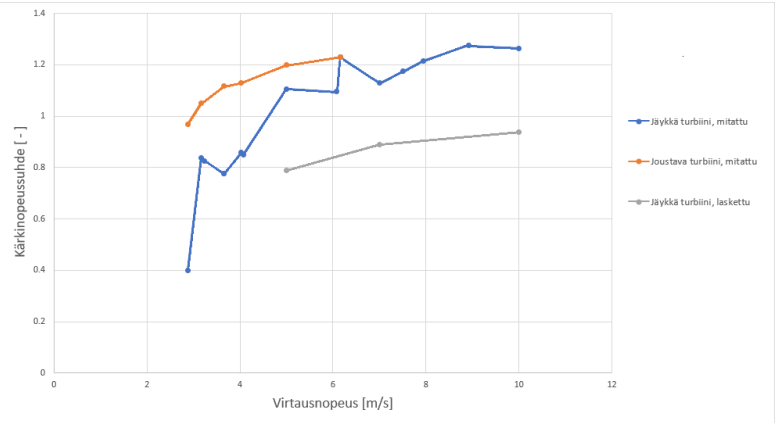
Kuva 23. Vasemmalla jäykän turbiinin ja oikealla joustavan turbiinin jäykän version painejakautumat. Virtausnopeus molemmissa on 10 m/s ja turbiinit pyörivät 25 kierrosta sekunnissa.

Kuvassa (24) on vertailtu tietokoneella simuloitua jäykkärakenteisen turbiinin tehokerrointa eri virtausnopeuksilla. Lisäksi kuvaan on merkattu joustavan turbiinin jäykän version tehokerroin virtausnopeudella 10 m/s. Kuvasta huomataan, että turbiinien dimensioeroilla ei ole merkitystä näissä mittauksissa. Lisäksi kuvasta huomataan, että jäykän turbiinin tehokerroinhuippu saavutetaan virtausnopeudella 7,5 m/s.



Kuva 24. Laskettujen tuloksien tehokerroin suhteessa virtausnopeuteen.

Kuvassa (25) on vertailtu tietokonesimulaation tuloksia mittaustuloksiin. Kuvasta huomataan, että laskennalliset tulokset mukailevat pääpiirteittäin mitattuja tuloksia. Mittauksista saaduissa tuloksissa turbiinien pyörimisnopeudet ovat todennäköisesti ylikorostuneet tuuliturbiinin seinien vaikutuksesta.



Kuva 25. Kuvassa vertailtu simuloitujen ja mitattujen tulosten kärkinopeussuhteita eri virtausnopeuksilla.

8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli tutkia joustavan siipimateriaalin toimivuutta Savonius-turbiinin prototyypin avulla. Turbiini suunniteltiin käyttämällä Solidworks-ohjelmistoa, minkä jälkeen se tulostettiin 3D-tulostimella Lappeenrannan-Lahden teknillisellä yliopistolla, Jamie Hyneman center -tiloissa. Turbiineja mitattiin tuulitunnelissa sekä simuloitiin CFD-ohjelmalla.

Työssä tutustuttiin pikaisesti tuulivoiman historiaan ja tulevaisuuteen. Tutustuttiin eri turbiinityyppeihin sekä niiden merkittävämpiin suhdelukuihin ja kriteereihin. Työssä käsiteltiin joustavan siiven aerodynaamisia ominaisuuksia, numeerista simulointia, sekä verrattiin erilaisia turbulenssimalleja. Koska mittaukset suoritettiin tuulitunnelissa, työssä käytiin läpi tuulitunnelin vaikutuksia mittaustuloksiin sekä kuinka tuulitunnelin vaikutuksia saadaan korjattua. Työssä käsiteltiin myös CFD-ohjelmiston toimintaperiaatetta ja CFD-mallinnuksessa aiheutuvia virheitä.

Mittaustulosten ja simulaatioiden perusteella joustavarakenteisen Savonius-turbiinin hyötysuhde kasvoi merkittävästi. Ero oli suurimmillaan pienillä nopeuksilla ja kaventui mitä suuremmaksi virtaus- ja pyörimisnopeudet kasvoivat. Parhaillaan mittauksissa saatiin joustavalle turbiinille 142 % suurempi kärkinopeussuhde ja keskimäärin hyöty oli 42 % jäykkärakenteiseen verrattuna. Jäykkää turbiinia pyöritettiin 2.9–10 m/s nopeuksilla. Joustavaa turbiinia mitattaessa kierrosnopeuden kasvaessa joustava turbiini muuttui epävakaaksi ja alkoi täristä niin voimakkaasti, että se irtosi akseliltaan. Tästä johtuen sen mittaukset lopetettiin, kun virtausnopeus oli 6.2 m/s.

Tietokoneella mallinnettiin molempia turbiineja jäykkärakenteisenä ja todettiin, että niiden ero vääntömomentissa oli vain 0,5 %. Tämä ero johtuu todennäköisesti siitä, että joustavassa turbiinissa on ohuemmat siivet ja sen takia siipien sisätilavuus vähän suurempi. Tuulitunnelissa tehdyissä mittauksissa turbiinien pyörimisnopeudet olivat suuria suhteutettuna ilman virtausnopeuteen, mutta tähän vaikuttaa todennäköisesti tuulitunnelin seinien läheinen vaikutus.

Tämän työn perusteella joustavarakenteinen turbiini sopisi sovelluksiin, joissa virtausnopeudet ja pyörimisnopeudet ovat matalia. Joustavalla materiaalilla saadaan

todennäköisesti parannettua Savonius-turbiinin heikkoa vääntömomenttia pienillä kierrosnopeuksilla. Joustavalla rakenteella saadaan merkittävä hyöty verrattuna jäykkärakenteiseen versioon. Suosittelen tulosten perusteella tulevaisuudessa jatkotutkimusta aiheesta, missä suoritetaan tarkempia mittauksia joustavamateriaalisesta turbiinista sekä keskitytään CFD-mallinnuksessa tarkemmin joustavan rakenteen simuloimiseen.

9 LÄHDELUETTELO

3D-printing industry [3D-printing industry www-sivuilla]. [Viitattu 18.11.2020]. Saatavissa: https://3dprintingindustry.com/news/prusa-releases-smartest-3d-printer-yet-original-i3-mk3-tech-specs-pricing-121732/)

Afrose, Mst, Faujia; Masood, S.H.; Nikzad, Mostafa; Iovenitti, Pio, 2014. Effects of Build Orientations on Tensile Properties of PLA Material Processed by FDM. Advanced Materials Research Vols 1044–1045. p 31–34

Alfonsi, Giancarlo, 2009. Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations for Turbulence Modeling. Applied Mechanics Reviews, Vol 62. DOI: 10-1115/1.3124648

Al-Kharbosy, Mohamed, Edbeed, Hussein, 2013. Enchament Protetction and Operation of The Doubly Fed Induction Generator During Grid Fault. DOI: 10.13140/RG.2.2.16718.25925

Blackwell, Ben F.; Sheldahl, Robert E.; Feltz, Louis V, 1978. Wind Tunnel Performance Data for Two- and Three-bucket Savonius Rotors. SF 2900Q(8-81)

Bleischwitz, Robert; de Kat, Roeland; Ganapathisubramani, Bharathram, 2017. On the fluid-structure interaction of flexible membrane wings for MAVs in and out of ground-effect. Journal of Fluids and Structures, volume 70. p 214–234.

Breyer, Christian, 2012. Economics of Hybrid Photovoltaic Power Plants, Doctor Dissertation, University of Kassel

Čečrdle, Jiři, 2015. Introduction to aircraft aeroelasticity and whirl flutter. Whirl Flutter of Turboprop Aircraft Structures. Whirl Flutter of Turboprop Aircraft Structures. Woodhead publishing in mechanical engineering. p. 1–12

Choi, Jong-Soo; Ryi, Jaeha; Rhee, Wook; Hwang, Chang, 2014. Blockage effect correction for a scaled wind turbine rotor by using wind tunnel test data. Renewable Energy 79(1). p. 227–235. DOI: 10.1016/j.renene.2014.11.057

Rogers, Tony [Creative mechanics www-sivuilla] Päivitetty 2015 [viitattu 12.11.2020] Saatavissa: https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-polylactic-acid-pla-prototypes

Ćwikla, G; Grabowik, C; Kalinoski, K; Paprocka, I; Ociepka, P; 2017. The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3d-printed parts. IOP Conf. Series: Material Science and Engineering 227. p. 1–10. DOI: 10.1088/1757-899X/227/1/012033.

Faruk, Abdullah Al, 2017. Flow Field and Performance Study of Vertical Axis Savonius Type SST Wind Turbine. Energy Procedia 110 (2017). p. 235–242

Ferrari, G.; Federici D,; Schito P.; Inzoli, F.; Mereu, R., 2016. CFD study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis. Renewable Energy. DOI:10.1016/j.renene.2016.12.077

GE Renewable Energy [GE Renewable energy:n www-sivuilla] Päivitetty 2020 [viitattu 12.11.2020] Saatavissa: https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine#:~:text=Introducing%20the%20Haliade-X%2012,63%25)%2C%20and%20digital%20capabilities

Johari, Muhd, Khudri; Jalil, Muhammed, Azim A.; Shariff, Mohammed, Faizal, Mohd, 2018. Comparison of horizonal axis wind turbine (HAWT) and vertical axis wind turbine (VAWT). International Journal of Engineering & Technology, 7 (4.13) (2018). p. 74–80. DOI: 10.14419/ijet.v.7i4.13.21333

Lohilahti, Jarkko, 2018. Artikkeli: Vertailussa FDM-, SLA-, ja SLS-teknologiat. [www-sivut]. Saatavissa: https://www.3d-tulostus.fi/uutiset/Vertailussa-FDM-SLA-ja-SLS-teknologiat

Markandya, Anil; Wilkinson, Paul, 2007. Energy generation and health. Energy and health 2. The Lancet. 370(9591):979-90. DOI: 10.1016/S0140-6736(07)61253-7

Marmutova, Svetlana, 2016. Performance of a Savonius wind turbine in urban sites using CFD analysis. ACTA WASAENSIA 349. ISBN 278-952-476-674-6

Mishnaevsky, Leon Jr; Branner, Kim; Perersen, Helga Norgaard; Bauson Justine; McGugan, Malcolm, Sorensen, Bent F., 2017. Materials for Wind Turbine Blades. Materials (Basel) 10(11):1285. DOI: 10.3390/ma10111285

Moushine, Sana El; Oukassou, Karim; Ichenial, Mohammed Maouan; Kharbouch, Bousselham; Hajraoui, Abderrahmane, 2018. Aerodynamics and structural analysis of wind turbine blade. Procedia Manufacturing 22. 11th International Conference Interdisciplinarity in Engineering. p. 747–756

Prusa3d [Prusa3d www-sivuilla] Päivitetty 2020 [viitattu 12.11.2020] Saatavissa: https://help.prusa3d.com/en/article/abs_2058

Ragheb, Magdi, 2017. History of Harnessing Wind Power. Wind Energy Engineering. Chapter 7. p 127–143. ISBN 9780128094518

Ross, Ian; Altman, Aaron, 2011. Wind tunnel blockage corrections: Review and application to Savonius vertical-axis wind turbines. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, p.523–538. DOI: 10.1016/j.jweia.2011.02.002

Santhakumar, Sethilvel; Palanivel, Ilmathi, Venkatasubramanian, Keishnanand. 2018. Building a low cost wind turbine in highways for rural house electricity demand. Environmental Progress & Sustanable Energy 38(1). DOI:10.1002/ep.12917

Samiran, N. A.; Wahab, A. A.; Mohd, S.; Rosly, N., 2014. Simulation Study on the Performance of Vertical Axis Wind Turbine. Applied Mechanics and Materials Vols. 465–466. p. 270–274. DOI:10.4012/www.scientific.net/AMM.465–466.270

Schoř, Pavel, 2017. Aerodynamic Load of an Aircraft with a Highly Elastic Wing. Acta Polytechnica 57(4). p. 272–281. DOI:10.14311/AP.2017.57.0272

Sutherland, Herbert J., 1999. A Summary of the Fatigue Properties of Wind Turbine Materials. Sandia National Laboratories, Wind Energy Technology Department. SAND99-Z613J

Sygulski, R., 2007. Stability of membrane in low subsonic flow. International Journal of Non-Linear Mechanics, p 196-202. Doi:10.1016/j.ijnonlinmec.2006.11.012

Tillman, David A.; Duong, Dao N.B.; Harding, Stanley; 2012. Solid Fuel Blending, Chapter 7 – Modeling and Fuel Blending, p.271–293. DOI: 10.1016/C2009-0-30636-4

Uysal, Alper, 2009. Stress Strain Characteristics of Glass Fiber Reinforced Plastic as Wind Turbine Blade Materials. Conference of the International Journal of Arts and Sciences. ISSN: 1943-6114

Wenehenubun, Frederikus; Saputura, Andy; Sutanto, Hadi, 2015. An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. Energy Procedia 68. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.03.259

Worasinchai, Supakit, 2018. Performance characteristics of the Savonius turbine. IOP Conference Series Materials Science and Engineering 297(1):012056. DOI: 10.1088/1757-899X/297/1/012056

Wu, Yue; Chen, Zhao-qing; Sun, Xiao-ying, 2015. Research on the wind-induced aero-elastic response of closed-type saddle-shaped tensioned membrane models. J Zheijiang Univ-Sci A (Appl Phys & Eng). p. 656–668. ISSN 1862-1775

Zemamou, M; Aggour, M; Toumi, A, 2017. Rewiev of savonius wind turbine design and performance. Energy Procedia 141:383-388. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.11.047