

---

# Tuulivoima ja Pienoistuulivoimaloiden testauslaitteisto

---

Tuomas Rytönen

Opinnäytetyö



Koulutusala Tekniikan koulutusala			
Koulutusohjelma Automaatiotekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Tuomas Rytönen			
Työn nimi Tuulivoima ja Pienoistuulivoimaloiden testauslaitteisto			
Päiväys	7.6.2011	Sivumäärä/Liitteet	87/19
Ohjaaja(t) Risto Niemi, Jorma Honkanen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulu			
Tiivistelmä			
<p>Tuulivoimaa kannattaa kehittää sen periaatteellisen päästöttömyyden ja polttoaineriippumattomuuden vuoksi. Tuulivoimalla ei pystytä ainakaan vielä korvaamaan täysin muita sähkön tuottotapoja, mutta tuulivoima-ala kasvaa jatkuvasti. Paras tapa kehittää tuulivoimaa on suunnitella parempia tuulivoimaloita ja etsiä tuuliolosuhteiltaan hyviä tuotantopaikkoja.</p> <p>Työn tavoitteena oli tehdä opintokäyttöön järjestelmä, jolla voidaan testata pienoistuulivoimaloita. Työ tehtiin Savonia-ammattikorkeakoululle. Työssä rakennettiin ensin suljetun kierron tuulitunneli. Ilmavirtaus tunneliin tehdään ilmastointipuhaltimella. Tuulitunnelissa on testausasema, johon testattavat tuuliturbiinit sijoitetaan. Järjestelmän mittauksia luetaan sille tehdyllä ohjelmalla, joka tehtiin LabVIEW-ohjelmistolla. Ohjelmalla ohjataan myös järjestelmän ilmavirtausta.</p> <p>Testausjärjestelmällä voidaan testata tuulivoimaloita, joiden roottorin halkaisija on alle 630 mm. Järjestelmällä pystytään tuottamaan testausasemaan 17,5 m/s oleva ilman virtausnopeus. Tämä virtausnopeus on riittävä, jos tarkastellaan voimalan tuottoa tuulen kuukausittaisen keskinopeuden kannalta.</p>			
Avainsanat Tuuli, tuulitunneli, tuuliturbiini, tuulivoima, tuulivoimala			
Julkinen			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Automation Technology			
Author(s) Tuomas Rytönen			
Title of Thesis Wind Power and the Small Scale Wind Turbine Test System			
Date	7.6.2011	Pages/Appendices	87/19
Supervisor(s) Risto Niemi, Jorma Honkanen			
Project/Partners Savonia University of Applied Sciences, Varkaus			
<p>Abstract</p> <p>It is worthwhile to develop wind power for it requires no fuel and, in theory, it produces no emissions. Wind power can not replace other forms of energy production completely, at least not yet, but wind power industry is growing continuously. The best way to develop wind power is to design better wind turbines and to seek areas with good wind conditions.</p> <p>The goal of this study was to build a system for study purposes, with which small scale wind turbines can be tested. The study was done for the Savonia University of Applied Sciences. First part of the study was to build a closed circuit wind tunnel. The airflow in the tunnel is made with a ventilation fan. The wind tunnel has a test section where the wind turbines, that are to be tested, are placed. The measurements of the system are read with a computer program made for the system. The program was made with LabVIEW-program. The program is also used to control the airflow in the system.</p> <p>With the test system wind turbines with a rotor diameter of less than 630 mm can be tested. The system is able to produce an airflow of 17,5 m/s to the test section. Airflow of this magnitude is enough, if a turbine's power output is considered as result of a monthly speed average of the wind.</p>			
Keywords Wind, wind power, wind tunnel, wind turbine			
Public			

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	7
2	TUULI.....	8
2.1	Tuulen synty .....	8
2.2	Ilmakehän rajakerros .....	9
2.3	Ilmakehän tasapainotila .....	12
2.4	Tuulen mittaaminen .....	13
2.5	Tuulivoima .....	16
3	TUULIVOIMAN HISTORIA .....	19
3.1	Tuulimyllyjen kehitys.....	19
3.2	Tuulivoimalla tuotetun sähkön ensiaskeleet.....	23
3.3	Tuulivoimaloiden synty .....	25
3.4	Tuulivoiman leviäminen maailmalle .....	28
4	TUULIVOIMA NYKYPÄIVÄNÄ .....	31
4.1	Yleistä tuulivoimaloista .....	31
4.2	Kaupalliset tuulivoimalat .....	32
4.3	Tuulivoimalan ohjaus.....	34
4.4	Pysty akseliset tuulivoimalat .....	36
4.5	Tuulivoimatuotanto .....	39
4.6	Tuulivoimamarkkinat.....	44
4.7	Tuulivoiman hyödyt ja haitat .....	46
5	TUULITUNNELI.....	50
5.1	Tuulitunnelin rakenne .....	50
5.2	Putkivirtaus.....	51
6	AUTOMAATIOJÄRJESTELMÄ.....	58
6.1	Prosessiautomaatio .....	58
6.2	Kuumalanka- ja kuumakalvoanturit .....	60
6.3	DAQ-laite.....	62
6.4	Operaatiovahvistin .....	63
6.5	LabVIEW .....	64
7	JÄNNITTEEN JA VIRRRAN MITTAAMINEN.....	65
7.1	Jännitteen mittaaminen.....	65
7.2	Virran mittaaminen.....	67
7.3	Lataussäädin .....	68
8	TUULIVOIMALAN TESTAUSLAITTEISTO .....	70
8.1	Tuulitunnelin rakentaminen.....	70
8.2	Prosessin ohjauksen ja mittausten toteuttaminen .....	75
8.3	Testauslaitteiston mittaus- ja ohjausohjelma.....	78

8.4 Laitteiston testaaminen.....	80
PÄÄTÄNTÖ .....	82
LÄHTEET .....	83

## LIITTEET

- Liite 1 ILMAVIRTAUSANTURIN TEKNISET TIEDOT
- Liite 2 ILMASTOINTIPUHALLIN
- Liite 3 TUULITUNNELIN LASKUTOIMITUKSET
- Liite 4 RUTLAND 504 WINDCHARGER-TUULITURBIINI
- Liite 5 ILMAVIRTAUKSEN SKAALAUUS
- Liite 6 DAQ-LAITTEEN TEKNISET TIEDOT
- Liite 7 OPERAATIOVAHVISTIMEN TEKNISET TIEDOT
- Liite 8 JÄNNITELÄHTEEN TEKNISET TIEDOT
- Liite 9 LATAUSSÄÄDIN
- Liite 10 TEHOKÄYRÄ
- Liite 11 MITTAUS- JA OHJAUSOHJELMAN ETUPANEELI
- Liite 12 MITTAUS- JA OHJAUSOHJELMAN LOHKOKAAVIOKUVA
- Liite 13 LATAUSSÄÄTIMEN TESTAUS

## 1 JOHDANTO

Fossiilisten polttoaineiden vähetessä ja energianhintojen noustessa on tärkeää tutkia eri energian tuottotapoja. Uusiutuva energia kuten tuuli-, aurinko- ja vesivoima ovat loppumattomia ja periaatteessa päästöttömiä. Näissä energiantuottomuodoissa on kuitenkin haasteena niiden käyttö hyvällä hyötysuhteella. Tässä tutkielmassa perehdytään tuulivoimaan. Tarkemmin sanottuna pyritään luomaan edellytystä tuulivoiman tutkimiselle ja parantamiselle.

Työn varsinainen tavoite oli suunnitella ja toteuttaa opintokäyttöön järjestelmä, jolla voidaan testata erilaisia pienikokoisia tuulivoimaloita sisätiloissa. Testauslaitteisto toteutettiin rakentamalla tuulitunneli suljetulla kierrolla. Testauslaitteisto koostuu ilmastointiputkesta, ilmapuhaltimesta, mittalaitteista ja Labview-ohjelmalla tehdystä mittaus- ja ohjausohjelmasta.

Tämä raportti käsittelee ensin tuulivoimaan liittyvää teoriaa. Ensimmäinen osio käsittelee ensin tuulta sekä sen synty- ja käyttäytymismekanismeja. Toisessa osiossa kerrotaan tuulivoimasta ja sen kehityksestä aikojen alusta tähän päivään. Kolmas osio käsittelee nykyajan tuulivoimaloita ja niiden kilpailukykyä energiamarkkinoilla. Neljäs osio käsittelee tuulitunnelia ja lähinnä siihen liittyvää laskentateoriaa. Tuulivoimateorian jälkeen raportissa käsitellään automaatiota sekä siihen liittyviä laitteita ja ohjelmia. Tämän osuuden jälkeen käsitellään virran ja jännitteen mittaamista.

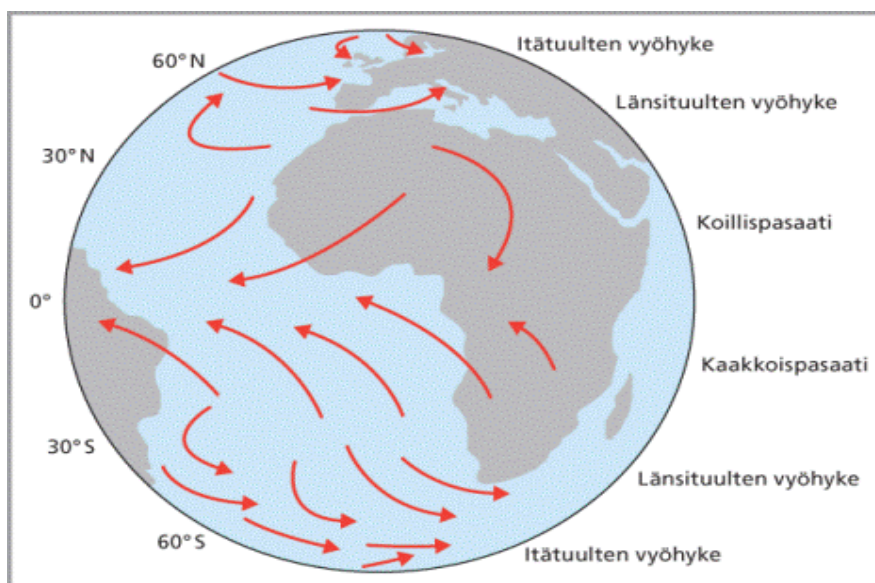
Lopuksi kerrotaan itse tuulivoimalan testauslaitteistosta. Tässä osiossa esitetään testauslaitteistoon liittyvät mittaukset ja niiden tulokset sekä tuloksista tehdyt johtopäätökset. Ensin käydään läpi tuulitunnelin rakennusprosessi. Seuraavaksi kerrotaan testauslaitteiston ohjauksen ja mittausten toteuttamisesta. Seuraava tuulivoimalan testauslaitteistoa käsittelevä osuus esittelee laitteistoon kuuluvan mittaus- ja ohjausohjelman. Viimeisenä käydään läpi laitteiston testaamista.

## 2 TUULI

### 2.1 Tuulen synty

Tuuli on maanpinnan suuntainen ilmavirtaus ilmakehässä. Virtaus johtuu maapallon epätasaisesta lämpenemisestä ja jäähtymisestä. Pohjimmiltaan tuuli on aurinkoenergiaa, joka jakautuu eri tavoin eri leveysasteille. Auringon säteilyenergia vaikuttaa huomattavasti enemmän päiväntasaajan alueille kuin napojen läheisille alueille. Aurinkoenergiasta arviolta 1-3 prosenttia muuttuu tuulienergiaksi. Auringon säteilyn teho on suuruusluokkaa  $1370 \text{ W/m}^2$  ilmakehän ulkorajalla. Maa-ilmakehä systeemi myös menettää lämpöenergiaa avaruuteen pitkäaaltoisena ulossäteilynä. [1,2]

Leveysasteiden  $38^\circ\text{N}$  ja  $38^\circ\text{S}$  välinen alue saa auringon energiaa enemmän kuin menettää sitä ulossäteilynä ja leveysasteiden napojen puoleiset alueet päinvastoin. Lämpöä siirtyy matalilta korkeammille leveysasteille tuulien ja valtamerivirtausten muodossa ilmakehän pyrkiessä säilyttämään lämpötasapainon. Tuulien osuus tästä lämmönsiirrosta on noin 70 prosenttia. Kuten kuvasta 1 nähdään, kolme tuulivyöhykettä voidaan erottaa navalta päiväntasaajalle. Tuulivyöhykkeiden rajat vaihtelevat vuodenaikojen mukaan. Näitä ovat itätuulet lähinnä napaa, länsituulet keskileveysasteilla ja pasaatituulet tropiikissa. Paikallisilla alueilla tuulisuuteen vaikuttavat myös pienemmässä mittakaavassa lämpötilaerot, meren jakauma, vuoristot sekä pinnan muodot. Hetkelliseen tuuleen vaikuttavat vielä edellisten lisäksi erityisesti matalapainetoiminta ja matalapaineen keskuksen liikerata. [1,2]



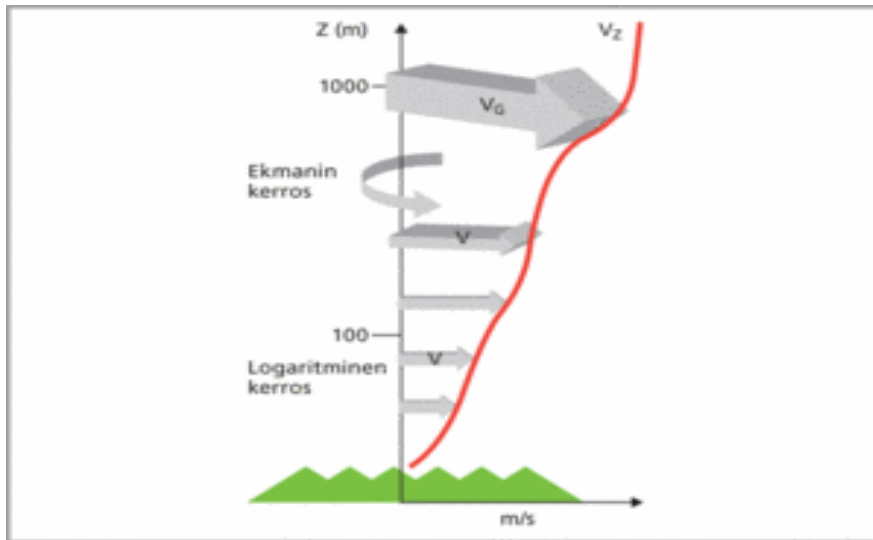
Kuva 1. Planetaarinen tuulijärjestelmä. [2]



Lämpötilaeroista johtuva paine-ero aiheuttaa ilman virtauksen korkeamman paineen alueelta matalamman paineen alueelle. Paine-erosta aiheutuvaa tuulta kutsutaan niin sanotusti geostrofiseksi tuuleksi. Suurempi ilmanpaine-ero aiheuttaa suuremman tuulen nopeuden. Kun coriolis-voima vaikuttaa vastakkaiseen suuntaan ja yhtä suurella voimalla kuin paine-eron tuottama voima, tuulen sanotaan olevan geostrofisessa tasapainossa, jolloin tuulen suunta on isobaarien suuntainen. Todellisuudessa muut tähän tasapainoon vaikuttavat voimat, kuten advektio ja diabaattiset prosessit, kompensoivat itsensä osittain pois otettaessa tarpeeksi pitkän aikavälin keskiarvoja ja geostrofinen tuuli kuvaa ylätuulen olosuhteita. Tästä voidaan laskea maanpinnan läheinen tuuli ottamalla huomioon vaikuttavat tekijät kuten maaston rosoisuus. Geostrofinen tuuli kiertää matalapainetta maapallon pohjoisella puoliskolla vastapäivään ja eteläisellä puoliskolla myötäpäivään. [1,2,]

## 2.2 Ilmakehän rajakerros

Ilmakehän pyrkiessä mukautumaan maan- tai vedenpinnan olemassa oloon syntyy rajakerros, joka toimii ikään kuin puskurina pinnan ja vapaan ilmakehän vuorovaikutukselle. Maan- tai merenpinnan välittömät vaikutukset kuten kitka sekä lämmön ja kosteuden vaihto näkyvät korkeintaan muutaman tunnin viiveellä. Rajakerroksen virtaus on yleensä aina turbulenttista, kun taas vapaassa ilmakehässä turbulenttisuus on ajoittaista. Maantieteellinen alue, paikallinen ilman terminen tasapainotila ja säätila vaikuttavat rajakerroksen korkeuteen yleisesti välillä 0,1-2 kilometriä, Suomessa useimmiten välillä 100-1000 metriä. Useassa tapauksessa rajakerroksen korkeus on kuitenkin vaikea määrittää, erityisesti termisesti stabiilin kerrostuneisuuden kasvaessa. Termisesti epävakaa, labiilisti kerrostuneissa tilanteissa, joissa lämpötila nousee rajakerroksen yläpuolelle, on rajakerroksen korkeus selkein. Tuuli on lähellä geografista tuulta rajakerroksen yläpuolella. Niin sanottu Ekmanin kerros, jossa tuulen nopeuden suunta muuttuu, muodostuu rajakerroksen ylärajan ja pintakerroksen eli rajakerroksen alimman osan välille. Tuulen nopeus heikkenee korkeuden pienentyessä pintakitkan vaikutuksesta. Tuulen nopeus heikkenee jokseenkin logaritmisesti suunnan pysyessä melkein samana pintakerroksessa, jonka korkeus on noin 10 prosenttia rajakerroksesta. Rajakerrosta havainnollistaa kuva 2. [1,2]



Kuva 2. Rajakerros. [1]

Pintakerroksessa maaston muodot vaikuttavat erittäin paljon ilmavirtaukseen. Orografinen rosoisuus, joka tulee maaston muodoista, vaikuttaa tuulen suuntaan ja nopeuteen. Aerodynaaminen rosoisuus, joka tulee pinnan laadusta, taasen pyrkii jarruttamaan ilmavirtausta. Alustan rosoisuutta kuvataan rosoisuusparametrillä  $z_0$ , jonka yksikkö on metri. Hyvin rosoisina pintoina voidaan pitää kaupunkveja, jyrkkäseinäisiä rinteitä ja korkeiden metsien reuna-alueita. Vesi-, jää- ja lumipeitteitä pidetään jokseenkin sileinä pintoina. Myös vuodenajat vaikuttavat tietyn alueen pinnan rosoisuuteen. [1,2]

Epäsäännöllisessä maastossa rajakerroksen sisään syntyy sisäisiä rajakerroksia, kun ilmavirtaus ylittää alustatyyppin reunan, jolloin aerodynaaminen rosoisuus ja pintalämpötila voivat muuttua. Ainoastaan pinnan rosoisuuden muuttuessa muuttuu vain virtauksen nopeus, joka tapahtuu aluksi aivan pinnassa, mutta välittyy yhä ylemmäs turbulenttisen sekoittumisen vuoksi. Sisäinen rajakerros suurenee etäisyyden kasvaessa alustan muutoskohdasta. Pinnan lähellä ilmenee uusi tasapainokerros, jossa virtaus on täysin mukautunut uuteen alustaan. Mitä rosoisempi uusi alusta on sitä nopeammin sisäinen rajakerros ja uusi tasapainokerros kasvavat. Suomen maastossa tyypillisesti sisäinen rajakerros kasvaa suhteessa 1/10 ja tasapainokerros suhteessa 1/100. Luvut voivat kuitenkin vaihdella hyvinkin paljon, jos alustan muuttuessa muuttuu myös alustan pintalämpötila. Tuulen ollessa heikkoa ja ilman virratessa kylmältä lämpimälle sekä rosoiselle alustalle sisäisen rajakerroksen kasvu on nopeinta. [1,2]

Tuulen nopeuden suureen vaihteluun rajakerroksessa rannikkoalueella vaikuttaa maaston rosoisuuden muutos. Merellä rosoisuus on pientä ja metsäisessä sisämaas-

sa rosoisuus on suurta. Saaristo ja yksittäiset saaret ja niemet lisäävät maaston epä-säännöllisyyttä täten lisäten rosoisuutta. Mereltä maalle siirryttäessä tai toisin päin ilman stabiilius muuttuu usein myös alemmassa ilmakehässä. Suomen saaristojen ja rannikkoalueiden tuuliolosuhteita onkin erittäin haasteellista kuvata malleilla. Avomeri sopiikin tuuliolosuhteiltaan yleensä tuulienergian tuottoon paremmin kuin rannan läheiset sisämaa-alueet tuulen keskinopeuden ollessa suurempi ja turbulentsisuuden pienempi. Toisaalta sisämaassa maaston korkeutta hyödyntäen voidaan päästä yhtä hyviin tuloksiin kuin matalikoilla. Etenkin talviaikana tuulen nopeus yksittäisillä tuntureilla on suurempi kuin ympäröivällä tasamaa-alueella. Tuulen nopeus tunturilla voi vaihdella hyvinkin paljon eri puolilla tunturia. Tunturin laella voi vaikuttaa geostrofinen tuuli, mutta alemman ilmakehän suihkuvirtaukset ja mäen itsensä vaikutus voivat nostaa laen tuulen nopeutta. [1,2]

Rajakerroksessa esiintyvää tuulimaksimia, joka ylittää ylä- ja alapuolisen tuulen nopeuden vähintään kahdella metrillä sekunnissa, kutsutaan suihkuvirtaukseksi. Tämän ilmiön voimakkuuden, esiintymiskorkeuden ja yleisyyden tietäminen on erittäin tärkeää tuulivoiman tuotannon kannalta. Vaikkakin suihkuvirtaus lisää tuulivoiman tuotantopotentiaalia se aiheuttaa mekaanista kuormitusta tuulivoimalalle johtuen suihkuvirtauksen ala- ja yläpuolisten tuulien voimakkaista nopeuden muutoksista. Suomessa tyypillisesti esiintyvät ilmavirtaukset ovat korkeudella 100 - 600 metriä ja joskus jopa 50 metrin korkeudella. Sääasemat mittaavat tuulia yleensä 10 - 30 metrin korkeudelta, joten niillä ei suihkuvirtauksia havaita. Tunturisääasemilla sen sijaan mitataan myös suihkuvirtauksen tuulia. Varsinkin yöllä ja talvella on suihkuvirtaus hyvin yleinen ilmiö ja se voi muodostua monella eri tavalla. [1,2]

Yöllinen suihkuvirtaus syntyy, kun maanpinnan jäähtyminen ulottuu vähitellen ilmakehän rajakerrokseen. Seurauksena rajakerros muuttuu stabiiliksi ja turbulentsinen sekoittuminen oleellisesti vähenee. Pintakitka ei enää juurikaan vaikuta ilman rajakerroksen yläosassa ja näin kerrokseen syntyy paikallinen tuulimaksimi. Lämpötilaeroista johtuvaa suihkuvirtausta pohjustavat ne seikat, että lämpötilan muuttuessa horisontaalisesti muuttuu tuulen nopeus pystysuunnassa ja, että maanpinnan lähellä kitka pienentää tuulen nopeutta. Suihkuvirtaus syntyy, kun lämpötilaerot pyrkivät pienentämään tuulen nopeutta korkeuden kasvaessa. Nämä muutaman sadan metrin korkeuteen syntyvät suihkuvirtaukset ovat voimakkaimmillaan, jos kylmä ilma sijaitsee tuulen tulosuunnasta vasemmalla. Suihkuvirtaus merituulesta aiheutuu, kun kevään tai alkukesän merituuli aiheuttaa iltapäivisin maalle päin suuntautuvan tuulen ilmakehän rajakerrokseen. Ylempänä vallitsee heikompi tuuli ja pinnan lähellä kitka pienentää tuulen nopeutta, ja kerrokseen, missä kitka ei enää merkittävästi vaikuta

syntyy suihkuvirtaus. Katabaattinen tuuli eli kylmä laskutuuli syntyy jäähtyneen ilman valuessa raskaampana maanpinnan lähellä rinnettä alas. Suihkuvirtaus esiintyy ohuessa kerroksessa maanpinnan lähellä, jossa kitka ei merkittävästi vaikuta, mutta aivan pinnan lähellä kitka heikentää tuulta. Nämä suihkuvirtaukset syntyvät yöllä, mutta talvella myös päivisin. Säärintamista aiheutuvat suihkuvirtaukset syntyvät, kun kylmä ilmassa etenee lämmintä nopeammin ja tunkeutuu sen alle matalana kielekkeenä, jolloin usein ilmassan yläosaan syntyy tuulimaksimi. [1,2]

### 2.3 Ilmakehän tasapainotila

Ilmakehän stabiiliudella eli tasapainotilalla tarkoitetaan sen herkkyyttä sekoittumiselle. Tätä voidaan kuvata pystysuuntaiseen liikkeeseen sysätyllä ilmapaketilla, joka stabiilissa tilanteessa pyrkii palaamaan takaisin lähtöasemaansa, jää sysätyyn paikkaansa neutraalissa tilanteessa ja labiilissa eli epästabiilissa tilanteessa pyrkii jatkamaan liikettään. Ilmassan sekoittumiselle ihanteellisimmat olotilat ovat neutraali ja labiili. Hydrostaattinen stabiilius eli lämpötilan pystysuuntainen tasapainotila ilmakehässä vaikuttaa rajakerroksen tuuliolosuhteisiin. Tuulen pystysuora nopeuden muutos, maastosta johtuva sen yläpuolinen tuuli sekä virtauksen puuskaisuus, pyörteisyys ja turbulentsisuus ovat stabiiliuden vaikutuksen alaisia. Stabiilius pääasiallisesti aiheuttaa tuulen nopeuden pystysuoran muutoksen poikkeaman logaritmisesta tuuliprofiilista. Ilman stabiiliusaste pystytään laskemaan lämpötilojen ja nopeuksien perusteella. [1,2]

Tuulivoimalan sijoituspaikkaa etsiessä tulisi mitata ilman lämpötilaa ainakin kahdelta korkeudelta pintakerroksesta. Ensimmäinen mittaus vähän rosoisuuselementtien yläpuolelta ja toinen 10-20 metriä ensimmäisen mittauksen yläpuolelta. Kun jokin ilmakerros on neutraalisti kerrostunut eli lämpötila laskee korkeuden kasvaessa  $9,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  kilometriä kohden, on lämpötilan muutos kuiva-adiabaattinen korkeuden kasvaessa ja potentiaalilämpötila on korkeuden suhteen vakio. Tällainen tilanne voidaan havainnoida täysin pilvisenä taivaana tai voimakkaana tuulena. Stabiili kerrostuneisuus syntyy, jos lämpötila laskee korkeuden mukana vähemmän kuin  $9,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  kilometriä kohden eli ylöspäin mentäessä potentiaalilämpötila kasvaa. Tällaista tilannetta ilmentää pilvetön yö, jolloin maapallon pinta jäähtyy ulossäteilyn vaikutuksesta. Potentiaalilämpötilan pienetessä ylöspäin mentäessä on kyseessä labiili ilmakerros. Ilmakehän keskimääräinen viileneminen on  $6,4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$  ylöspäin mentäessä, mikä johtuu ilmakehässä olevan kosteuden tiivistymisen aiheuttamasta lämmön vapautumisesta. Stabiiliuserot voivat olla hyvinkin suuria etenkin rannikolla maanpinnan ja meren välillä. [1,2]

Turbulenttinen virtaus on epäsäännöllistä eli sen suunta ja nopeus vaihtelevat kolmiulotteisesti ajan suhteen. Se sekoittaa eri ilmakehän ominaisuuksia ja siirtää muun muassa lämpöä ja kosteutta. Turbulenttinen virtaus syntyy, kun virtausnopeus on selvästi suurempi kuin virtauksen sisäinen kitka. Turbulenssin syntymekanismit jaetaan termiseen ja mekaaniseen. Termisen turbulenssin johtuu ilman tiheyden vaihteluista pystysuunnassa, etenkin maan tai meren pinnan ollessa ilmaa lämpimämpi, jolloin pinnan lähellä lämmennyt ilma pyrkii ylöspäin. Myös ilman jäähtyminen ja sen pyrkiminen vajoamaan alaspäin aiheuttaa termistä turbulenssia. Suurilla nopeuksilla termisen turbulenssin osuus on olematon. Turbulenssi, joka johtuu maaston rosouudesta ja tuulen nopeuden muuttumisesta korkeuden mukana, on mekaanista turbulenssia. Yleisesti turbulenssin intensiteettiä kuvataan tietyn mittausajan, väliltä 10-30 minuuttia, hetkellisen, väliltä 0,01-3 sekuntia, tuulennopeuksien hajonnan suhteen mittausajan tuulennopeuden keskiarvoon. [1,2]

#### 2.4 Tuulen mittaaminen

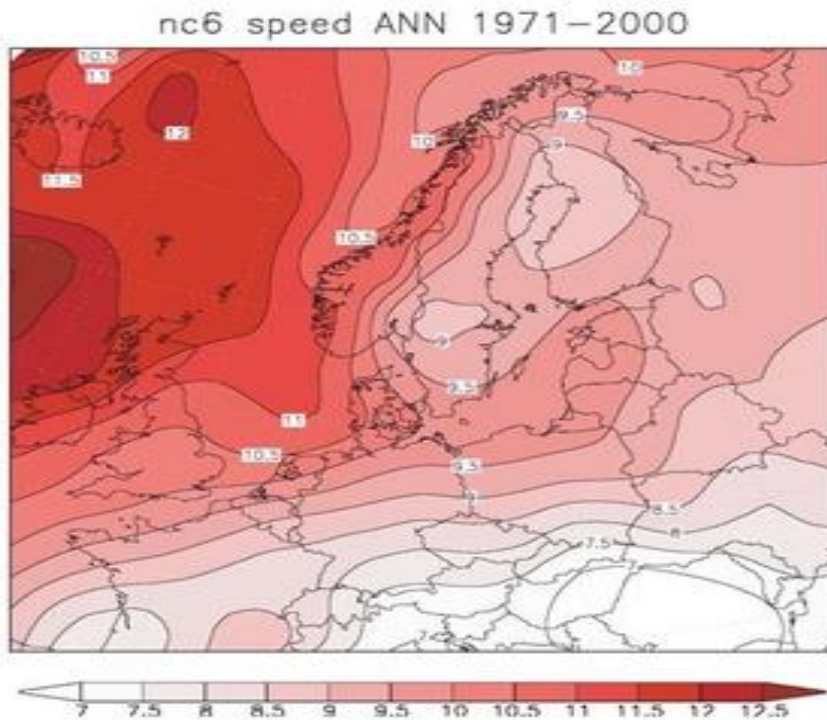
Yleisesti tuulen nopeuden yksikkönä Suomessa on SI-järjestelmän mukainen metriä sekunnissa (m/s). Yksikköä solmu (kt) käytetään yleisesti laiva- ja lentoliikenteessä. Monissa muissa maissa nopeus ilmoitetaan kilometreinä tunnissa (km/h) tai mailleina tunnissa (mph). Tuulen nopeus mitataan kansainvälisen ilmatieteen alan suosituksen mukaan kymmenen metrin korkeudelta maan pinnasta. Mittauskorkeus vaihtelee käytännössä sääaseman ja ympäröivän maaston mukaan. Taulukko 1 kuvaa tuuliasteikkoa kymmenen minuutin keskituulen nopeuksille. [1,2,3]

Taulukko 1. Tuuliasteikko kymmenen minuutin keskituulen nopeuksille. [3]

0 m/s	tyyntä
1–3 m/s	heikkoa tuulta
4–7 m/s	kohtalaista tuulta
8–13 m/s	navakkaa tuulta
14–20 m/s	kovaa tuulta
21–32 m/s	myrskyä
yli 32 m/s	hirmumyrskyä

Suomen ilmastolle ovat tyypillisiä vuodenajoinnaisesti selvästi vaihtelevat tuulen nopeudet merialueilla, rannikolla ja tuntureilla tavallisten sääasemien tuulimittarin sijoituskorkeudella. Sisämaassa taas tuulen keskinopeus vaihtelee kuukausittain vähän ja sääasemilla sisämaassa mitattu tuulen vuotuinen keskinopeus on merkittävästi vähäisempi kuin merisääasemilla mitattu. Tuulivoiman kannalta katsottuna Suomessa

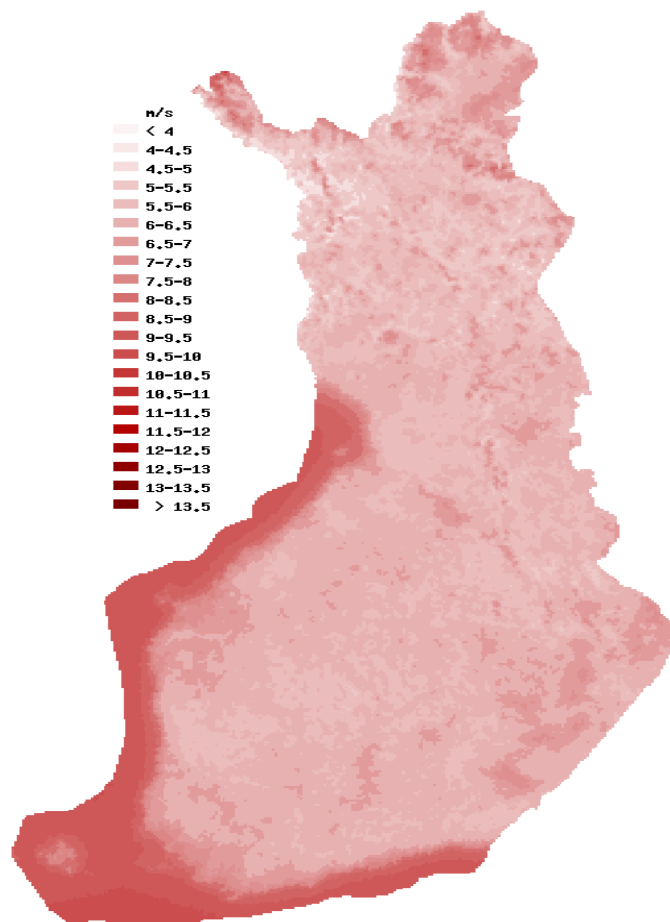
tuulee eniten talvikuukausina ja huomattavasti vähemmän kesäkuukausina. Suomen maantieteellinen sijainti ja pääasiassa Atlantilta suuntautuvat matalapaineet ja niiden reitit vaikuttavat merkittävästi Suomen tuuliolosuhteisiin. Näistä johtuvan noin kilometrin korkeudessa kulkevan suuren mittakaavan tuulen eli geostrofisen tuulen keskimääräinen nopeus on verraten suuri, 9-9,5 m/s, kun eteläisemmässä Euroopassa keskimääräinen tuulen nopeus on 7-8,5 m/s. Toisaalta lähempänä pohjoista Atlanttia tuulen keskimääräinen nopeus on Brittein saarilla 10-12 m/s, Norjan rannikolla 10-11 m/s, Tanskassa 10-10,5 m/s ja Pohjanmeren rannikolla 10-10,5 m/s. Suomessa suurin mitattu kymmenen minuutin kestoisen keskittuulen nopeus on 31 m/s. Tällainen tuuli on mitattu Valassaarilla 25.2.1971, Korsnäsin Moikipäässä 15.12.1975 ja 23.12.1975 sekä Hangon Tulliniemessä 23.1.1995. Tuulen keskimääräinen jakauma Euroopassa voidaan nähdä kuvasta 3. [1,2]



Kuva 3. Tuulen keskimääräinen jakauma Euroopassa ilmoitettu ilman painekentästä laskettuna geostrofisena tuulena (m/s). [1]

Suomessa havainnoidaan tuulta noin 150 paikalla ilmatieteen laitoksen toimesta. Näiden lisäksi käytössä on myös noin 20 lentokentän tuulihavainnot. Havainnoita saadaan ja tallennetaan tietokantaan tyypillisesti kymmenen minuutin välein ja noin 20 prosenttia sääasemista välittää tietoja tuulesta 1-3 tunnin välein. Tuulta mitataan noin kymmenen metrin korkeudelta lähes sadalla asemalla. Merisääasemilla tuulenmittauksen keskikorkeus on noin 30 metriä. Ilmatieteen laitoksen säätiedotuksissa ilmoitettu tuulen nopeus on sama kuin säähavaintoasemien yleinen kymmenestä metristä

mitattu tuulen nopeus. Nykyisin ilmatieteen laitoksen sääasemat mittaavat tuulen nopeutta resoluutiolla 0,1 m/s. Tuulen suunta ilmoittaa tulevan tuulen ilmansuunnan. Tätä mitataan ilmatieteen laitoksella kymmenen minuutin keskiarvona asteen resoluutiolla ja tallennetaan tilastoon yleensä kymmenen asteen suuntaluokissa eli 0-10, 10-20, 20-30 jne. Tuulen suunta jaetaan yleensä kahteentoista sektoriin tuulienergia-sovellutuksissa 345-15, 15-45, 45-75 jne. Enemmistö Suomen tuulista tulee lounaasta. Geostrofiset tuulet lasketaan esimerkiksi maanpinnan tason ilmanpainemittauksista yleisesti käyttäen kolmen toisistaan suhteellisen kaukana olevaa sääaseman mittauksia, jolloin puhutaan maanpintageostrofisesta tuulesta. Toisessa yleisessä tavassa lasketaan geostrofisen tuuli jollekin ilmanpaineen saman arvon pinnalle. Suomen tuulen keskinopeuden jakauma nähdään kuvasta 4. [1,2]



Kuva 4. Tuulen keskinopeuden (m/s) jakauma Suomessa sadan metrin korkeudella 2,5 x 2,5 km<sup>2</sup> tarkkuudella. [1]

Suomessa on pitkään käytetty tuulen nopeuden mittaamiseen pysty akselista kuplianemometriä, joka mittaa tuulen nopeuden vaakasuorien u ja v komponenttien resultanttia. Uudemmat akustiset tuulimittarit pystyvät mittaamaan suoraan tuulen vaa-

kasuoran nopeuden ja ilmaisemaan tuulen nopeuden  $u$  ja  $v$  komponentit 2D-malleilla sekä  $u$ ,  $v$  ja  $w$  komponentit 3D-malleilla. Akustisia tuulimittareita käytetään yleisesti myös turbulenssimittauksissa, koska niiden näytteenottotaajuus on 1-20 Hz. Lähes sadalla ilmatieteen laitoksen sääasemista on käytössään pyörivä kuppianometri tuulen nopeuden mittaamiseen ja suuntaviiri suunnan mittaamiseen. Mittareiden mittausalueet ovat 0,4-75 m/s ja 0-360° sekä tuulen nopeuden mittaustarkkuus on  $\pm 0,17$  m/s ja tuulen suunnan mittaustarkkuus pienempi kuin  $\pm 3^\circ$ . Nopeuden mittaukselle pyörimiskynnysarvo on pienempi kuin  $\pm 0,4$  m/s. Tuulimittareista osa, lähinnä merialueilla ja Pohjois-Suomessa, on lämmitettäviä. Lämmitettyjen ja jäätymättömien tuulimittareiden käyttö Suomessa on tärkeää, koska kuppianemometreihin kertyvä jää ja lumi vaikuttavat niiden pyörimisnopeuteen vääristäen mittaustuloksia. Myös pyörivien mittareiden laakerien kulumisen ja suunta-anturien suuntaustarkkuus vaikuttavat havaintojen laatuun. Kulumavirheitä pyritään vähentämään vuosihuolloilla. Havaintojen laatuun vaikuttaa myös mittarien sijoitus maastoon ja maaston aiheuttamat virheet dokumentoidaan sääaseman metadataan. Lähes 50 sääasemalla on käytössä akustinen 2D-tuulianturi, jonka avulla voidaan mitata tuulen nopeus ja suunta. Tällainen mittari on lämmitettävä ja sen mittausalue on 0,0-75 m/s ja 0-360° tarkkuudella  $\pm 2\%$  ja alle 5 m/s tuulella  $\pm 0,1$  m/s ja  $\pm 1^\circ$ . Ilmatieteen laitoksen kaikilta sääasemilta tallennetaan tuulihavainnot erotuskvyyllä 0,1 m/s ja  $1^\circ$ . [1,2,4]

## 2.5 Tuulivoima

Tuulivoima on ilman virtauksen liike-energian muuttamista sähköenergiaksi tuuliturbiinilla. Tuulen liike-energia eli kineettinen energia pystytään laskemaan yhtälöstä

$$E = \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (1)$$

jossa  $E$  on ilman kineettinen energia,  $\rho$  on ilman tiheys ja  $v$  on tuulen nopeus. Kun tuulen voima kohdistuu pystysuoraan pinta vasten, kuvaa tuulen voimaa yhtälö

$$F_U = \frac{1}{2} c \rho U^2, \quad (2)$$

jossa  $F_U$  on pystysuoraan pintaan kohdistuva voima,  $c$  on pinnan ilmanvastuskerroin,  $\rho$  on ilman tiheys ja  $U$  on tuulen nopeuden  $v$  vaakasuora resultanttinopeus kohdistuorassa pinta  $A$  vasten. Tehdyn työn tai käytetyn energian määrä aikayksikössä



on fysiikassa teho  $P$ . Tehon yksikkö watti (W) vastaa joulen energiamäärää sekun-  
nissa. Tuulen nopeuden kyky tehdä työtä eli teho pinta-alayksikköä kohden ( $\text{W}/\text{m}^2$ )  
saadaan yhtälöstä

$$P_U = F_U U = \frac{1}{2} \rho A U^3. \quad (3)$$

Turbulenssi vaikuttaa tuulen energia sisältöön, koska tuuli on aina turbulenti. Tuu-  
len tehon kasvaessa suhteessa nopeuden kolmanteen potenssiin yksittäiset puuskat  
eli keskinopeutta nopeammat virtaukset vaikuttavat tuulen tehoa lisäävästi kuiten-  
kaan keskinopeuteen vaikuttamatta. Vaikutus lasketaan kaavalla

$$U^3 = (U + U')^3, \quad (4)$$

jossa  $U$  on keskinopeuskomponentti ja  $U'$  hetkellinen nopeus, joka voi olla pienempi  
tai suurempi kuin keskinopeus. Pitkän aikavälin keskinopeudesta laskettu teho on  
selvästi pienempi kuin esimerkiksi 10 minuutin tuulimittauksesta laskettu teho ja tur-  
bulenssimittauksesta laskettu teho on suurempi kuin saman aikavälin keskinopeudes-  
ta laskettu teho. Tämän takia usein tuulienergiiaan liittyvissä mittauksissa mitataan  
keskinopeutta sekä hetkellisistä nopeuksista saatua tehoa. [1,2]

Tuulivoimalan roottorin läpi virtaavan ilman energiasta saadaan teoriassa hyödynnet-  
tyä noin 59 prosenttia, käytännössä kuitenkin maksimissaan 50 prosenttia. Tuulivoi-  
malassa roottori aiheuttaa esteen virtauskenttään, jonka vuoksi virtaviivat hajoavat jo  
ennen roottoria ja roottorin takainen virtaus muuttuu pyörteiseksi. Lähellä roottoria  $V_0$   
>  $V_i$  >  $V_w$  ja  $P_0$  >  $P_i$  >  $P_w$ , kun alaindeksi 0 vastaa ylävirtauksen tilannetta,  $i$  roottorin  
kohtaa ja  $w$  roottorin takaista tilannetta. Roottori ei pysty hyödyntämään sen läpi kul-  
kevan ilmavirtauksen koko liike-energiaa. Albert Betz osoitti, että ilmavirtauksesta,  
joka kulkee roottorin läpi, saadaan enimmillään yhtälön

$$P_{\max} = \frac{16}{27} * \frac{1}{2} \rho A v^3, \quad (5)$$

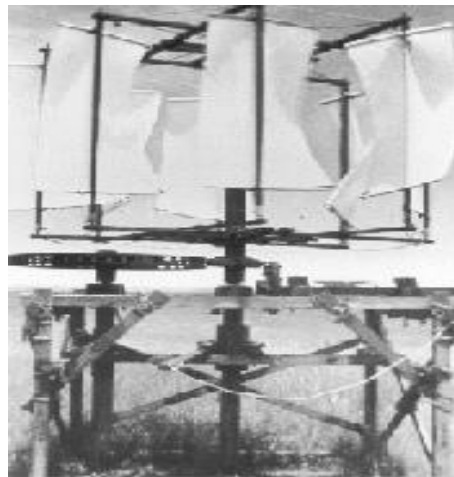
jossa  $P_{\max}$  on teho,  $\rho$  on ilman tiheys,  $A$  roottorin pinta-ala ja  $v$  ilmavirtauksen nopeus.  
Moderneilla tuulivoimaloilla, joissa roottorin pyörimisnopeutta ja lapakulmaa voidaan  
säätää, on mahdollista käyttää turbiinia lähellä Betzin rajaa. Ilman tiheys vaikuttaa  
tuulen energiaan ja tehoon. Tuulienergiälaskelmissa ja voimaloiden tuotantoarvioissa

käytetään useimmiten ilman tiheydelle likiarvoa  $\rho = 1,3 \text{ kg /m}^3$ . Tämä likiarvo vastaa merenpinnan tasossa ja standardi-ilmakehässä olevaa kuivan ilman tiheyttä, kun ilmanpaine on 1 atm ja ilman lämpötila on 15 °C. Tuotetun tehon arvioinnissa vuosittaisen ilman tiheyden vaihtelun huomioon ottaminen ei huomattavasti paranna laskentatarkkuutta, mutta kuukausikohtaisia tehoarvoja laskettaessa, saattaa yleisesti käytettyjen arvojen käyttö aiheuttaa jopa 5-6 prosentin virheitä. [1,2]

### 3 TUULIVOIMAN HISTORIA

#### 3.1 Tuulimyllyjen kehitys

Tuulivoima on tunnettu jo tuhansien vuosien ajan vaikkakin hieman eri sovellutuksissa kuin nykypäivänä. Jo tuhansia vuosia sitten liikkuvat laivat purjeidensa avulla Niilillä. Ensimmäiset käytännölliset tuulimyllyt tulivat käyttöön Persiassa 600-luvulla. Nämä olivat vertikaaliakselisia tuulimyllyjä, joissa oli pitkät pystysuorat kampiakselit joihin oli kiinnitetty neliskulmaiset lavat tai siivekkeet. Näitä siivekkeitä oli kuudesta kahteentoista ja ne olivat tehty ruokopunos- tai kangasmateriaalista. Näitä tuulimyllyjä käytettiin viljan, maissin ja sokeriruokojen jauhamiseen sekä veden ylösnostoon. Veden siirron tekniikkaa ei kuitenkaan tarkkaan tiedetä, koska piirroksia tai malleja ei ole säilynyt, ainoastaan suullista tietoa. Vertikaaliakselisia tuulimyllyjä käytettiin myös Kiinassa, jota myös usein väitetään niiden syntysijaksi. Vaikkakin laajalle levinnyt käsitys, että vertikaaliakselituulimyllyt keksittiin Kiinassa yli 2000 vuotta sitten, saattaa olla oikein, aikaisin varsinainen dokumentti kiinalaisesta tuulimyllystä on vuodelta 1219. Kuvassa 5 näkyy 1800-luvulla Yhdysvalloissa tehty malli persialaisesta tuulimyllystä. [2,5,6,7]



Kuva 5. Persialaisen tuulimyllyn malli. [6]

Ensimmäiset vaaka-akselituulimyllyt tulivat Eurooppaan 1100-luvulla, jolloin niiden on kirjattu otetun käyttöön yhtä aikaa Kaakkois-Englannissa, Pohjois-Ranskassa ja Flanderssissa Belgiassa. Vaikkakin ristiretkeläiset ovat saattaneet nähdä Lähi-Idän tuulimyllyjä, nämä vaaka-akselituulimyllyt olivat rakenteeltaan huomattavasti erilaisia. Ne olivat jalka- eli varvasmyllyjä, joissa määrittävänä tekijänä oli, että koko myllyn koneiston sisältävä myllyrakennus eli aitta on asetettu yhdelle pystysuuntaiselle matalalle tolपालle eli varpaalle. Myllyn pystytukki eli tammi voi kuitenkin olla pitkä aiheut-

taen myllylle usean metrin korkeuden. Tämä rakennelma mahdollistaa koko myllyn kääntämisen tuulensuuntaisesti. Kuvassa 6 voidaan nähdä ranskalainen jalkamylly. Tuulimyllyn siivekkeet, joita oli yleensä neljä, oli kiinnitetty vaakasuuntaiseen akseliin, joka rattaiston välityksellä aiheutti myllynkivien liikkeen. Tuulimyllyjen keskeiseksi sovellutusalueeksi muodostuikin viljanjauhatus, josta nimitys tuulimylly. Yksi tällainen paalumylly rakennettiin Englannissa vuonna 1137. Englannissa tähän aikaan oikeudet vesivoimapaikkoihin oli rajattu vain ylimystölle ja papistolle, joten tuulivoima oli tärkeä rahan lähde uudelle keskiluokalle. Koska viljan jauhattaminen tuulimyllyssä oli huomattavasti tehokkaampaa kuin käsimyllyssä jauhattaminen, tuulimyllyt yleistyivät nopeasti koko Euroopassa. Hollannissa oli 1700-luvulla jo peräti 100 000 myllyä. 1600-luvun lopulla Hollannissa alettiin käyttämään tuulivoimaa myös lankkujen sahaamiseen kahden miehen käsisahan sijasta. Moninkertaistettu lankkujen tuotantokyky mahdollisti Alankomaille satojen purjelaivojen rakentamisen ja siirtomaavallan aseman. [2,5,7,8]



Kuva 6. Ranskalainen jalkamylly keskiaikaisilla lavoilla. [9]

Jos koon ja lievän tehokkuuden kasvua ei oteta huomioon, eurooppalainen vaaka-akselituulimylly kehittyi hyvin vähän. Noin 1300-luvulla alkoi maaseudulle ilmestyä harakkamyllyjä. Nämä olivat käytännössä jalkamyllyjä, joissa ainoastaan aivan ylin osa, johon siivet oli kiinnitetty, käännettiin. Kyseisen myllyn koneisto sijaitsi myös käännettävässä yläosassa ja jauhatuslaitteet sijaitsivat myllyn alaosassa. Tällainen mylly esiintyy kuvassa 7. Heti harakkamyllyjen ilmestyttyä ilmestyivät mamsellimyllyt. Mamsellimyllyt taasen olivat käytännössä harakkamyllyjä, joissa myllyn paikallaan pysyvä osa oli tehty puun sijasta kivistä tai tiilistä. Tuulimyllyissä siivekkeitä oli

yleensä neljä, mutta jos siipiä oli enemmän, tuulimyllyn teho kasvoi ja siivekkeiden on sanottu pyörineen tasaisemmin. Ensimmäinen tieto useampiisiipisestä tuulimyllystä on vuonna 1774 Leedsissä esiintyneestä viisiisiipisestä tuulimyllystä. Useampi siipiset tuulimyllyt mahdollistivat siipien vioittuessa niiden irrottamisen pienemmällä tehon menetyksellä kuin nelisiipisissä tuulimyllyissä. Nelisiipisissä tuulimyllyissä yhden siivekkeen vaurioituessa vastakkainen siipi voitiin irrottaa, jolloin myllyn teho laski 60 prosenttiin alkuperäisestä. Kuusiisiipinen tuulimylly toimi kahdella, kolmella, neljällä tai kuudella siivekkeellä. Kahdeksansiipinen tuulimylly toimi kahdella, neljällä, kuudella tai kahdeksalla siivekkeellä. Viisiisiipinen tuulimylly toimi ainoastaan kaikilla viidellä siivekkeellään. Meni 1800-luvun loppupuolelle ennen kuin merkittäviä muutoksia tuulimyllyn rakenteessa tapahtui. Tämä muutos oli, että myllynkivet vaihdettiin rautasiin teloihin. [2,8,9]



Kuva 7. Englantilainen harakkamylly. [9]

Hollantilaiset parantelivat tuulimyllyä ja sovelsivat sen käytön myös järvien ja soiden kuivattamiseen Reinin suistoalueella 1300-lukuun mennessä. Tekniikan tultua käyttöön pystyttiin aluksi kuivattamaan 43 tuulimyllyllä 27 000 hehtaarin kokoinen alue. Siirtomaa-asukkaiden vietyä tämän tuulivoimalla toimivan pumpputekniikan Pohjois-Amerikkaan 1800-luvun lopulla alettiin sitä hyödyntää maataloilla. Näin ollen syntynyt "tuulipyörä" yleistyi nopeasti etenkin Yhdysvaltojen preerioilla. Tuulipyörien kehitys alkoi Yhdysvalloissa Halladay-tuulimyllystä vuonna 1854 jatkuen Aermotor- ja Dempster-malleihin, jotka ovat käytössä vielä tänäkin päivänä. Ensimmäisissä tällaisissa tuulimyllyissä oli neljä melamaista siivekettä. Seuraavassa mallissa oli puisia laattoja naulattuna puiseen vanteeseen. Useimmissa näistä tuulimyllyistä oli peräsin,

joka ohjasi sen toimimaan tuulta vasten. Joissakin malleissa oli nopeuden säätö, joka oli toteutettu laittamalla saranoita siivekkeiden osioiden väleihin, jotta siivekkeet taipuisivat taaksepäin kovassa tuulessa kuin sateenvarjo. Tämä toimenpide vähensi tuulen roottoriin aiheuttamaa pyörimisliikettä. Tärkein kehitys amerikkalaisessa tuulentintyyppisessä tuulimyllyssä oli terässiivekkeet vuonna 1870. Terässiivekkeet pystyttiin tekemään kevyiksi ja ne pystyttiin muokkaamaan tehokkaamman muotoisiksi. Terässiivekkeet toimivat itse asiassa niin hyvin, että niitä käyttävä tuulimylly tarvitsi nopeuden hidastavaa rattaistoa, jotta se voitiin kytkeä normaaliin vesipumppuun. Tuulipyöriä käytettiin myöhemmin myös sähköntuottoon kotitalouksissa ja teollisuudessa. Kuvassa 8 esiintyy amerikkalaistyylinen tuulimylly. [2,5,6,7,10]



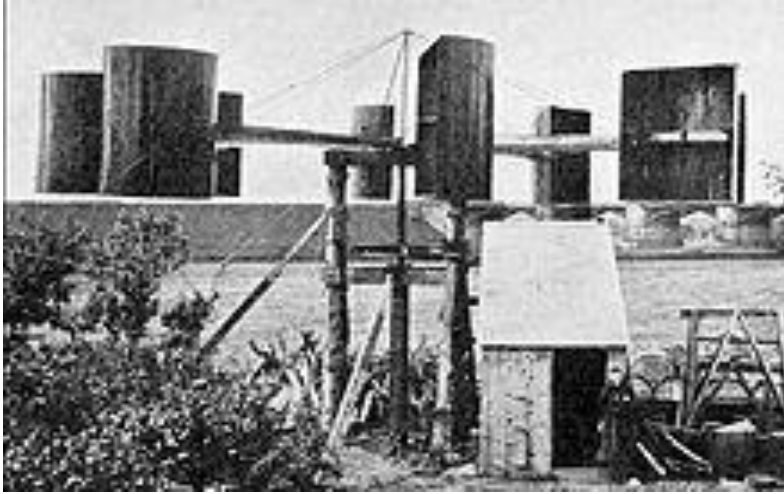
Kuva 8. Yhdysvaltalainen tuulipyörä. [6]

Suomessa ensimmäinen maininta tuulimyllyistä on vuodelta 1463 Turun alueelta. 1500-luvun lopulla tuulimyllyjä oli jo noin 400 kappaletta Turun saaristossa, Vakka-Suomessa ja keskisessä Varsinais-Suomessa. Toinen keskeinen tuulimyllyalue oli Etelä-Pohjanmaa. Itä-Suomeen tuulimyllyjä alettiin rakentaa vasta 1800-luvun puolivälissä. Nykyisen Helsingin keskustan alueella oli 1700-luvulla tuulisilla aukeilla ja kallioilla useita tuulimyllyjä, ilmeisesti näistä suurin Siltavuorella. Suomenlinnassa ollut suuri tuulivoimalaitos pyöritti sahaa, myllyä ja pumppulaitosta. Virallisten tietojen mukaan Suomessa oli 1800-luvulla 10 000 tuulimyllyä. Suomen tuulimyllyt olivat jalaka-, harakka- ja mamsellimyllyjä. Harakkamylly sai Suomessa nimensä pitkän hantäpuunsa ansiosta, joka sen muistuttamaan pyrstöään heiluttavaa kääntyilevää harakkaa. Mamsellimylly taas sai nimensä leningin kaltaisesta rakennelmastaan. Mamsellimyllyt tulivat ensin Etelä- ja Lounais-Suomeen sekä Hämeeseen ja yleistyivät vasta 1800-luvun lopulla sisämaassa. Savoan mamsellimyllyt eivät koskaan ehtineet ennen tuulimyllyjen ajan päättymistä. 1930-luku oli viimeisintä aikaa jolloin var-

sinaisia tuulimyllyjä on enää rakennettu Suomeen. Suomessa maatiloille pystytettiin myös useita amerikkalaistyyppisiä tuulipyöriä 1800-luvun lopulla ja 1900-luvun alussa. [2,7]

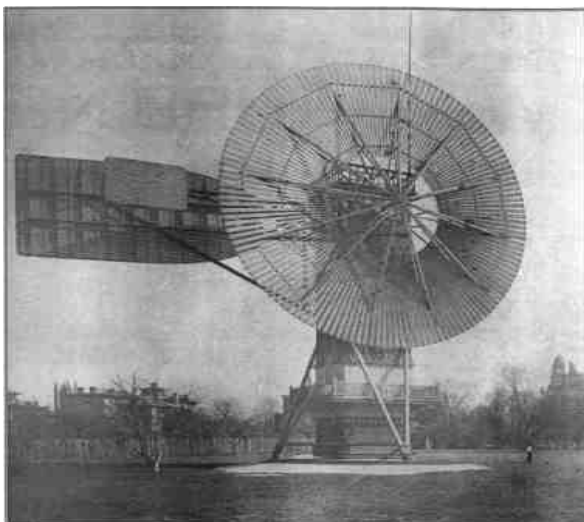
### 3.2 Tuulivoimalla tuotetun sähkön ensiaskeleet

Maailman ensimmäinen rakennus, jonka tiedetään tuottaneen sähköä tuulienergiasta, oli James Blythin rakentama tuulimylly. Blyth alkoi kokeilunsa tuulimyllyn rakentamisessa 1885. Heinäkuun lopulla 1887 lomahuvilallaan Marykirkissä hän rakensi tuulimyllyn, joka tuotti valoa sähköllä varastointikennojen avulla. Blythin tutkielma, joka toimitettiin Glasgowin filosofiseen yhdistykseen toukokuussa 1888, kuvaili tuulimyllyn olleen kolmijalkamallia. Tuulimyllyssä oli kymmenen metriä pitkä akseli, jota pyöritti neljä neljämetristä uloketta, joissa oli kiinni kangaspurjeet ja, jonka vauhtipyörä pyöritti narun avustuksella Burginin dynamoa. Blyth on luultavasti tutustunut Sir William Thompsonin sähkön tutkimuksiin Glasgowin yliopistossa, kummankin miehen kuuluessa Glasgowin filosofiseen yhdistykseen. Vuonna 1881 Thompson reagoi silloiseen ranskalaisten tekemään tutkimukseen akkumulaattoreista, nykyajan uudelleenladattavien paristojen esiasteesta, pitämällä luennon tuulen mahdollisuudesta tuottaa sähköä varastoon. Blyth patentoi ensimmäisen tuulimyllynsä 10. marraskuuta 1891 ja 13. toukokuuta 1895 hän rakennutti muunnellun turbiinin. Blythin uusi malli korvasi pystysuorat kangaspurjeet kahdeksalla 3 kertaa 1,8 metrin kokoisella puolisyylinterillä, joiden pyörittämä vertikaaliakseli pyöritti 1,8 metrin halkaisijaltaan olevaa vauhtipyörää. Tämä uusi malli, joka näkyy kuvassa 9, oli suunniteltu Thomas Robinsonin vuonna 1846 keksimän anemometrini pohjalta, jonka Blyth uskoi tasaavan turbiinin pyörimisnopeutta liian suurien nopeuksien estämiseksi. Testeissään Blyth huomasi, että jopa navakassa tuulessa uusi malli saavutti lopullisen nopeutensa ilman rakennelman holtitonta heilumista, tosin turbiinin vakaus todella kovissa tuulissa ei ollut taattua. Tämä turbiini oli käytössä 27 vuotta tuottaen 7,5 kilowattia varastointikennoihin ja kykeni valaisemaan koko Montrose-mielisairaalan, jonka pihalle se oli rakennettu. [5,11]



Kuva 9. James Blythin tuuliturbiini. [9]

Useita kuukausia Blythin keksinnön jälkeen vuonna 1888 amerikkalainen insinööri Charles Brush rakensi maailman ensimmäisen automaattisesti toimivan tuuliturbiinin kartanonsa taakse Clevelandissa Ohiossa. Blythin ja Brushin tuuliturbiinit erosivat toisistaan siinä, että Blythin turbiinissa ei ollut jarruttamista mahdollistavaa ohjausmekanismia, joka estäisi laitteen vahingoittumisen kovilla tuulilla, kun taas Brushin turbiini pystyttiin sulkemaan manuaalisesti. Brushin tuuliturbiini koostui 18,3 korkeasta rautatornista, 17 metriä halkaisijaltaan olevasta propellista, jossa oli 144 lapaa ja 18,3 metriä pitkistä ja 6,1 metriä leveästä pyrstöstä. Rautatornin sisässä oli 6,1 metriä pitkä akseli, joka pyöritti väkipyöriä ja hihnoja tuottaen dynamoon parhaillaan 500 kierrosta minuutissa. Dynamo oli kytketty 408 paristoon Brushin kartanon kellarissa. Paristot kykenivät pyörittämään kolmea sähkömoottoria ja valaisemaan 350 hehkulamppua, joiden valovoima oli 10-50 kandela, sekä kahta kaarilamppua. Brushin tuuliturbiini, joka näkyy kuvassa 10, tuotti huipussaan 12 kilowattia ja se kesti kaksikymmentä vuotta vuoteen 1909 asti. [5,6,11,12]



Kuva 10. Charles Brushin tuuliturbiini. [12]



### 3.3 Tuulivoimaloiden synty

Tanskalainen tiedemies, keksijä ja opettaja Poul la Cour on tunnettu aikaisesta työstään tuulivoiman parissa. Hän työskenteli niin kokeellisen aerodynamiikan kuin tuulivoimaloiden käytännöllisen toteutuksen parissa. 1890-luvulla la Cour teki tuuliturbiinitestejään suurimmaksi osakseen houkutelakseen ihmisiä takaisin maaseudulle, jotka sähkön sovelluksien aloittama teollistuminen oli houkuttanut kaupunkiin. Sähkölaitoksia rakennettiin moneen suureen kaupunkiin, mutta sähkön ollessa suoraa virtaa sitä ei voitu jakaa maaseudulle. Poul la Cour halusi myös maaseudun väestön hyötyvän sähköstä. Tarkoituksena oli helpottaa ja tehostaa maataloustöitä ja tarjota valoa lukemiseen ja työskentelyyn pitkinä synkinä talvi-iltoina. Tämä motivoi la Couria kehittämään tuulimyllyn, joka oli muita tehokkaampi ja tuotti sähköä. [13,14]

Alankomaissa oli tutkittu ideaa tuottaa sähköä tuulimyllyjen avulla, mutta huonoin tuloksin alhaisen tehokkuuden ja energiantalvointiongelmien vuoksi. Nämä ongelmat herättivät la Courin mielenkiinnon ja vuonna 1891 hän sai idean taltioida tuulen energiaa vedyksi ja hapeksi käyttäen elektrolyysiä. Tämä tapahtui siten, että tuulen siipiin aiheuttama voima pyöritti dynamo, jonka tuottama sähkö johdettiin vesisäiliöön. Vesisäiliöön johdettu sähkö pilkkoi veden happi- ja vetykaasuiksi, jotka kerättiin erillisiin säiliöihin. Tanskan valtio myönsi la Courille apurahan ja ensimmäinen kokeellinen tuulimylly pystytettiin kesällä 1891 Askoviin. Tähän myllyyn la Cour asensi differentiaaliregulaattorin, jotta sen tuottama teho olisi tasainen. Aluksi la Cour käytti kaasuja esimerkiksi Askovin kansalaisopiston valaisemiseen, mutta myöhemmin hän huomasi kaasujen soveltuvan myös kaasuhitsaukseen. La Cour etsi koko elämänsä uusia tapoja varastoida energiaa, koska hän piti akkumulaattoreita liian kalliina. Lopulta hän kuitenkin päätyi siihen, että realistisin ratkaisu on käyttää pientä akkumulaattoria, joka voi varastoida yhden päivän sähköntarpeen. La Cour käytti Askovin tuuliturbiinia demonstroidakseen kuinka tuuliturbiini voitaisiin asentaa pieneen yhteisöön. La Courin työn johdosta pieniä tuulivoimaloita alkoi ilmestyä kyliin, maatiloille ja meijereille. Koska sähkövoiman tiedon ja ymmärryksen puute sekä koulutettujen ihmisten vähäisyys hidasti sähköasennuksia maalaisyhteiskunnissa, la Cour perusti "Tuulisähköasentajien" yhdistyksen lokakuun 28. päivänä vuonna 1903. Yhdistyksen toimisto oli Askovin testituulivoimalassa. Yhdistys toimi konsulttoijana aina kun uusia tuulivoimaloita rakennettiin ja se alkoi kouluttamaan sähköasentajia harva-asutus-alueille. Tällä oli huomattava merkitys sähkön leviämisessä maaseuduille. Suuriturbiinisiin tuulivoimaloihin asennettiin myös varajärjestelmä, joka toimi bensiinillä tai kaasulla. Tuulisähköasentajien yhdistys oli yksi päätekijöistä aikaisen keskittämättömän sähköver-

kon syntyyn Tanskassa. Tämä sähköverkko kehittyi myöhemmin keskitetyksi korkeajänniteverkostoksi. [13,14]

Poul la Courille tuulimylly oli voimalaitos, jonka pitäisi tuottaa suurin mahdollinen määrä energiaa. Tämän vuoksi perinteistä tuulimyllyä täytyi muokata ja näin alkoivat la Courin kokeilut aerodynamiikan alalla 1896. Tuon ajan teoriat eivät mahdollistaneet tuulen vaikutuksen laskemista siipiin. Teorian ja käytännön yhteensopivuus saatiin aikaiseksi huolellisilla tuulitunnelikokeilla. Tanskalaisen tradition tällä alalla aloittivat H.C. Vogt Johan Irminger 1890-luvun alkupuolella. La Cour testasi tuuliturbiini mallejaan pienissä tuulitunneleissa. Hän kirjoitti kirjan "Testiturbiini" näiden kokeiden perusteella, joka oli monta vuotta kansainvälinen aapinen tuuliturbiinalalla. Kirjassaan la Cour havainnollistaa, kuinka tuuliruusut, eräänlaiset tuulidiagrammit, ovat käyttökelvottomia sähköntuotannossa. Hänen väittämänsä ideaalisesta tuuliturbiinista olivat, että sen täytyi pystyä pyörimään nopeasti, siinä täytyy olla mahdollisimman vähän lapoja, lapojen profiiliin täytyi olla aerodynaaminen ja lapojen viisteen täytyi olla hyvinkin kohtisuorassa tuulensuuntaa kohden. La Courin ideaalituuliturbiini ajatukse-  
na muistuttaa hyvin paljon nykyajan tietämystä asiasta. La Courin tuuliturbiinit kuitenkin olivat yleensä nelilapaisia ja muistuttivat hyvin paljon perinteisiä hollantilaisia tuulimyllyjä. La Cour teki kokeita tuulitunnelissa pienillä siipialueilla, tasaisilla ja käyrillä lavoilla mitaten aiheutuvan voiman suuruutta ja suuntaa. Hän havaitsi käyrän lapa-  
profiiliin hyödyt, se mahdollisti kolme kertaa suuremman voiman propellissa kuin tasainen lapaprofiili. Näiden kokeiden perusteella la Cour esitti ideaalisen tuulimyllyn, jonka lapojen teho olisi neljä kertaa enemmän kuin mittaamansa viiden olemassa olevan tuulimyllyn lapojen teho. Hän rakensi tällaisen tuuliturbiinin Askoviin vuonna 1899, mutta sen teho oli vain kaksinkertainen. La Courin suurimpien tuulivoimaloiden teho oli 20-60 kilowattia. Kaksikymmentä vuotta Poul la Courin kuolemasta vuonna 1929 Askoviin rakennettiin uusi tuulivoimala täysin la Courin idean mukaisesti, jolloin saavuttiin nelinkertainen teho. Tuulivoimala näkyy kuvassa 11. Ensimmäisen maailmansodan päätyttyä 25 kilowattiset tuulivoimalat olivat levinneet ympäri Tanskaa, mutta halvemmat ja suuremmat fossiilisilla polttoaineilla toimineet höyryvoimalat ajoivat tuulivoimalat konkurssiin. [2,6,13,14]



Kuva 11. Vuonna 1929 Poul la Courin idean mukaisesti rakennettu tuulivoimala. [14]

Vuoteen 1920 mennessä kaksi hallitsevaa tuulivoimalan roottorityyppiä olivat olleet amerikkalainen tuuletinmallinen roottori ja perinteinen siipimallinen roottori. Nämä eivät kuitenkaan kyenneet tuottamaan tarvittavaa määrää sähköä, mikä johti tarpeeseen kehittää tuulivoimaloita yhä edelleen. Yksi tällainen innovatiivinen tuulivoimala ranskalaisen George Darriuksen vuonna 1925 rakentama pystyakselinen tuulivoimala. Tämän tuulivoimalan siivekkeet kapeat ja ne olivat käyrästetty ja kiinnitetty pystysuoran putken ylä- ja alaosaan saaden tuulivoimalan muistuttamaan vispilää. Tämän tuulivoimalan etuna oli, että sen koneisto pystyttiin sijoittamaan maanpinnalle. Vasta 1960-luvulla tämä malli otettiin uudestaan kehityksen alle Kanadassa, jolloin suurin osa sen kehityksestä tapahtui. Vuonna 1931 Venäjällä aloitettiin kehitystyö "suurien" tehojen tuottamiseen tuulienergialla rakentamalla sadan kilowatin Balaclava tuulivoimala. Tämä laitos toimi noin kaksi vuotta Kaspianmeren rannalla tuottaen 200 000 kilowattitunnin verran sähköä. Tämän jälkeen rakennetut vastaavanlaiset kokeelliset tuulivoimalat Yhdysvalloissa, Tanskassa, Ranskassa, Saksassa ja Isossa-Britanniassa 1935-1970 välisenä aikana osoittivat, että suuren mittakaavan tuuliturbiinit toimisivat. Suuren kokoluokan tuuliturbiinia ei kuitenkaan näiden kokeiden perusteella koskaan rakennettu. Suurin sähkön massatuotantoon tarkoitettu tuulivoimala oli 1,25 megawatin Smith-Putnam laitos, joka rakennettiin Vermontiin vuonna 1941. Tässä tuuliturbiinissa oli kaksilapainen roottori, jonka halkaisija oli 53,3 metriä. Se toimi vuoteen 1945 asti kunnes massiivisen kokonsa vuoksi toinen lavoista murtui juuresta irti. Toisen maailmansodan aikana tanskalainen insinööritoimisto F.L.Smith rakensi kaksi- ja kolmelapaisia tuuliturbiineita, jotka kuten edeltäjänsäkin tuottivat tasavirtasähköä. Yksi näistä vuonna 1942 Bogø saarelle rakennettu tuuliturbiini oli tärkeässä osassa 1950-luvun tuulivoimantutkimusohjelmassa Tanskassa. [2,6,15]

### 3.4 Tuulivoiman leviäminen maailmalle

Euroopassa tuulivoiman kehittäminen jatkui toisen maailmansodan jälkeen, kun fossiilisten polttoaineiden saannin väliaikainen pieneneminen nosti energian hintoja. Tanskalainen insinööri Johannes Juul, yksi Poul la Courin ensimmäisistä oppilaista "tuulisähköasentajakursseilla", aloitti tuotekehitysohjelman yhteistyössä jakeluyhtiö SEAS:n kanssa, jonka seurauksena rakennettiin ensimmäinen koelaitos vuonna 1950. Tämän tuulivoimalan propellin säde oli 4 metriä ja sen generaattorin tuottama teho oli 15 kilowattia. Juulin kokeet tutkivat muun muassa tuuliturbiinin kärkinopeussuhdetta ja hän oli edelläkävijä maailman ensimmäisten vaihtovirtatuuliturbiinien kehittämisessä. Juul aloitti kokeilunsa takatuulilaitoksella ja huomaten sen haittapuolet ryhtyi hän kehittämään etutuulilaitosta. Juul paranteli myös tuuliturbiinin lavan geometriaa sen jarruttamisen helpottamiseksi ja kehitti edelleen käytössä olevan kärkijarruperiaatteen, jossa roottorin pyörimisnopeuden kasvaessa liian suureksi keskipaikoisvoima vapauttaa kärkijarrun. Bogø saarelle rakennettuun tuuliturbiiniin vaihdettiin vuonna 1951 35 kilowatin asynkronigeneraattori ja se oli silloin maailman toinen turbiini, joka tuotti vaihtovirtaa. [6,15,16]

Parissa vuodessa Juul uudisti laitoksen korvaamalla 17,5 metrin halkaisijaltaan olevan roottorin 13 metrisellä ja vaihtamalla generaattorin 45 kilowattiseen pystyen esittelemään uusimman lapaprofiilinsa vääntötehon. Vuonna 1956 Juul alkoi rakentamaan uutta tuulivoimalaa SEAS:lle Gedserin rannikolle Etelä-Tanskassa. Tämä kolmilapainen laitos valmistui vuonna 1957 ja nimettiin rakennuspaikkakuntansa mukaan Gedser-tuuliturbiiniksi. Tämä nykyaikaisen tuulivoimalan esikuvana pidetty innovatiivinen tuulivoimala, joka on kuvassa 12, tuotti 200 kilowatin tehon ja sillä oli tuotettu 2,24 gigawattituntia noin 350 megawattitunnin keskimääräisellä vuosituotannolla vuoteen 1967 asti, jolloin sille suoritettiin ensimmäinen täyshuolto. Voimala oli edelleen hyvässä kunnossa, mutta fossiilisten polttoaineiden hinnan aleneminen teki tuulivoiman jälleen kilpailukyvyttömäksi, joten se varastoitiin huolellisesti. Vuonna 1975 se kunnostettiin uudestaan käyttöön NASA:n pyynnöstä, joka halusi mittaustuloksia turbiinista Yhdysvaltojen uuteen tuulivoimaohjelmaan. Gedser tuulivoimala oli käytössä muutaman vuoden testituloksia varten, jonka jälkeen se purettiin ja sen kärkiosa ja roottori ovat nykyään näytteillä Bjerringbron sähkömuseossa Tanskassa. [6,15,16]



Kuva 12. Gedser-tuuliturbiini. [6]

Vuoden 1973 öljykriisi herätti kiinnostuksen tuulivoimaan monessa maassa. Tanskassa, Saksassa, Ruotsissa, Isossa-Britanniassa ja Yhdysvalloissa tähdättiin heti suurien tuuliturbiinien rakentamiseen. Nämä turbiinit tulivat kuitenkin erittäin kalliiksi ja korkea energian hinta muodostui avaintekijäksi tuulivoiman vastaisuudessa. Tanskassa kuitenkin maaseudun väki alkoi perustaa pieniä tuuliosuuskuntia ja alalle syntyneet pienet pajat kehittivät koko ajan suurempia voimaloita. Tanskan lainsäädännön mukaan sähkönmyynti verkkoyhtiöiden hallitsemiin verkkoihin oli mahdollista ja kannattavaa. Vuonna 1980 yleistyivät 55 kilowatin tuuliturbiinit ja vuonna 1984 75 kilowatin turbiinit, joita asennettiin verkkoon useita. Näiden voimaloiden omistajia olivat pääasiassa yksityiset yhdistykset, mutta myös itse laitosvalmistajat. Kaupallisten tuulivoimalaitosten vallitsevaksi malliksi muodostui niin sanottu tanskalainen standardi, jossa vaaka-akselinen kolmilapainen roottori pyörii vastatuuleen. Tanskan valtio tuki tuulivoiman tuotantoa ja kehitystyötä ja tuulivoiman leviytystä maailmanmarkkinoille tuli siitä nopeasti kehittyvä ja työllistävä tuotannon ala Tanskassa. 1980-luvun puolivälistä 1990-luvun alkuun pääasiallinen vientialue oli Yhdysvallat ja erityisesti Kalifornia. Markkinoilla olivat erinäisten tanskalaisyhtiöiden 90-100 kilowatin sakkaurajoitteiset ja kärkejarruilla varustetut tuuliturbiinit. Jo vuonna 1985 alettiin koekäyttämään tuulipuistoja, joita valmistajatehtaat rakensivat omaan käyttöön. Vuonna 1988 myös sähköyhtiöt kiinnostuivat tuulipuistoista, sillä niiden tuottama teho oli megawattiluokkaa. Kalifornian tuulivoimalat tehtiin juurikin tuulipuistoiksi, joista tanskalaisetkin ottivat mallia. [2,6,15,16]

Vuonna 1987 tuulivoimaloiden koko kasvoi 200 ja 250 kilowattiin. Tanskalainen yhtiö Vestas toteutti ensimmäisenä lapakulmasäätöisen V25-200 kW mallin, jonka seuraajasta vuonna 1989 kehitetystä V27-225 kW mallista tuli maailman eniten myyty tuulivoimala. 1990-luvulla tuulivoimaloiden teknisten konseptien kirjo kasvoi, vaikka niiden ulkomuoto oli hyvin samanlainen. Markkinaosuuttaan kasvattivat vaihteettomat tuulivoimalat, joissa generaattori on kiinni suoraan roottorin navassa ilman erillistä pääakselia ja vaihdetta. Suuremman kokoluokan laitoksissa lapakulman säätöön perustuva tehon rajoitus tuli yleisemmäksi kuin passiivinen sakkausrajoitus. 1990-luvulla melkein jokainen valmistajatehdas ryhtyi kehittämään off-shore teknologiaa, jossa tuulivoimalat rakennetaan veteen. Vuonna 1995 energiayhtiö Midkraft rakennutti Tanskan silloin toisen off-shore tuulipuiston, jonka teholuokka oli 5 megawattia. Puistoon kuului kymmenen tuulivoimalaa ja sen laskettu vuosituotanto oli 15 gigawattia. [2,6,15,16]

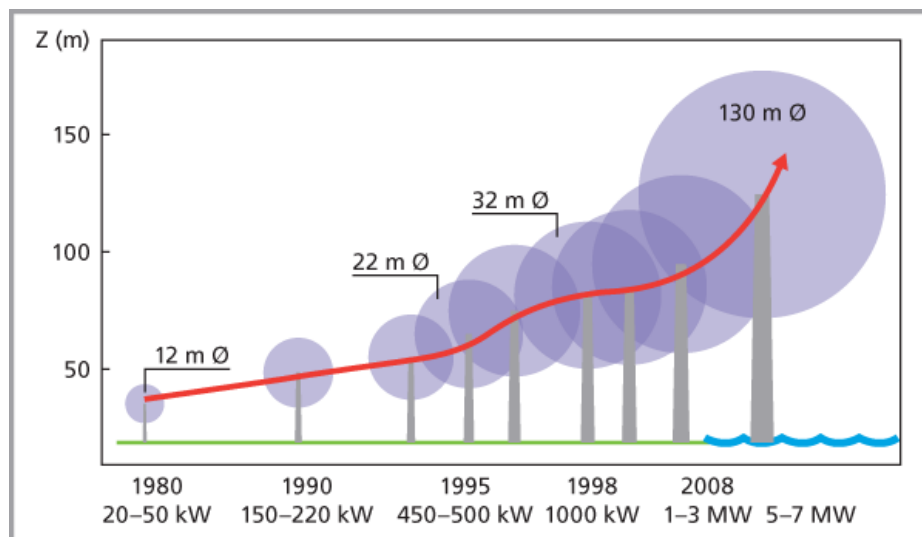
## 4 TUULIVOIMA NYKYPÄIVÄNÄ

### 4.1 Yleistä tuulivoimaloista

Tuuliturbiineista puhuttaessa usein tarkoitetaan koko tuulivoimalaitosta, joka muodostuu muun muassa roottorista, konehuoneesta, mastosta ja perustuksesta. Aluetta, jossa on useita toisiinsa liitettyjä tuulivoimaloita, jotka kytkeytyvät yhtenä kokonaisuutena sähköverkkoon, kutsutaan tuulipuistoksi. Etteivät turbiinit vaikuttaisi toistensa tehoon, on tärkeää, että ne sijoitetaan tarpeeksi kauas, vähintään viisi kertaa propellin halkaisijan mitan päähän, toisistaan. Tuulivoimaloita on useita erilaisia, pystyakselisiä, vaaka-akselisiä sekä eri lapamäärän omaavia. Tuulivoimaloiden selkein erottelutapa on niiden jakaminen pysty- ja vaaka-akselisiin. Tämän lisäksi tuulivoimalat voidaan erotella myös toimintaperiaatteen ja säätötavan mukaisesti. Suurvoimatuotannossa yleisimmin käytetyt tuulivoimalat ovat kolmilapaisia ja vaaka-akseloituja. Pienissä tuulivoimaloissa, jotka on esimerkiksi tarkoitettu mökkikäyttöön, on yleensä kaksi tai kolme lapaa. Kaupunkialueella kiinteistöjen katoille on asennettu pystyakselisiä niin sanottuja Savonius-voimaloita. [1,2]

Vanhan ajan tuulimyllyissä siipien pyöriminen perustui tuulen painevoimaan. Nykyajan tuulivoimaloissa roottorin pyöriminen aerodynaamisesti muotoiltuine lapoineen perustuu tuulen aiheuttamaan nostevoimaan. Isokokoisen tuulivoimalan roottorin kierrosnopeus on noin 20 - 30 kierrosta minuutissa. Tuulivoimalan kokoa voidaan kuvata usealla eri tavalla kuten nimellisteholla, pyyhkäisyypinta-alalla, potkurin halkaisijalla, vuosituotolla, napakorkeudella tai painolla. Useimmiten koon kuvaamiseen käytetään kuitenkin nimellistehoa, joka on tuulivoimalan suurin tuottama teho. Viimeisen kolmenkymmenen vuoden aikana tuulivoimaloiden koko on kasvanut moninkertaisesti. Vuoden 1981 viisitoista metriä halkaisijaltaan olevasta tuulivoimalan roottorista ollaan päästy vuoteen 2009 mennessä 6,7 kertaa suurempaan propelliin. Viiden megawatin koelaitoksissa potkurin halkaisija on peräti 130 metriä. Tuulivoimaloiden tornien kokokin on kasvanut 22 metristä sataan metriin ja Euroopassa jo 130 metriin. Yleensä 500 - 1650 kilowatin tuulivoimalaitoksessa on tornin korkeus 50 - 90 metriä ja roottorin halkaisija 40 - 70 metriä. Tuulivoimalan torni on eurooppalaisissa laitoksissa yleensä putkirakenteinen terästorni, joka on kiinnitetty betoniseen perustukseen. Suomessa käyttöön ollaan ottamassa myös hybriditorni, jonka alin 50 metrin osa on betonia ja loput 50 metriä on terästä. Hyötysuhteen kasvettua parantuneen aerodynamiikan ansiosta sekä tuuliolosuhteiden parannuttua korkeampien tornien vuoksi, on tuulivoimaloiden tuottama teho kasvanut 55 kilowatista 3000 kilowattiin ja jopa

5000 kilowattiin, sekä vuosituotto on yli satakertaistunut. Tuulivoimalan vuosituotto tarkoittaa voimalan vuodessa tuottamaa energiaa, jonka yksikkönä käytetään esimerkiksi MWh/a. Kuvassa 13 on esitetty tuulivoimaloiden koon kasvu 1980-luvulta lähtien. [1,2]



Kuva 13. Tuulivoimaloiden koon kasvu alkaen 1980-luvulta. [2]

## 4.2 Kaupalliset tuulivoimalat

Modernit 1-5 megawatin kaupalliset tuulivoimalaitokset ovat vaak akselisiä ja kolmilapaisia etutuulilaitoksia. Vaaka-akselinen kolmilapainen etutuulipropelli on energian tuotannossa yleisimmin käytetty tyyppi sekä taloudellisesti edullisin. Tällaisen propellin pyyhkäisy pinta-ala on suuri, jopa hehtaarin luokkaa, ja sen tuottama teho on suoraan verrannollinen pyyhkäisy pinta-alaan. Potkurin pinta-ala on verraten pieni eli noin 2-3 % sen pyörähdys pinta-alaan nähden, joten suuren pinta-alaan käyttöön tarvitaan verraten pieni määrä materiaalia. Propellin hyötysuhde on erinomainen verrattuna muihin tyypeihin ja se on rakenteellisesti kevein ja luotettavin pitkäaikaisessa käytössä. Tuulivoimalassa lapojen lukumäärä määräytyy ensisijaisesti kärkinopeussuhteesta. Kärkinopeussuhde ja lavan nostovoimakertoimen määrittelevät yhdessä lapojen yhteen lasketun leveyden suhteen koko pyörähdys pinta-alaan eli pyyhkäisy pinta-alaan. Hitaasti pyörivässä tuulivoimalassa yhteinen lapojen leveys on suuri ja nopeasti pyörivässä vastaavasti pieni. Kolmilapaisessa potkurissa massahitusvoimat ovat tasapainossa kaikkien akselien suhteen ja se on pyörähdys symmetrisesti tasapainossa. Kolmilapainen voimala on myös ulkonäöltään miellyttävämmän näköinen. Massahitusvoimien erot vaak- ja pysty akselin suhteen aiheuttavat koneistoa rasittavaa värinää tuuleen käännettäessä, jos tuulivoimalassa on vähemmän kuin kolme



lapaa. Kaksi- tai yksilapaisessa tuulivoimalassa potkurin kääntö tuuleen sujuu kevyesti lavan tai lapojen ollessa pystyssä, mutta estyy miltei kokonaan lavan ollessa vaaka-asennossa. [2]

Vaaka-akselista tuulivoimalaa kutsutaan myös potkurikäyttöiseksi tuulivoimalaksi. Useimmiten potkuri pyörii pienehköllä nopeudella, joten generaattorin ja potkurin väliin tarvitaan yleensä ylennysvaihte. Potkurilla on sitä pienempi pyörimisnopeus mitä suurempi sen halkaisija on, koska potkurin kärkinopeus halutaan rajoittaa, lähinnä melusyistä, alle melurajan, joka on 70 m/s. Potkuri suunnataan aina tuulta vasten, jotta voimala tuottaisi mahdollisimman suuren tehon. Potkurin suuntaus perustuu joko tuuliviiriperiaatteeseen tai tuulen vallitsevan suunnan mittaamiseen sekä sähkö- tai hydraulimoottorilla tehtävään suuntaukseen. Kun potkuria käännetään kohti tuulta, koriolisvoima pyrkii kiertämään potkurin akselia joko ylös- tai alaspäin, riippuen käännön suunnasta. Etenkin kaksilapaisia potkureita käännettäessä koriolisvoima aiheuttaa voimakasta tärinää rasittaen potkuria ja sen akselia. Kolmi- ja useampilapaisissa potkureissa tällaista tärinää ei synny, koska koriolisvoimasta johtuvat hitausvoimat ovat tasapainossa. [2]

Tuulivoimalan konehuoneessa sijaitsevat generaattori, vaihteisto ja säätö- sekä ohjausjärjestelmät. Vaihteiston tehtävä on muuntaa roottorin matala 10 - 40 rpm:n kierros-luku generaattorille sopivaksi eli 1000 - 1500 rpm:ään. Generaattori on yleensä 4- tai 6-napainen epätahtigeneraattori, jonka pyörimisnopeus määräytyy sähköverkon taajuudesta. Konehuone kääntää propellia tuulen suuntaan erillisten moottoreiden, suunta-antureiden ja säätölaitteiden avulla. Konehuoneen kuori ja runko tehdään useimmiten teräksestä tai lasikuidusta. Tuulivoimalan roottorin lavat valmistetaan nykyään yleisimmin komposiittimateriaaleista, jotka sisältävät lasikuitua ja jotkin myös hiilikuitua tai puuta yhdessä polyesterin tai epoksin kanssa. Lavoilla säädetään tuulivoimalan tehoa joko sakkaukseen tai lapakulmasäätöön perustuen. Lavat toimivat myös laitoksen pysäytysmekanismina, jolloin pysäytys tapahtuu kärkijarrujen avulla sakkauksäätöisissä laitoksissa tai kääntämällä lavat pois tuulesta aktiivisella sakkauksella varustetuissa ja lapakulmasäätöisissä laitoksissa. Lisäksi erillisenä laitoksen pysäytysmekanismina toimii levyjarru joko hitaalla tai nopealla akselilla tai molemmilla. Kuvassa 14 nähdään kolmilapainen tuulivoimala koneistoineen ja osineen. [2]



Kuva 14. Kolmilapainen vaaka-akselinen tuulivoimala koneistoineen.  
[17]

#### 4.3 Tuulivoimalan ohjaus

Tuulivoimalan tuottamaa tehoa on tarvetta rajoittaa laitteiston maksimiarvoon tuulen nopeuden kasvaessa liian suureksi. Tämä voidaan toteuttaa aerodynaamisesti joko lapakulmasäädöllä, jossa vähennetään lapojen kantovoimaa, tai sakkaussäädöllä, jossa lisätään lapojen vastusta. Lapakulmasäädössä tuulivoimalan tehon optimointi sekä rajoitus tehdään muuttamalla lapakulma tilannetta vastaavaksi. Lapakulmasäätö on mahdollista toteuttaa sekä kiinteällä että muuttuvalla pyörimisnopeudella. Lapakulma on aerodynaamisesti paras tapa ohjata ja säätää tehoa, mutta se vaatii toimiakseen kehittyneen ohjausjärjestelmän. Lapakulmasäädössä lapa on pysäytettynä eli lepuutusasennossa, kun sen etureuna on kohtisuorassa tuulta vasten, jolloin lapakulma on 90 astetta. Käynnistyksessä lapa käännetään 45 asteen kulmaan ja pidetään siinä kunnes propelli pyörii kunnolla, jonka jälkeen lapakulmaa voidaan pienentää. Kevyellä tuulella paras lapakulma on noin  $-3^\circ$ . Kun tuuli voimistuu, lapakulmaa säädetään positiiviseen suuntaan. Myrskyraja lapakulmasäädössä on noin  $25^\circ$ . Kun potkuri halutaan pysäyttää kasvatetaan lapakulmaa kohti lepoasentoa ja noin  $30^\circ$ :n kohdalla voimala hidastuu, kun nostevoimaa ei enää synny. Lapakulmaa kasvatettaessa kohti lepuutusasentoa potkuri pysähtyy kokonaan. Häätapauksissa potkuri voi-

daan pysäyttää erittäin nopeasti kääntämällä lapakulma nopeasti lepuutusasentoon. Muuttuvaan pyörimisnopeuteen perustuva säätö on yleistynyt yhtä aikaa lapakulmasäädön kanssa, koska sillä saavutetaan paras hyötysuhde. Paras hyötysuhde tuulivoimalalla saavutetaan tietyllä kärkinopeussuhteella, joka on riippuvainen voimalan rakenteesta. Kun tuulivoimala toimii muuttuvalla pyörimisnopeudella, pystytään toimimaan parhaalla hyötysuhteella koko tehokäyrän nousevalla osalla, joka on voimalan toiminta-alue suurimman osan ajasta. [2]

Aktiivisessa sakkaussäädössä pidetään tuulivoimalan pyörimisnopeus vakiona. Tämän säädön avulla pystytään säätämään tehokäyränmuotoa sakkauttamalla lapa haluttuna hetkenä. Sakkausta voidaan ohjata alkamaan kääntämällä lapakulmaa poispäin tuulesta sitä enemmän mitä kovemmin tuulee. Sakkaussäädössä lapa on levossa, kun sen jättöreuna on tuulta vasten. Aktiivisakkaavaa tuulivoimalaa käynnistettäessä potkuri käännetään ensin normaaliin käyntiasentoon. Sakkaussäädössä säätömenetelmä voi periaatteessa olla samanlainen alle nimellistuulen nopeuksilla kuin lapakulmasäädössä, mutta viimeistään nimellisteholla säädön suunta muuttuu päinvastaiseksi. Sakkaussäädössä potkurin etureunaa käännetään poispäin tuulesta eli lisätään kohtauskulmaa, kunnes haluttu sakkausteho saavutetaan. Kääntämällä kulmaa vielä lisää koko propelli pysähtyy. Jotta lapa on levossa, kääntöä on jatkettava kunnes jättöreuna on täydellisesti tuulta päin. [2]

Turvallisuussyistä tuulivoimalalle asetetaan suurin sallittu tuulennopeus, jolloin voimala täytyy pysäyttää. Tällöin puhutaan myrskysäädöstä. Pysäyttämiseen käytetään arodynaamista jarrutusta joko erillisellä jarrulla tai kääntämällä lavat tuulta kohden. Säätö- ja pysäytysjärjestelmät riippuvat tuulivoimalan mallista. Sakkausrajoitteisissa tuulivoimaloissa pysäytykseen tarvitaan voimakas aerodynaaminen jarru. Kokonaan kääntyvä kärkiosa, joka kääntyy poikittain tuulen voimalaa pysäyttäessä, on yleisin käytössä oleva malli. Kärkijarrun pituus on alle kymmenen prosenttia lavan pituudesta. Jokaisen lavan kärjessä on jarru, joka yksinään riittää koko voimalan pysäyttämiseen. Tällainen menettely on tarpeen, koska myrskytilanteessa jarrun toimimattomuus voi johtaa pahimmillaan voimalan hajoamiseen. Kärkijarrun ohjaus ja avautuminen perustuu useimmiten keskipakovoimaan ja jarrujen liike on sidottu kaapeleilla toisiinsa. Kaapelien tarkoituksena on aiheuttaa tasainen jarruvaikutus kaikkiin lapoihin. Kiinteälapaisissa tuulivoimaloissa kärkijarru on yleisin ratkaisu luotettavuutensa vuoksi. [2]

Aerodynaamisia jarruja on kärkijarrun lisäksi esimerkiksi lavan kärkeen saranoilla kiinnitetty vastuslevy, joka avautuu esimerkiksi keskipakovoiman vaikutuksesta.

Vastuslevyjarru aiheuttaa auetessaan voimakkaan kohinan ja on altis jäätymiselle ja likaantumiselle. Tällainen jarru on käytössä jossain määrin pienissä tuulivoimaloissa. Yksi tuulivoimalan pysäytystapa on kääntää potkurin kehä kokonaan pois tuulesta. Tämä tapa on käytössä vain pienissä voimaloissa, joissa potkurin halkaisija on alle kymmenen metriä, koska hyrrävoimat kasvavat liian suuriksi lavan pituuden ja painon kasvaessa. Hyrrävoimien kasvusta aiheutuu voimalan kääntymisen hidastuminen, joten jarrutussysteemi ei ehtisi toimia puuskatilanteessa. Tämä menetelmä soveltuu oivallisesti kiinteäläpöisille pienvoimaloille. Lapakulmasäätöisissä tuulivoimaloissa myrskypysäytys toimii kuten normaali säätö. Kun lavan etureuna on käännetty kohtisuoraan tuulta vasten ja propelli on pysähtynyt, se lukitaan paikoilleen mekaanisella jarrulla. Tuulivoimaloissa voi olla myös mekaaninen levy- tai rumpujarru auttamassa aerodynaamisen jarrun toimintaa jarrutuksen loppuosalla varmistamassa, että propelli pysähtyy kokonaan. [2]

#### 4.4 Pysty akseliset tuulivoimalat

Pysty akselisiä tuulivoimaloita ovat esimerkiksi Windside-, Savonius- sekä Darreius-turbiinit. Näissä voimaloissa roottorin pyyhkäisy pinta-ala on pyörivän roottorin suurin tuulta vasten oleva kohtisuora pinta-ala ja roottorin napakorkeus on sen pyyhkäisy pinta-alan keskipisteen korkeus maan pinnasta. Pysty akselinen tuulivoimala ei tarvitse erillistä tuuleen suuntausta ja se toimii samalla lailla tuulen suunnasta riippumatta. [2]

Savonius-tuuliturbiinilla on kohtuullinen hyötysuhde ja hyvä vääntömomentti alhaisilla kierrosnopeuksilla. Sen kehitti ja patentoi suomalainen Savonius 1930-luvulla. Vaikka Savonius-turbiini on riippumaton tuulen suunnan vaihtelusta sen käynnistys- ja pyöritysmomentti riippuvat turbiinin asennosta tuulen suhteen. Turbiinin pyöritysmomentin vaihtelu siiven eri asennoissa aiheuttaa kierroksen aikana nykimistä. Usein turbiineita on rakennettu kaksi päällekkäin keskenään 90 asteen kulmaan nykimisen vähentämiseksi. Myös varsin voimakas poikittaisvoima rasittaa turbiinia ja sen rakenteita. Suuressa Savonius-turbiinissa massiivinen koko muodostuisi ongelmaksi taloudellisen kannattamattomuuden ja tukirakenteisiin kohdistuvan rasituksen vuoksi. Parhaimmillaan Savonius-turbiini on siellä missä tarvitaan kohtuullisen pientä tehoa ja pyöritysnopeutta kuten vesipumpuissa ja katolle sijoitettavissa ilmastointiputkesta ilmaa imevissä roottoreissa kuten kuvassa 15. Turbiinin rakenteen kestävyys voi olla uhattuna kovilla myrskyillä, koska epätasainen kuormitus aiheuttaa rakenteeseen värähtelyä ja väsytyä. Kun tuulen nopeus kasvaa, Savonius-turbiinin tehokerroin

pienenee ja vääntömomentin kasvu loiventuu, mikä vähentää turbiinin generaattorin ylikuormittumisvaaraa. [2,18]



Kuva 15. Ilmastointitekniikassa käytettäviä Savonius-turbiineita talon katolla. [18]

Windside-tuuliturbiinin kehitti suomalainen Risto Joutsiniemi 1980-luvun alussa Savonius-turbiinin pohjalta ja sen on patentoinut suomalainen Windside Oy. Windside Oy on kehittänyt myös generaattorin, joka Windside-turbiiniin asennettuna poistaa ylennysvaihteen tarpeen. Windside-turbiinissa on poistettu Savoniuksessa esiintynyt käynnistysmomentin riippuvuus tuulen suunnasta ja käynnin epätasaisuuteen liittyneet ongelmat ohjaamalla turbiini kiertymään ruuvin tavoin tuulessa. Windside-turbiinin pääkomponentit ovat kaksi poikkileikkaukseltaan lähes puolipyörän muotoista pituussuunnassa spiraaliksi kierrettyä lapaa, jotka sijaitsevat kiertosymmetrisesti pystysuoran akselin suhteen tasapainottaen toistensa keskipakovoimat. Lavat ovat kolmiulotteisesti käyrästetty ja ne ovat kiinnitetty keskiakseliin. Windside-turbiinin muotoilu näkyy kuvassa 16. Turbiinin roottori pystytään laakeroimaan joko ulokkeeksi tai kiinnittää molemmista päistä. Roottorin pyöriminen aiheuttaa ylöspäin suuntautuvan voiman, joka keventää rakenteen painoa. Tähän mennessä on valmistettu vain pieniä Windside-tuuliturbiineita, joista suurimmat ovat olleet halkaisijaltaan metrin ja korkeudeltaan neljä metriä. Turbiinin kokoa voidaan periaatteessa kasvattaa skaalamalla kaikki mitat suuremmaksi geometriset muodot säilyttäen, mutta koon kasvu kuitenkin vaikuttaa moniin niin aerodynaamisiin kuin rakenteellisiin tekijöihin. Windside-tuulivoimala on suunniteltu toimimaan itsenäisenä yksikkönä vaikeissakin sääolosuhteissa. Turbiineja on käytössä muun muassa meriolosuhteissa ympäri maailmaa sekä Etelämantereella. Windside-turbiinin hyötysuhde on parempi kuin muilla pystyakselisillä turbiineilla ja parempi kuin potkurimalleissa, kun tuulen nopeus on alle

5 m/s. Windside-turbiini alkaa tuottamaan sähköä tuulen nopeuden ollessa 2 m/s, kun potkurimallit taasen tarvitsevat vähintään noin 3-4 m/s tuulenopeudeksi. Tästä johdun Windside-tuulivoimalat tuottavat sähköä noin 120 päivänä enemmän kuin potkurivoimalat. [2,19,20]



Kuva 16. Windside-tuulivoimala. [20]

Darrieus-tuulivoimala koostuu pysty akselista, johon on kiinnitetty kaarevat lavat, jotka kiinnittyvät akselin ylä- ja alapäähän saaden voimalan näyttämään taikinavatkaimelta. Darrieus-turbiini ei käynnisty ilman ulkopuolista apua vaan tarvitsee alkupyörityksen, joka antaa turbiinille vähintään kolme kertaa tuulen nopeutta suuremman kehänopeuden. Käynnistykseen käytetään joko sähkömoottoria tai samalle akselille kytkettyä Savonius-turbiinia. Etuna Darrieus-turbiinissa on sen suuri pyörimisnopeus, joka helpottaa generaattori-vaihteiston rakentamista. Toisena etuna on se, että voimalan koneisto voidaan rakentaa sen alapäähän, lähelle maata. Darrieus-tuulivoimaloita ei enää juurikaan käytetä kaupallisissa sovellutuksissa. Darrieus-turbiinilla voidaan päästä ihanneolosuhteissa potkurivoimalaa vastaavaan hyötysuhteeseen, joskus jopa parempaan. Käytännössä kuitenkin ei olla päästy lähellekään potkurivoimalan kokonaishyötysuhdetta. Suurimpana ongelmana Darrieus-voimaloilla on ollut niiden mekaaninen kestävyys. Tuulivoimalassa lapojen pyöriminen tasoittaa keskisalkoon kohdistuvia voimia, mutta toisaalta keskisalkoon kohdistuvat keskipaikoisvoimat aiheuttavat helposti värähtelyä rakenteessa. Keskisalalon jäykistys on ongelma tuulivoimalassa, sillä se on vaikea toteuttaa vaijereilla ja tämä johtaa helposti läpimitaltaan suureen keskisalkoon. Roottorin lavat ovat lisäksi osittain liian matalalla hyvää hyötysuhdetta ajatellen ja lapoihin kohdistuva tuulenpaine vaihtelee eri pyörimissektorin osissa aiheuttaen tehon vaihtelua ja resonointia lavoissa. Darrieus-

tuulivoimalan lapojen täytyy olla yhtä aikaa keveitä sekä jäykkiä, joka aiheuttaa kovat vaatimukset valittavalle materiaalille. Kuvassa 17 näkyy Darreius-tuulivoimala. [21,22]



Kuva 17. Darreius-tuulivoimala. [22]

#### 4.5 Tuulivoimatuotanto

Tuulivoimaloiden sähkön tuotantoa ei voida suoraan verrata toisiinsa, koska tuulivoimalat ovat erikokoisia. Yleensä tuulivoimaloiden tuotantolukuja verrataan kahden tunnusluvun avulla, joko suhteuttamalla tuotanto nimellistehoon, josta saadaan huippukäyttöaika, tai roottorin pyörähdyspinta-alaan. Tuulivoimala on tuottanut todella hyvin, jos sen vuosituotanto ylittää  $1000 \text{ kWh/m}^2$  tai huippukäyttöaika on yli 2400 h. Heikot tunnusluvut voivat selittyä joko huonoilla tuuliolosuhteilla, suurilla häiriömääriillä tai teknisillä vioilla. Huomioitavaa on myös, että tuulivoimala, jonka roottori on suhteessa suuri generaattorin kokoon, eli niin sanottu heikkojen tuulten laitos, antaa suuren huippukäyttöajan, mutta pienen tuoton pyörähdyspinta-alaa kohden. Kun taas tuulivoimala, jossa on suuri generaattori suhteessa roottoriin, antaa päinvastaiset tunnusluvut. [23]

Tuotanto roottorin pyyhkäisyypinta-alaa kohden, jonka yksikkö on  $\text{kWh/m}^2$ , lasketaan kaavasta

$$e = \frac{\text{Energia}}{\pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2}, \quad (6)$$

jossa  $e$  on tuotanto roottorin pyörähdyspinta-alaa kohti ja  $D$  roottorin halkaisija ja  $Energia$  on tunnissa tuotettu teho kilowatteina. Tuulivoimalan kapasiteettikerroin  $CF$  lasketaan kaavalla

$$CF = \frac{Energia}{Nimelliste\ ho(kW) * aika(h)} \quad (7)$$

Huipunkäyttöaika  $t_n(h)$  lasketaan kaavalla

$$t_n = \frac{Energia}{Nimelliste\ ho(kW)} \quad (8)$$

Seisokkiaika tarkoittaa aikaa, jolloin tuulivoimalalla on käyttökatko huollosta, viasta, ohimenevästä häiriöstä tai muusta pysäytyksestä johtuen. Tuulivoimalan normaali-toimintaan kuuluvia tuottamattomia aikoja ei lasketa seisokkiaikaan. Sähköverkosta aiheutuneet seisokit, jotka eivät vähennä laitoksen teknistä käytettävyyttä, lasketaan mukaan seisokkiaikaan. Tuulivoimalan tekninen käytettävyys lasketaan kaavasta

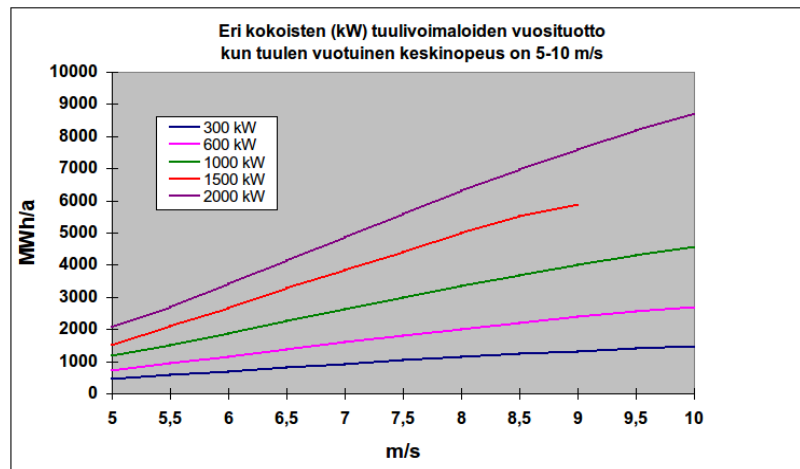
$$Tekninen\_kaytettavyys(\%) = \frac{tunnit - (seisokkiaika - sähköverkkohäiriöt)}{tunnit} \quad (9)$$

Suomessa viimeisen kymmenen vuoden aikana tuulivoimaloiden keskimääräinen käytettävyys on ollut välillä 91 % ja 96 %. Keskimääräinen tekninen käytettävyys vuonna 2009 oli 91 %, kun laskennassa ei ole otettu huomioon sähköverkon aiheuttamia sähkökatkoja. Tuotantoindeksi (%) tarkoittaa sääasemalta mitattujen tuulennopeushavaintojen perusteella laskettua tuotantoa suhteessa pitkän aikavälin havainnoista laskettuun keskimääräiseen tuotantoon. 1500 kW:n tuulivoimalan tehokäyrää käyttäen tuulennopeushavainnot voidaan muuttaa keskitehoksi. Huomioon otetaan myös lämpötilan vaihteluista johtuvan ilman tiheyden vaihtelun vaikutus tuotantoon. Napakorkeus  $Z(m)$  tarkoittaa korkeutta maan pinnasta roottorin keskipisteeseen. [23]

Energia, joka tuulivoimalalla saadaan tuotettua, riippuu olennaisesti vallitsevasta tuulen nopeudesta ja nopeuden jakaumasta roottorin pyörintä alueella. Tuulivoimalan sijoittelua suunniteltaessa on totta kai pyrittävä löytämään mahdollisimman tuulinen paikka. Tuulen nopeus kasvaa keskimäärin ylöspäin mentäessä, kun on kyse tuulivoimaloiden kannalta merkittävistä korkeuksista. Tuulivoimalan tornin korkeutta lisäämällä päästään siis suurempiin tuulen nopeuksiin. Kun arvioidaan tuulivoimaloiden tuottoa, tuulen nopeutena käytetään yleensä napakorkeudella vallitsevaa tuulen



nopeutta. Roottorin pyörintä alueella tapahtuvan tuulen nopeuden vertikaalisen muutoksen oletetaan noudattavan logaritmista tuuliprofiilia, mikä ei käytännössä kaikissa tilanteissa kuitenkaan pidä paikkaansa. [2]



Kuva 18. Tuulivoimaloiden vuosituotto tuulen vuotuisen keskinopeuden funktiona. [2]

Kuvassa 21 on esitetty tyypillisten kolmilapaisten tuulivoimaloiden vuotuista energiantuottoa tuulivoimalan napakorkeudella vallitsevan vuotuisen tuulen keskinopeuden funktiona. Kun lasketaan tuulen nopeuden jakaumaa, sen oletetaan noudattavan Reyleigh-jakaumaa. Kuvasta 18 voidaan nähdä, että tällä tuulennopeusalueella suuret tuulivoimalat nelinkertaistavat tuotantonsa tuulen keskinopeuden kasvaessa kaksinkertaiseksi. Tyypillinen toiminta-alue suurilla tuulivoimaloilla on tuulen nopeuksilla 5 - 25 m/s, jota kovemmissa tai heikommilla tuulilla ne eivät tuota sähköä. Tuulen keskinopeuden kasvaessa kasvaa myös todennäköisyys tuuliin, jotka ovat yli 25 m/s, jolloin vastaavasti tuulivoimalan seisonta-aika kasvaa. [2]

Vuonna 2007 Suomen tuulivoimakapasiteetti oli 107 MW eli 0,2 % koko maan sähkönkulutuksesta. Vuoden 2009 lopussa Suomessa oli yhteensä 118 sähköverkkoon kytkettyä yli 70 kW:n tehoista tuulivoimalaa, joiden yhteinen tuotto oli 147 MW. Taulukosta 2 nähdään Suomessa vuoden 2009 lopulla käytössä olleet tuulivoimalat. Tuulivoimaloiden keski-ikä Suomessa oli vuoden 2009 lopussa 8,9 vuotta. Tuulivoimakapasiteetin kasvaessa maailmalla on alettu korvata vanhoja pieniä laitoksia uudemmilla ja suuremmilla laitoksilla. Tähän on syynä se, että hyvätuulisista paikoista halutaan saada maksimaalinen hyöty. Suomessa otettiin käyttöön vuoden 2009 aikana kolme uutta laitosta, joiden yhteensä tuottama teho oli 4,6 MW, ja käytöstä poistettiin kapasiteettia 0,2 MW:n verran. Tuotantokapasiteetti siis kasvoi 4,4 MW:lla. Suurinta kapasiteetin kasvu on ollut vuonna 2008, jolloin kasvu oli 33 MW:a, ja suhteellisesti vuon-

na 1999, jolloin kapasiteetti kasvoi yli sata prosenttia. Yhteen laskettu tuotanto Suomen tuulivoimaloilla oli vuonna 2009 277 GWh. Tuotanto kasvoi 16 GWh:lla verrattuna vuoteen 2008. Vuonna 2009 suurimmat tuulivoimantuottajat Suomessa olivat PVO Innopower, joka tuotti 37 % tuulisähköstä, Suomen Hyötytuuli, joka tuotti 18 %, Leo-vind, joka tuotti 14 %, sekä SaBa Wind, ViaWind ja VAPOn tuulivoima, jotka kukin tuottivat 4 %. Eniten, eli 28 prosenttia, tuulisähköstä vuonna 2009 tuotettiin Lapissa ja toiseksi eniten, eli 24 prosenttia, Pohjois-Pohjanmaalla. Suomen tuulivoiman lisäystavoite vuosille 1995 - 2010 oli 494 MW, mutta tuulivoiman tuottajien mukaan käyttöönottoa hidasti muita EU-maita tehottomampi tukijärjestelmä. Tuulivoimalla voitaisiin tuottaa vuoteen 2020 mennessä jopa 10 % koko Suomen sähköstä VTT:n mukaan. [23,24]

Taulukko 2. Suomessa vuoden 2009 lopussa käytössä olleet tuulivoimalatyypit. [23]

Valmistaja	Nimellisteho (kW)	Lukumäärä	Yhteensä kW
WinWind	3000	16	48000
Enercon	2300	6	13800
Bonus	2300	5	11500
Enercon	2000	5	10000
Harakosan	2000	3	6000
Bonus	2000	1	2000
Vestas	2000	1	2000
Nordex	1300	3	3900
WinWind	1000	13	13000
Bonus	1000	10	10000
Negmicon	750	7	5250
Vestas	660	2	1320
Bonus	600	6	3600
Enercon	600	4	2400
Vestas	600	4	2400
Nordtank	600	2	1200
Negmicon	600	1	600
Enercon	500	4	2000
Nordtank	500	4	2000
Vestas	500	1	500
Bonus	450	2	900
Nordtank	300	8	2400
Negmicon	250	1	250
Vestas	225	4	900
Winworld	220	1	220
Nordtank	200	3	600
Nordtank	75	1	75
Yhteensä		118	146815

Tuulivoimakapasiteetti Euroopassa vuoden 2009 lopussa oli noin 76 GW. Tästä kapasiteetista rakennettiin vuoden 2009 aikana noin 10163 MW. Asennuksista 9581

MW tehtiin maalle ja 582 merelle. Valtaosa, yli 7500 MW:a, vuonna 2009 Euroop-  
paan rakennetusta tuulivoimakapasiteetista rakennettiin Saksaan, Espanjaan, Itali-  
aan, Isoon-Britanniaan ja Ranskaan. Euroopassa asennetussa tuulivoimakapasitee-  
tissa Suomi on sijalla 19. European Wind Energy Association:in mukaan tuulisähkön  
osuus Euroopan tuotetusta sähköstä vuonna 2020 tulee olemaan 13 - 16 % eli tuli-  
voiman kapasiteetti tulisi olemaan noin 180 GW. Tämä kuitenkin edellyttäisi EWEA:n  
mukaan lainsäädännön muuttamista tuulivoimalle suotuisemmaksi. Bundesverband  
Wind Energie:n mukaan merituulivoiman käyttö tulee lisääntymään huomattavasti  
tulevina vuosina, koska tuulivoiman tuotto merellä on tehokkaampaa. EWEA:n en-  
nuste Euroopan merituulivoiman osuudeksi tuulivoimasta on 70 GW vuonna 2020.  
Pelkästään viisi prosenttia Pohjanmeren pinta-alasta pystyisi tuottamaan 25 % koko  
Euroopan sähköstä. Taulukosta 3 nähdään tuulivoimakapasiteetin kehitys vuodesta  
2002 vuoteen 2009. [23,24]

Taulukko 3. Euroopan tuulivoimakapasiteetti. Kohta "Muu Eurooppa" si-  
sältää Turkin (801 MW vuonna 2009). [23]

		Kapasiteetti vuoden lopussa (MW)							
	Valtio	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
1.	Saksa	11994	14609	16629	18415	20622	22247	23897	25777
2.	Espanja	4825	6203	8264	10028	11623	15131	16689	19149
3.	Italia	788	905	1266	1718	2123	2726	3736	4850
4.	Ranska	148	257	390	757	1567	2454	3404	4492
5.	Britannia	552	667	904	1332	1962	2406	2974	4051
6.	Portugali	195	296	522	1022	1716	2150	2862	3535
7.	Tanska	2889	3116	3118	3128	3136	3125	3163	3465
8.	Hollanti	693	910	1079	1219	1558	1747	2225	2229
9.	Ruotsi	345	399	442	509	571	788	1048	1560
10.	Irlanti	137	190	339	496	746	795	1027	1260
11.	Kreikka	297	383	473	573	746	871	985	1087
12.	Itävalta	140	415	606	819	965	982	995	995
13.	Puola	27	63	63	83	153	276	544	725
14.	Belgia	35	68	96	167	194	287	415	563
15.	Norja	97	101	160	267	325	326	429	431
16.	Unkari	3	3	3	17	61	65	127	201
17.	Tshekki	3	9	17	28	54	116	150	192
18.	Bulgaria	0	0	10	10	36	57	120	177
19.	Suomi	43	52	82	82	86	109	142	147
20.	Viro	2	2	6	32	32	59	78	142
21.	Liettua	0	0	6	6	48	51	54	91
22.	Luxemburg	17	22	35	35	35	35	35	35
23.	Latvia	24	27	27	27	27	27	27	28
24.	Sveitsi	5	5	9	12	12	12	14	18
	Muu Eurooppa	70	136	104	109	176	270	584	944
	<b>Eurooppa</b>	<b>23329</b>	<b>28838</b>	<b>34650</b>	<b>40891</b>	<b>48574</b>	<b>57112</b>	<b>65724</b>	<b>76144</b>

Koko maailman tuulivoimakapasiteetti vuoden 2009 lopulla oli noin 158 GW:a. Vuo-  
den 2009 tuulivoimala asennukset koko maailmassa olivat 37 466 MW. Tuulivoiman

osuus koko maailman sähköntuotannosta oli vuoden 2007 lopussa hieman yli prosentti. Samaan aikaan tuulivoiman osuus Euroopassa oli 3 % ja Tanskassa jopa 20 %. Tuulivoimatuotanto kasvaa vuodessa 20 % maailmassa. Tuulivoiman teoreettinen tuotantopotentiaali on maailman laajuisesti 15-kertainen energiankulutukseen nähden. Kansainvälisen energiajärjestön IEA:n ennusteen mukaan maailman tuulienergian kapasiteetti vuonna 2030 tulee olemaan 430 - 538 GW. Global Wind Energy Council GWEC:n mukaan tuulivoiman kasvu olisi vieläkin nopeampaa eli kapasiteetti olisi 280 - 391 GW vuonna 2015 ja 1129 - 2106 GW vuonna 2030. Tuulivoiman käyttöönotto on kuitenkin monessa maassa ollut ennusteita nopeampaa. Tuulivoiman kasvua voi kuitenkin rajoittaa tuulivoimaloiden valmistuskapasiteetin ja tukien puute. Merkittävin markkina-ajuri tuulivoimamarkkinoille on ollut syöttötariffi, joka on taannut kannattavan sähkönhinnan tuulivoimatuotannolle. [23,24]

#### 4.6 Tuulivoimamarkkinat

Tuulivoimaloita myyvistä yrityksistä kymmenellä oli noin 90 %:n osuus markkinoista vuonna 2007. BTM Consultin mukaan suurimmat tuulivoimalayhtiöt vuonna 2007 markkinoiden liikevaihdon mukaan olivat tanskalainen Vestas, yhdysvaltalainen GE Wind ja espanjalainen Gamesa. Kolmella suurimmalla aasialaisella yrityksellä oli 18 %:n osuus markkinoista. Näihin aasialaisiin yrityksiin kuuluivat kiinalaiset Goldwind ja Sinovel sekä intialainen Suzlon. Vuonna 2006 suurimmat tuulivoimaloita tekevät yritykset olivat Vestas, Gamesa, GE Wind, Enercon ja Suzlon. Saksalainen REpower siirtyi intialaisen Suzlonin omistukseen vuonna 2007. Maailman suurimpia tuuliturbiineita valmistavat yritykset ovat Enercon 6 MW:n voimaloilla, REpower 5 MW:n voimaloilla. Suurten, yli 3 MW:n, tuulivoimaloiden kehittyvillä maailmanmarkkinoilla suomalaisella Windwindillä on myös merkittävä markkina-asema. Windwind oli vuonna 2005 yli 2,5 MW:n tuulivoimaloiden valmistajista kolmanneksi suurin Vestaksen ja Enerconin jälkeen. [24]

Vuonna 2005 tuulivoiman osuus maailman uusiutuvan energian investoinneista oli 37 %, jolloin tuulivoimaan investoitiin 14 miljardia dollaria. Tuulivoimalla tuotetun sähkön hinta on laskenut tuotantomäärien kasvaessa ja tekniikan kehittyessä. 1980-luvulta tähän päivään hinta on laskenut noin 80 %. Britannialaisen raportin mukaan vuonna 2004 tuulivoiman investointikustannukset olivat halvemmat kuin vesivoiman, kaasuvoiman tai biomassan tuotettua MW:a kohti. Koska tuulivoiman rakentamisesta maalle on enemmän kokemusta, on se toistaiseksi halvempaa kuin merelle rakentaminen. Merelle rakentamisen hinnan odotetaan laskevan vuoteen 2020 mennessä 25 - 50 %,

jolloin siitä tulisi maatuulivoimaa halvempaa. Hintaa voivat nostaa kysynnän raju kasvu sekä raudan hinnan nousu. Britannialainen uusiutuvan energian tuottajien etujärjestö British Wind Energy Association BWEA on arvioinut tuulivoiman olevan samanhintaista kuin hiilivoima ja halvempaa kuin ydinvoima. Keskimäärin tuulivoiman hinta on laskenut noin 4 % vuodessa. Tuulivoimaloiden valmistaja Vestaksen mukaan tuulivoima on yksi halvimmista uusiutuvanenergianlähteistä tällä hetkellä. [24]

Tuulivoimalla tuotetun sähkön hinta riippuu tuulipuiston tuuliolosuhteista, toimintaajasta sekä sähköverkon kustannuksista. Tuulivoiman investointi- ja ylläpito hinta on tyypillisesti 3,5 - 8,5 snt/kWh. Suomessa omakustannushinta perustuu yleensä 4 - 6 prosentin reaalikorkoon ja 20 vuoden takaisinmaksu-aikaan, jolloin tuotantokustannukseksi tulee 3 - 5 snt/kWh. Sähkön hintahan kuitenkin muuttuu ajan myötä. Investointiekonominen arviointi kaupalliseen käyttöön perustuu usein noin kymmenen prosentin keskikorkoon sekä 10 -15 vuoden takaisinmaksu-aikaan. Itse tuulivoimalan osuus kustannuksista on noin 60 - 80 %. Tuulivoimaloiden hintaa nostaa merkittävästi kasvanut kysyntä, tuotannon riittämättömyys sekä teräksen hinnan nousu, ja tuulivoimaloiden toimitusaika on pitkä. Usein tuulivoimaa rakennetaan syrjäisille paikoille, joten verkkokustannukset ovat suuret. Tuulivoiman ulkoiset kustannukset, eli yhteiskunnalle ja ympäristölle aiheutetut ylimääräiset kustannukset, ovat Euroopan komission teettämän selvityksen mukaan eri energiamuodoista halvimmat, eli 0,1 - 0,2 snt/kWh. Tuulivoiman kustannukset ja työllistävyys ovat suurimmat rakennusvaiheessa. Tuulivoimalla ei varsinaisesti ole käytön aikana raaka-ainekustannuksia ja ylläpitokustannukset ovat pienet. Useita näkemyksiä on esitetty tuulivoimalan käyttöiästä, mutta vallitseva yleinen käsitys tuulivoima-alalla on vakiintunut 20 vuoteen. Käytännössä kaupalliset tuulivoimalat ovat saavuttaneet harvoin 20 vuoden käyttöiän, käyttöiän todellinen keskiarvo on noin 17 - 19 vuotta. Yleensä tuulivoimainvestointia tehtäessä ajatellaan, että tuulivoimalan tulisi maksaa itsensä takaisin kahdessatoista vuodessa. Tuulivoimaloiden vikaantuminen lisääntyy huomattavasti 10 - 12 käyttövuoden jälkeen. [2,24]

Tuulivoiman käyttöönottoa pyritään edistämään syöttötariffeilla, sertifikaateilla, sujuvilla lupaprosesseilla sekä sähköverkkoyhteyksillä. On myös perustettu vapaaehtoisia ympäristömerkkejä tukemaan tuulivoiman ja muunkin uusiutuvan energian käyttöönottoa. Yksi tällaisista ympäristömerkeistä on Suomen luonnonsuojeluliiton Ekoenergia-merkki. Tällaiset ympäristömerkit kuitenkin asettavat kriteerit tuulivoiman tuotantotavalle, jota ne edistävät. Valtion taholta yleensä tuetaan tuulivoimaa uusiutuvana energiana. Yleensä tuulivoiman edistämiseen sisältyy investointitukea kuten 20 - 30 vuoden takuuhinta tuotetusta sähköstä, valtion kustantamat verkkoyhteydet tai erinäi-

set verohelpotukset. Takuuhinta on lisännyt nopeasti tuulivoiman kasvua Saksassa. Myös erilaiset vihreät sertifikaatit ovat yleisiä. Ruotsissa tuulivoimainvestointeja on lisännyt vihreän sertifikaatin pidennys 20 vuodeksi. Suomessa sähköverkkoon liitettävälle tuulivoimalalle voi saada investointitukea Kauppa- ja teollisuusministeriöltä, joka on 20 - 35 prosenttia rakennuskustannuksista ja tuottajalle palautettava sähkövero. Vuonna 2006 tuulivoima työllisti 64000 saksalaista, 21000 tanskalaista ja 35000 espanjalaista. Keskiarvoltaan tuulivoiman työllistävyys on 12 henkeä/MW. Euroopan Unionin ennuste tuulivoiman työllistävyydelle vuodelle 2020 on 153400 henkilöä tuotannossa, 27400 henkilöä asennuksissa ja 16100 henkilöä ylläpidossa. [24]

Kun puhutaan hajautetusta energiajärjestelmästä, tarkoitetaan paikallista pienen kokoluokan sähkön-, lämmön-, tai kylmäntuotannon laitosta ja siihen liittyviä palveluita. Yhteiset tekijät hajautetulle tuotannolle ovat pieni kokoluokka sekä sijainti kulutuspiirteen yhteydessä. Tuulivoima soveltuu hyvin hajautettuun energiantuotantoon, koska pientuulivoimaloilla voidaan tuottaa sähköä itse kulutuspaikoilla kuten maataloilla, taloyhtiöissä, omakotitaloissa ja kesämökeillä. Koska Suomen laki kieltää yksityisen sähkön myynnin verkkoon, pienemmät, omakotitaloihin soveltuvat tuulivoimalat tarvitsevat myös akun ja taloautomaation, mikä kasvattaa hintaa. Pienimuotoisesti tuulivoimaa käytetään esimerkiksi merkkivaloissa, havaintoasemilla, viestiasemien radioiden akkujen lataamisessa sekä aurinkovoiman täydennyksenä. Yksittäisten pienten tuulivoimalaitosten kytkeminen valtakunnalliseen sähköverkkoon edellyttäisi teknisiä ratkaisuja, joilla estettäisiin tuulivoimaloiden epätasaisen tuotannon mahdollisesti verkkoon aiheuttamat häiriöt. [24]

#### 4.7 Tuulivoiman hyödyt ja haitat

Tuulivoimalavalmistaja Vestaksen mukaan tuulivoimalan valmistukseen käytetty energiamäärä saatiin takaisin 1990-luvulla kahdeksassa kuukaudessa ja 2000-luvun alussa kolmessa kuukaudessa. Tuulivoimalassa käytetyistä materiaaleista teräs on helposti kierrätettävää, mutta lasikuitu- ja komposiittiosien kierrätystä ei ole toistaiseksi vielä järjestetty. Myös konehuoneen komponenttien valut sekä generaattoreiden ja muuntajien kuparimateriaali voidaan kierrättää. Tuulivoima on uusiutuvaluonnon vara. Siitä ei synny hiilidioksidi- eikä muitakaan päästöjä, kuten rikkiä, typpeä tai pienhiukkasia. Vuonna 2005 tehdyn saksalaisen tutkimuksen mukaan tuotettujen hiilidioksidipäästöjen määrän vähentäminen tonnilla korvaamalla fossiilisia polttoaineita tuulivoimalla maksaa 41 -77 euroa. Noin yhden tonnin verran päästöjä syntyy, kun hiilellä tuotetaan sähköä yksi megawatti. Tuulivoimalla voidaan kuitenkin huonos-

ti korvata perinteistä energiantuotantoa. Vuonna 2004 Saksassa pystyttiin tuulivoimalla korvaamaan 8 % tuotantokapasiteetista. Kapasiteetin noustessa prosenttiosuus laskee. Vuoteen 2020 mennessä saatetaan 48 GW:n tuulivoimakapasiteetilla pystyä korvaamaan 2 GW:a hiili- tai ydinvoimaa. Kun arvioidaan tuulivoiman ympäristövaikutuksia, arviointiin sisältyy ääni-, eliöstö-, maankäyttö ja maisemavaikutukset. Tuulivoimalan roottorin pyöriminen voi aiheuttaa välkkymistä ja heijastuksia sekä voimalan varjo voi vaikuttaa kauas. [2,24]

Tuulivoimaloiden tuottama melu aiheutuu pääosin lapojen noin 60 - 4000 Hz:n taajuisesta aerodynaamisesta melusta. Myös voimaloiden koneiston yksittäisistä osista, kuten vaihteistosta, generaattorista ja jäähdytysjärjestelmästä, aiheutuu melua. Generaattorin koneiston ja vaihteiston vaimennus tehdään pitkälti koteloinnilla ja käyntivärähtelyn vaimentamisella erottamalla laitteen kiinnityspinta mastorungosta. Vaihteistoa voidaan lisäksi vaimentaa optimoimalla suunnitteluvaiheessa laitteiston hammasvälit vaihteistotaajuuden muuttamiseksi. Jäähdytysilman vaimennus tehdään joko perinteisillä ilmanavavaimentimilla tai jäähdytysmoottorilla. Tuulivoimateollisuuden etujärjestön American Wind Energy Association AWEA:n mukaan modernit tuulivoimalat ovat hiljaisia, joten tuulen ääni on usein voimalan ääntä voimakkaampaa. Lähtötasomelu tuulivoimaloissa on noin 100 - 110 desibeliä. Suomessa tehdyillä mittauksilla on todettu, että yksittäisen tuulivoiman tuottama melu on merkittävää vain tuulivoimalan välittömässä läheisyydessä. Tuulivoimalan tuottama melu on 45 dB:ä noin 100 - 200 metrin päässä voimalasta, ja 40 dB:n raja kulkee noin 200 - 300 metrin etäisyydellä. Merituulipuisto, johon kuuluu kymmeniä voimaloita, aiheuttaa taustamelusta merkittävästi erottuvaa ääntä ainoastaan alueen sisällä ja läheisyydessä. Merituulipuistojen tuottaman melun 45 dB:n raja on noin kilometrin päässä uloimmista voimaloista. [24]

Tuulivoimakriittinen yhdistys Wind Watch on kerännyt tietoja yli tuhannesta tuulivoimaloista koskevasta onnettomuudesta. Listattuja onnettomuuksia ovat muun muassa rakennusaikaiset onnettomuudet kuten sortumat, työtaturmat ja liikenneonnettomuudet, roottorin tai konehuoneen hajoamiset, tulipalot ja roottoreista pudonneen jään aiheuttaneet vauriot. Vakavimpia ovat olleet rakennusaikaiset onnettomuudet sekä työtaturmat. Roottorien tai konehuoneiden hajoaminen on aiheuttanut vakavia vaaratilanteita tai loukkaantumisia kymmenissä tapauksissa ja johtaneet kuolemaan kolmessakymmenessä tapauksessa lähtien vuodesta 1975. Putoava jää on aiheuttanut sivullisten loukkaantumisia. Joissain tapauksissa voimalassa syttynyt tulipalo on tuhonnut sen kokonaan. Tulipaloja on hankala sammuttaa tuulivoimaloiden korkeuden vuoksi ja ne ovat joissain tapauksissa aiheuttaneet maastopaloja. Yhdistyksen

mukaan useimmiten onnettomuuksien syynä ovat olleet puutteellinen tai huolimaton toiminta, rakennusvirheet tai salaman isku tuulivoimalaan. Tuulivoimalan koneiston vaurioituminen voi johtaa hydraulikka- ja voiteluöljyn leviämiseen luontoon. [24]

Yhdysvalloissa kuolee AWEA:n mukaan vuodessa 3 - 5 lintua vuodessa tuulivoimalaa kohti. Suomessa lintuja kuolee vastaavasti 1 - 1,5. Alueen linnusto vaikuttaa lintukuolemiin ja tähän on mahdollista vaikuttaa tuulivoiman sijoittelulla. Esimerkiksi Nystedin tuulipuistossa Tanskassa kuolee vuosittain 40 -50 haahkaa, kun taas Altamontin tuulipuistossa Kaliforniassa kuolee vuosittain 1870 - 4310 lintua, joista sadat ovat haukkoja, pöllöjä ja muita suuria petolintuja. Altamontin tuulipuisto sijaitsee kriittisellä muuttoreitillä. Suomessa Suomen luonnonsuojeluliiton Ekoenergia-merkki on asettanut tuulivoiman sijoittamiselle kriteerejä, joiden mukaan tuulivoimaa ei saa sijoittaa tärkeille maisema-, linnusto-, kulttuuriperintö- tai luonnonsuojelualueille. Järjestö laskee tällaisiksi alueiksi Luonnonsuojelulain mukaiset luonnonsuojelualueet, luonnonsuojeluhjelmiin kuuluvat kohteet, Natura 2000-alueet, erämaa-alueet, kaavojen suojeluvaramukset, Luonnonsuojelulain mukaiset maisema-alueet, Kansallismaisema-teoksessa mainitut maisema-alueet, UNESCO:n maailmanperintökohteet, valtakunnallisesti merkittävät kulttuurihistorialliset ympäristöt ja FINIBA-linnustoalueet. Lintujärjestö Birdlifen mukaan erityisesti vesi- ja kosteikkolinnut karttavat tuulivoimaloita ruokailu- tai yöpymispaikan valinnassa. Birdlife pitää tärkeänä, että tuulivoimaloita sijoittaessa otetaan huomioon tekijät kuten suurien pesimäyhdyskuntien tai tärkeiden ruokailu- tai levähdyspaikkojen läheisyys, alueen sijainti lintujen muuttoreittiin nähden, vuodenaikaisvaihtelu lintujen esiintymisessä sekä meri- tai maakotkien yleisyys alueella. [24]

Tuulivoima on uusiutuva, päästötön, vakaahintainen ja polttoainetta tarvitsematon energiantuottomuoto. Tuulienergiaa esiintyy kaikkialla maailmassa ja se on jakautunut tasaisesti eri alueiden ja maiden kesken. Hyödynnettävissä olevan tuulienergiapotentialin on arvioitu olevan yli nelikymmenkertainen koko maailman sähkönkulutukseen verrattuna. Teknisesti hyödynnettävä tuulivoiman vuosituotanto on noin 53000 TWh, joka on lähes nelinkertainen verrattuna maailman energiankulutukseen vuonna 2002. Tuulivoima pystyy edistämään työllisyyttä ja vientiä, sillä nopeasti kasvava maailmanlaajuinen tuulivoima-ala tarjoaa voimaloita valmistavalle teollisuudelle valtavat markkinat. Suomen tuulivoimaloiden viennin määrää olisi mahdollista kasvattaa huomattavasti. Viennin kehitystä edesauttaisivat toimivat kotimarkkinat. Tuulivoima parantaa myös Suomen huoltovarmuutta, sillä huoltovarmuuteen vaikuttaa se kuinka paljon energialähteistä on tuonnin varassa ja kuinka paljon energiaa pystytään



tuottamaan kotimaassa. Tuulivoimatuotannon vaihtelevuus ei aiheuta ongelmia niin kauan kun tuulivoimalla tuotetaan vain osa sähkönkulutuksesta. [2]

## 5 TUULITUNNELI

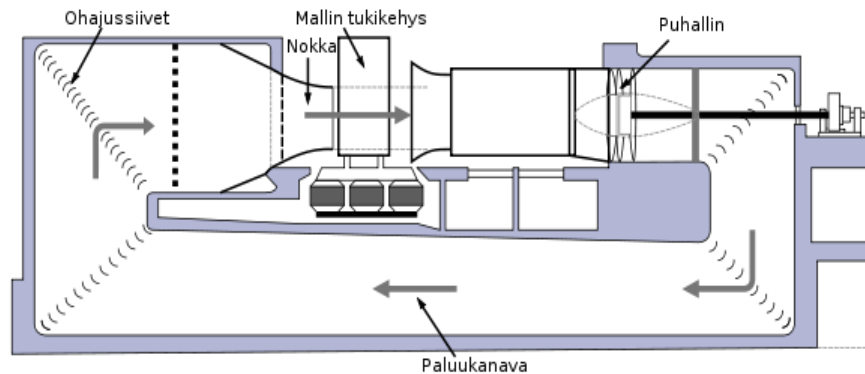
### 5.1 Tuulitunnelin rakenne

Tuulitunneli on laite, jonka avulla tutkitaan esineiden ympärille muodostuvaa virtauskenttää, painetta, vastusta ja esineeseen vaikuttavia voimia. Tuulitunneli toimii siten, että tarkasteltava esine kiinnitetään mittatilaan, jonka läpi puhalletaan tai imetään ilmaa käyttäen puhaltimia. Esine on yleensä pienoismalli lentokoneesta tai autosta. Yhdysvalloissa ja Venäjällä on ollut niin suuria tuulitunneleita, että niissä voitiin testata toisen maailman sodan loppuun asti kokonaisia lentokoneita. Nykyään vain hävittäjän kokoisia lentokoneita voidaan testata kokonaisina tuulitunneleissa. [25,26]

Isoissa tuulitunneleissa yksittäisen puhaltimen käyttö ei ole käytännöllistä, joten niissä käytetään rinnakkain useaa puhallinta tuottamaan tarpeeksi suuri ilmavirta. Puhaltimien tuottama ilmavirta, joka menee tuulitunneliin, on sellaisenaan hyvin turbulენტtista johtuen puhaltimen lapojen pyörimisliikkeestä ja ei siten ole suoraan käyttökelpoista tarkkoihin mittauksiin. Tunnelin läpi virtaavan ilman täytyy olla suhteellisen laminaarista. Tämän toteuttamiseksi tunneliin täytyy asentaa ohjausristikoita tasamaan turbulენტtisuus pois ennen testiosiota. Viskositeetin vaikutuksista johtuen nelimäisessä tuulitunnelissa tuuli pakkautuu sen kulmiin, joka voi tehdä virtauksesta turbulენტtisen. Siksi tyypillisesti käytetään ympyrän muotoista tunnelia sen tasaisemman virtauksen vuoksi. Tunnelin sisäpinta on yleensä mahdollisimman tasainen, jotta pinnan vastustus ja turbulენტtisuus olisivat vähäisempiä. Jopa tasaiset tunnelin seinät aiheuttavat jonkin verran ilmavirran hidastumista, joten testattava esine asetetaan yleensä putken keskiosaan. Tuulitunnelin valaistus on yleensä upotettu tunnelin seinämiin ikkunan taakse, jotta niistä ei aiheudu estettä ilman kululle. Tuulitunnelin havainnointi-ikkunat ovat muotoiltu tunnelin profiilin mukaisesti. [25,26]

Alisooninen tuulitunneli tarkoittaa yleensä tunnelia, jossa Machin luku on alhainen eli yleensä alle 0,3 Mach, jolloin virtausnopeus on yleensä alle 400 km/h. Machin luku tai mach on dimensioton luku, joka kuvastaa virtauksen nopeutta suhteessa äänen nopeuteen väliaineessa. Alisooninen tuulitunneli voi olla avoin, jonne otetaan korvausilmaa ja päästetään ilmaa ulos mittatilan jälkeen. Tunneli voi olla toteutettu myös suljetulla kierrolla kuten kuvassa 19. Ilmavirta toteutetaan yleensä sähkömoottorilla pyörittävän potkurin avulla. Suuren nopeuden alisoonisessa tuulitunnelissa on Machin luku 0,4-0,75 ja transsoonisessa tuulitunnelissa 0,75-1,2. Molemmissa tapauksissa ilman kokoonpuristuvuus vaikeuttaa tunnelin toteuttamista ja riittävän virtausnopeuden ai-

kaan saamiseksi tarvitaan suurempia puhaltimia. Koekappaleen kokemat kuormat yleensä kasvavat, joten monesti pyritään käyttämään pienempiä pienoismalleja, jos se on mahdollista, oikean Reynoldsin luvun aikaan saamiseksi. Tuulitunnelin seinistä heijastuvat tiivistysaalot aiheuttavat myös ongelmia. Mittatilan seiniin onkin yleensä tehty rajoja, jotka rikkomalla tiivistysaaltoja estävät niitä heijastumasta takaisin malliin. Suuret transsooniset tuulitunnelit saavat ilman kiihdytettyä päästämällä korkeapaineista ilmaa tai muuta kaasua säiliöstä tunneliin. [25,27]



Kuva 19. Pienen nopeuden tuulitunneli toteutettu suljetulla kierrolla. [25]

Ylisooneisen tuulitunnelin virtausnopeus on 1,5-5 Machia. Nämä tuulitunnelit ovat yleensä mittatilan kooltaan paljon pienempiä kuin alisooneisen alueen tuulitunnelit. Tunnelien toteuttaminen on kuitenkin vaikeaa, koska tarvitaan painesäiliö, josta korkeapaineinen ilma tulee tunneliin. Koekappaleeseen kohdistuvat voimat ovat suuria ja vähäinkin ilman kosteus muuttuu nesteeksi virtaavassa, laajenevassa ilmassa, joten ilma on kuivattava tai lämmitettävä. Tuulitunnelissa tehtävät kokeet on suunniteltava nopeasti, yleensä kymmenessä sekunnissa toteutettavaksi, koska tunneli ei ole jatkuvatoiminen. Nämä tuulitunnelit ovat avoimia ja puhaltavat paineilman ulos mittatilan jälkeen. Hypersoonisten tuulitunnelien virtausnopeus on 5-50 Machia. Nekin toimivat paineilma kuten ylisooneiset tuulitunnelitkin ja niitäkin täytyy lämmitellä ilman nesteytymisen estämiseksi. [25]

## 5.2 Putkivirtaus

Bernoulin laki havainnoi nesteen tai kaasun nopeuden ja paineen suhdetta putkivirtauksessa. Bernoulin lain mukaan paine alenee nopeuden kasvaessa. Virtauksen kokonaisenergia on vakio suljetussa putkessa. Energia esitetään staattisesta paineesta johtuvana potentiaalienergiana ja dynaamisesta paineesta johtuvana kineettisenä energiana. Kineettisen energian kasvaessa staattinen paine laskee ja päinvastoin,

koska kokonaisenergia on vakio. Staattisen ja dynaamisen paineen summa on vakio virtauksessa. Bernoulin laki ilmaistaan yhtälöllä

$$p + \rho gy + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{vakio}, \quad (10)$$

jossa  $p$  on virtaavan aineen paine,  $\rho$  aineen tiheys,  $g$  painovoiman aiheuttama kiihtyvyys,  $y$  putken korkeus tarkasteltavassa pisteessä ja  $v$  virtaavan aineen nopeus. [28]

Putkivirtauksessa syntyy aina häviöitä, jotka muuttuvat lämmöksi. Nämä häviöt voidaan havaita paineen alenemisena virtaussuunnassa ja samalla nesteen lämpiämisenä. Luonteeltaan putkivirtaus voi olla laminaarista tai turbulanttista. Virtauksen ollessa laminaarista aine virtaa virtaviivojen suuntaisesti. Virtauksen ollessa turbulanttista aineen osat liikkuvat epämääräisesti, kuitenkin keskimääräisellä nopeudella virtaussuuntaan. Kun kyseessä on laminaarinen virtaus, putken karheudella ei ole vaikutusta syntyviin painehäviöihin. Virtauksen maksiminopeus on noin kaksi kertaa virtauksen keskimääräinen nopeus. Turbulenttisessa putkivirtauksessa painehäviöt riippuvat myös putken karheudesta. Virtausjakauma on selvästi laajempi kuin laminaarisessa virtauksessa. Virtauksen maksiminopeus on noin 1,2 kertaa keskimääräinen nopeus. Jos putkikoko oletetaan vakioksi, virtauksen muuttuminen laminaarisesta turbulanttiseksi tapahtuu virtausnopeuden kasvaessa. Tämä muutos tapahtuu nopeasti. Välissä on kuitenkin käytännössä muutosalue, jossa laminaarinen virtaus saattaa muuttua herkästi turbulanttiseksi jonkin häiriötekijän vaikutuksesta, vaikkei virtausnopeus kasvaisikaan. Virtauslaji vaikuttaa virtausvastuksiin putkistossa. Eri lajit pystytään erottamaan toisistaan Reynoldsin luvun avulla, joka ilmaisee virtausosaan vaikuttavien hitausvoimien ja viskositeettivoimien suhteen. Reynoldsin luvulla ei ole laatua ja se lasketaan yhtälöstä

$$R_e = \frac{v_s L \rho}{\mu} = \frac{v_s L}{\nu}, \quad (11)$$

jossa  $v_s$  on virtauksen nopeus,  $L$  on virtausta luonnehtiva pituus,  $\rho$  on virtauksen väliaineen tiheys,  $\mu$  on virtauksen väliaineen viskositeetti eli sisäinen kitka ja  $\nu$  on väliaineen kinemaattinen viskositeetti, joka tulee kaavasta

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (12)$$

Kun  $R_e$  on pienempi kuin  $R_{ekr}$ , on virtaus laminaarista ja vastaavasti turbulenttista, kun  $R_e$  on suurempi kuin  $R_{ekr}$ . Jos kahdella virtauksella on sama Reynoldsin luku, ne ovat yhdenmuotoisia.  $R_{ekr}$  on kriittinen Reynoldsin luku, joka on suuruudeltaan 2320, usein kuitenkin käytetään arvoa 2300. [29,30]

Putkivirtauksessa syntyy sekä kitkahäviöitä että kertahäviöitä. Kitkahäviöt aiheutuvat väliaineen kitkasta ja kertahäviöt johtuvat putkessa olevista mutkista ja venttiileistä, putken virtauksen poikkipinnan muutoksista, virtauksesta säiliöön ja sieltä putkistoon sekä virtauksen haarautumisesta ja yhtymisestä. Kitkahäviöt voidaan laskea kaavasta

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} * \frac{\rho v^2}{2}, \quad (13)$$

jossa  $\lambda$  on kitkavastuskerroin,  $l$  putken pituus,  $d$  putken halkaisija,  $v$  virtausnopeus ja  $\rho$  ilman tiheys. Virtauslaji ja putken karheus vaikuttavat kitkavastuskertoimen arvoon. Kun virtaus on laminaarista,  $\lambda$  on  $64 / R_e$ . Kitkavastuskertoimen määrittäminen on hankalampaa turbulenttisessa virtauksessa, koska se riippuu Reynoldsin luvusta ja putken karheudesta. Sileää putkea tarkasteltaessa ehdolla  $R_e - (k / d) < 65$ , jossa  $k$  on putken absoluuttinen karheus ja  $d$  on putken sisähalkaisija, on Blassiuksen yhtälö, kun  $2300 < R_e < 10^5$ ,

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{R_e}}, \quad (14)$$

Nikuradsen yhtälö, kun  $10^5 < R_e < 5 \cdot 10^6$ ,

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 * R_e^{-0,237}, \quad (15)$$

Prandtin ja Kàrmànin yhtälö, kun  $R_e > 10^6$ ,

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg(R_e * \sqrt{\lambda}) - 0,8. \quad (16)$$

Hydraulisesti karheissa putkissa, ehdolla  $R_e - (k / d) < 1300$ , on

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \left( \frac{d}{k} \right) + 1,14 \quad (17)$$

ja Moodyn yhtälöllä

$$\lambda = 0,0055 + 0,15 * \sqrt[3]{\frac{k}{d}}. \quad (18)$$

Lisäksi niin sanottu ylimenoalue voidaan erottaa ehdolla  $65 < R_e < 1300$ , jolloin kitkavastus kerroin tulee Prandl-Colebrookin yhtälöstä

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{2,51}{R_e * \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{d} * 2,69 \right). \quad (19)$$

Kitkavastuskertoimen arvo voidaan saada myös Moodyn käyrästä Reynoldsin luvun ja  $k/d$  suhteen perusteella. [29]

Kertavastus aiheutuu putken osista, joissa tapahtuu poikkipinnan, suunnan ja virtausnopeuden muutoksia. Tällaisia osia ovat esimerkiksi mutkat, erilaiset venttiilit ja kuristuselimet. Kertavastuksista johtuvia painehäviöitä on hankala laskea teoreettisesti ja usein joudutaan turvautumaan kokeisiin. Teoreettisesti kertavastus voidaan laskea yhtälöstä

$$\Delta p = \frac{1}{2} \zeta \rho v^2, \quad (20)$$

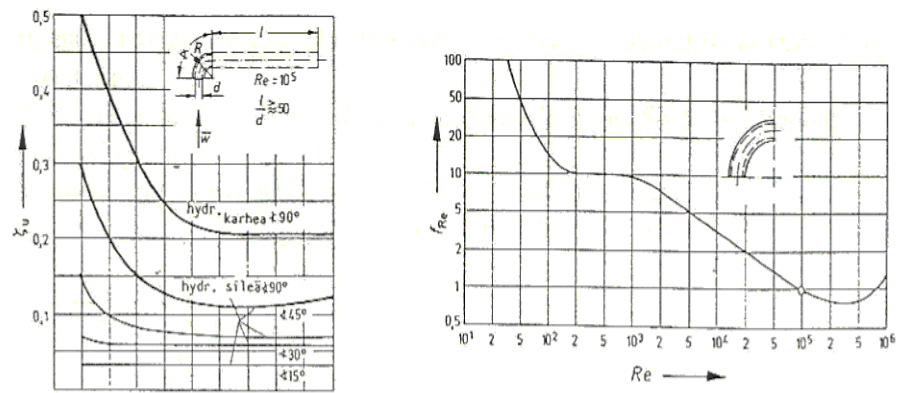
jossa  $\zeta$  on kertavastuskerroin,  $\rho$  ilman tiheys ja  $v$  virtauksen nopeus. Kertavastus kertoimen arvo riippuu sen aiheuttaman osan rakenteesta ja myös usein Reynoldsin luvusta. Usein näissä rakenneosissa virtaus on turbulenttista ja kirjallisuuden yhtälöt ja arvot ovat siten voimassa vain turbulenttisella virtauksella. Yksi tapa laskea häviöitä putken mutkissa on ottaa kertavastuskerroin kuvaajasta taivutuskulman perusteella kuten kuvassa 20. Myös purkauskertoimen  $\mu$  avulla voidaan laskea kertavastusten suuruuksia kaavasta

$$Q = \mu A * \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\rho}}, \quad (21)$$

jossa  $Q$  on tilavuusvirta,  $\mu$  purkauserroin,  $A$  pinta-ala,  $\Delta p$  paine-ero ja  $\rho$  ilman tiheys. Kertavastuskertoimen ja purkauskertoimen välillä on yhteys kuten esitetään kaavassa

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\zeta}}. \quad (22)$$

Virtauksen ollessa turbulenttista voidaan käyttää purkukertoimen likiarvona 0,6. Tilavuusvirta  $Q$  esimerkiksi kuristimen yli määritellään purkukertoimen avulla, kun paine-ero ja kuristimen virtauspoikkipinta-ala tunnetaan. [29]



Kuva 20. Kertavastuskertoimen arvon kuvaaja. Vasemmasta kuvaajasta saadaan  $\zeta_U$ :n arvo taivutuskulman suuruuden perusteella ja oikeanpuoleisesta käyrästä kerroin  $f_{Re}$  Reynoldsin luvun ja käyristymissuhteen  $R/d$  funktiona. [29]

Matemaattisesti tarkasteltuna virtausvastukset ja sähkötekniikan vastukset käyttäytyvät samalla tavalla. Vastukset voivat olla kytkettynä sarjaan tai rinnan. Kun virtausvastukset on kytketty sarjaan, saadaan kokonaispainehäviö osapainehäviöiden summasta kuten esitetään yhtälössä

$$\Delta p_{kok} = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3. \quad (23)$$

Osapainehäviöt voivat muodostua itse putkiston kitkahäviöstä tai putkiston osien kerta-häviöistä

$$\Delta p_{kok} = \sum \Delta p_{kitka} + \sum \Delta p_{kerta}. \quad (24)$$

Kun on kyse rinnankytkennästä, jakaantuu virtaus siten, että kuhunkin haaraan muodostuu yhtä suuri painehäviö, jolloin kokonaispainehäviö saadaan kaavasta

$$\Delta p_{kok} = \Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p_3 = p_1 - p_2. \quad (25)$$

Kun halutaan laskea useamman rinnan kytketyn vastuksen kokonaispainehäviö, määritellään virtausvastus yhtälöstä

$$R_1 = \frac{\Delta p_1}{Q_1}, \quad (26)$$

jossa painehäviö  $\Delta p_1$  on painehäviö kuristuskohtassa ja  $Q_1$  kuristuksen läpi virtaava tilavuusvirta. Näin ollen saadaan kokonaisvastus laskettua kaavasta

$$\frac{1}{R_{kok}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (27)$$

[29]

Venturi-ilmiössä fluidin eli virtaavan aineen nopeus suurenee ja paine pienenee, kun se kulkee putkessa olevan kavennuksen läpi. Aineen tilavuusvirtausnopeuden on pysyttävä vakiona, joten putken kaventuessa on virtausnopeuden kasvettava, johtuen jatkuvuusyhtälön toteutumisesta, ja fluidin aiheuttaman paineen pienennyttävä. Kun tarkastellaan tilannetta, jossa putkella ei ole korkeuseroja, Bernoullin yhtälöstä jätetään pois termit  $\rho$ ,  $g$  ja  $y$ , jolloin voidaan laskea putken kuristusta edeltävän ja kuristuskohdan läpi kulkevan aineen paineiden erot mukautetulla Bernoullin yhtälöllä

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2), \quad (28)$$

jossa  $p$  on paine,  $v$  virtausnopeus ja  $\rho$  väliaineen tiheys. [31]

Tilavuusvirtaus kuristuksessa on sama laajemmassa osassa ja kapeammassa osassa jatkuvuusyhtälön mukaisesti, joten

$$\frac{1}{4} \pi v_1 D^2 = \frac{1}{4} \pi v_2 d^2. \quad (29)$$

Kun käytetään merkintää  $d / D = \beta$ , saadaan



$$v_2 = \frac{D^2}{d^2} v_1 = \frac{1}{\beta^2} v_1. \quad (30)$$

$v_2$  on virtauksen nopeus kuristuksen jälkeen,  $v_1$  on virtauksen nopeus ennen kuristusta,  $D$  on putken halkaisija ennen kuristusta ja  $d$  on putken halkaisija kuristuksen jälkeen. [32]

Tilavuusvirtausnopeus ilmoittaa putken tietyn kohdan poikkileikkauksen läpi virtaavan aineen tilavuuden määrän aikayksikköä kohden. Tilavuusvirtaus  $Q$  on kokoonpuristumattomalle virtaavalle aineelle putken paksuudesta riippumatta vakio

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2, \quad (31)$$

missä alaindeksi 1 kuvaa tilannetta ennen kuristusta ja alaindeksi 2 tilannetta kuristuksen kohdalla. Yhdistämällä tämä yhtälö Bernoullin kaavasta muokattuun paineeroyhtälöön voidaan laskea putkessa virtaavan aineen tilavuusvirtausnopeus kaavalla

$$Q = A_1 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left( \frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right)}} = A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left( \frac{A_2^2}{A_1^2} - 1 \right)}}. \quad (32)$$

[31]

## 6 AUTOMAATIOJÄRJESTELMÄ

### 6.1 Prosessiautomaatio

Prosessiautomaatio on osa teollisuusautomaatiota, jolla tarkoitetaan teollisuuslaitoksissa sovellettua automaatiota. Teollisuusautomaatio tarkoittaa siis tuotantolaitosten automatisointiin käytettyä tekniikkaa, joka koostuu mittalaitteista, toimilaitteista ja tietokonepohjaisista automaatiojärjestelmistä. Automaatioon kuuluu myös erilaiset ohjelmistot sekä niihin sisällytetyt menetelmät kuten loogiset operaatiot ja päättely, säätötekniikka, suodatus, visualisointi ja vikadiagnostiikka. [32]

Teollisuusautomaatio jaetaan kappaletavara-automaatioon sekä prosessiautomaatioon. Kappaletavara-automaatiossa on kysymyksessä tekniikka, jolla käsitellään selvästi erotettavia kappaleita. Prosessiautomaatio tarkoittaa tekniikkaa, jolla käsitellään virtaavia aineita kuten nesteitä, kaasuja, lietteitä ja jauheita. Prosessiautomaatio voidaan jakaa edelleen ohjattavien prosessien luonteen mukaan panosprosessien ja jatkuvien prosessien automaatioon. Menetelmien osalta panosprosessien automaatio on samanlaista kuin kappaletavara-automaatio, koska molemmissa pääasiana on looginen vertailu ja päättely sekä säätötekniikan osuus on vähäisempää kuin jatkuvien prosessien automaatioissa. Menetelmäteknikan kannalta jatkuvien prosessien automaatio on yleensä takaisin kytkettyä säätöä, jossa kohdeprosessi pidetään halutussa tilassa häiriöistä huolimatta. Haluttu tila taas määrätään optimoivien menetelmien avulla, jolloin optimointi tarkoittaa parhaan mahdollisen tavoitetilan määrittelyä kullakin ajanhetkellä. Tämä tapahtuu hyväksikäyttäen erilaisia teknis-taloudellisia kriteerejä. [32]

Kun puhutaan prosessiautomaatiosta, yleensä tarkoitetaan prosessiteollisuuden käyttöön tehdystä automaatiosta. Prosessiteollisuuteen kuuluu kemian ja petrokemian teollisuus sekä suuri osa metsä-, vuori-, metalli-, lääke- ja elintarviketeollisuudesta. Yleisesti ottaen tuotantotoiminnan virtaavia aineita käsittelevä osa on prosessiteollisuutta. Raja prosessiautomaation ja kappaletavara-automaation välillä ei ole aina kuitenkaan kovin tarkka, sillä jotkut teollisuuslaitokset sisältävät piirteitä kummastakin. Virtaavien aineiden käsittelyssä on paljon yhteisiä piirteitä, jotka eivät riipu teollisuuden alasta, joten niiden automaatiota ja muuta tekniikkaa voidaan käsitellä samalla tavalla. Useimmiten niissä käsitellään samoja suureita, kuten virtausnopeus, paine, lämpötila, pinnankorkeus tai jonkin aineen pitoisuus. Niissä pyritään myös hallitsemaan jotain fysikaalista tai bioteknistä ilmiötä tai kemiallista reaktiota. Hallittava ilmiö

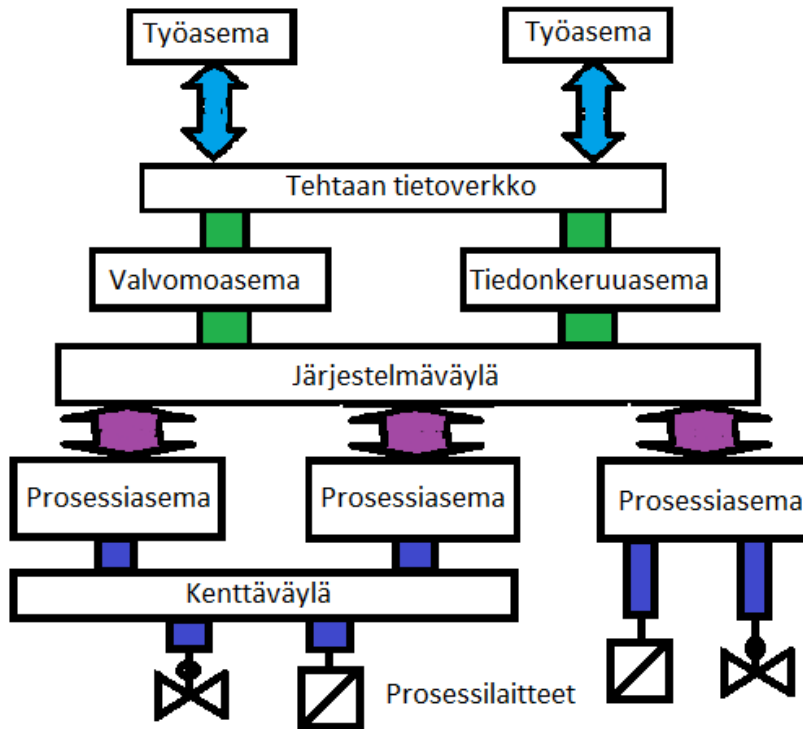
tai reaktio voi olla luonnostaan vakaa tai epävakaa eli stabiili tai epästabiili. Stabiilissa tapauksessa prosessiautomaatio pyrkii lähinnä esittämään mittaustiedon ihmiselle sopivassa muodossa ja ohjaamaan prosessin tavoitetilan muutosta. Epästabiilissa tapauksessa automaatiolla lisäksi vakautetaan prosessi niin, että se pysyy halutussa tilassa sekä siirtyy hallitusti tilasta toiseen. Näissä tapauksissa tarvitaankin takaisin-kytkettyjä säätöpiirejä. [32]

Kokonaisprosessien eli prosessiteollisuuden erilaisten tuotantolinjojen voidaan katsoa koostuvan teollisuuden alasta riippumattomista yksikköoperaatioista kuten pumppaus-, suodatus-, jauhatus-, kuivatus-, tislauks- yms. Yksikköoperaation toteutus tehdään prosessilaitteella tai -koneella, joka voi olla esimerkiksi pumppu, suodatin, mylly, kuivatin tai tislaukskolonni. Kun katsotaan prosessiautomaatiota automaation näkökulmasta, se koostuu perusautomaation tasolla yksikköoperaatioiden hallinnasta ja tehdasautomaation tasolla koko tuotannon hallinnasta. Nykyään prosessiautomaation tehtäväkenttä on laajentunut myös prosessilaitteiden kunnon valvontaan ja tuotteiden laadunvalvontaan sekä raaka-aineiden hankintaketjuun ja tuotteiden toimitusketjuun. [32]

Kun toteutetaan prosessiautomaatiota, käytetään tietotekniikkaa. Nykyaikainen prosessiautomaatiojärjestelmä koostuukin useista erikoistuneista tietokoneista, jotka voivat "kommunikoida" keskenään eritasoisten tietoverkkojen välityksellä. Kun tehtävät jaetaan useammalle erikoistuneelle tietokoneelle, on kyse hajauttamisesta. Prosessiautomaatiojärjestelmä saa prosessin mittaustietoa jatkuvasti siihen kytkettyjen mittalaitteiden kautta sekä pystyy ohjaamaan prosessia toimilaitteidensa avulla. Mittalaitteet koostuvat "tuntoelimestä" eli anturista sekä mittalähettimestä, joka muuttaa anturin antaman mittaviestin paremmin siirrettävään ja käsiteltävään muotoon. Toimilaitteita taasen käytetään vaikuttamaan prosessiin halutulla tavalla. Ne muodostuvat toimimoottorista ja toimielimestä. Mitta- ja toimilaitteisiin kuuluu nykyisin yleensä oma erikoistunut mikroprosessori, joka pystyy käsittelemään itsenäisesti erilaisia tietoja ja kykenee myös kommunikoimaan muiden laitteiden kanssa. Tämän vuoksi näitä toimilaitteita on kutsuttu älykkäiksi kenttälaitteiksi. Nämä laitteet kommunikoivat sekä keskenään että muiden automaatiolaitteiden ja ihmisen kanssa käyttäen alemman tason tietoverkkoa eli kenttäväylää. [32,33]

Prosessiautomaatiojärjestelmään kuuluu myös niin sanottuja ylemmän tason tietokone-laitteita eli ala-asemia. Näillä voidaan suorittaa vaativampaa laskentaa ja tietojen käsittelyä. Ala-asemassa tieto voidaan jalostaa paremmin prosessia valvovan ihmisen käyttöön. Ala-asemien tietojen vaihto tapahtuu niin sanotun järjestelmäväylän

avulla, joka on käytännössä samanlainen lähiverkko kuin toimistoissa käytetyt verkot. Valvomolaitteita ovat ne prosessiautomaatiojärjestelmän laitteet, jotka on rakennettu palvelemaan prosessia valvovaa ja ohjaavaa ihmistä. Erittäin suuri osa prosessiautomaatiojärjestelmästä onkin rakennettu ihmisen tarvitseman käyttöliittymän vuoksi. Käyttöliittymän kautta ihminen pystyy hallitsemaan laajoja tehdaskokonaisuuksia isoissa valvomoissa. Kuvassa 21 on esitetty prosessiautomaatiojärjestelmän yleisrakenne. [32,33]



Kuva 21. Prosessiautomaatiojärjestelmä.

## 6.2 Kuumalanka- ja kuumakalvoanturit

Anturi on mittalaitteen osa, joka reagoi ympäristönsä kanssa. Tätä reagointia käytetään avuksi fysikaalisten suureiden mittaamisessa tai kemiallisten yhdisteiden tunnistamisessa. Automaatiossa mittalaitteista käytetään nimitystä anturi erotukseksi käsi-käyttöisistä mittareista. Anturissa itsessään ei ole yleensä näyttöä, vaan mittalähetin välittää mittatiedon eteenpäin näytölle tai automaatiojärjestelmälle. Erilaisilla antureilla on omia nimityksiään. Antureita voidaan kutsua nimillä mittakärki, rajakytkin, tunnistinosa, filamentti jne. Anturimittaus voi tapahtua joko suoraan tai epäsuorasti. Yleensä anturista tuleva signaali muunnetaan digitaaliseen muotoon joko anturin ohjauksyksikössä tai erillisen A/D-muuntimen avulla. Älykkäät anturit voidaan liittää suoraan kenttäväylään. [35]

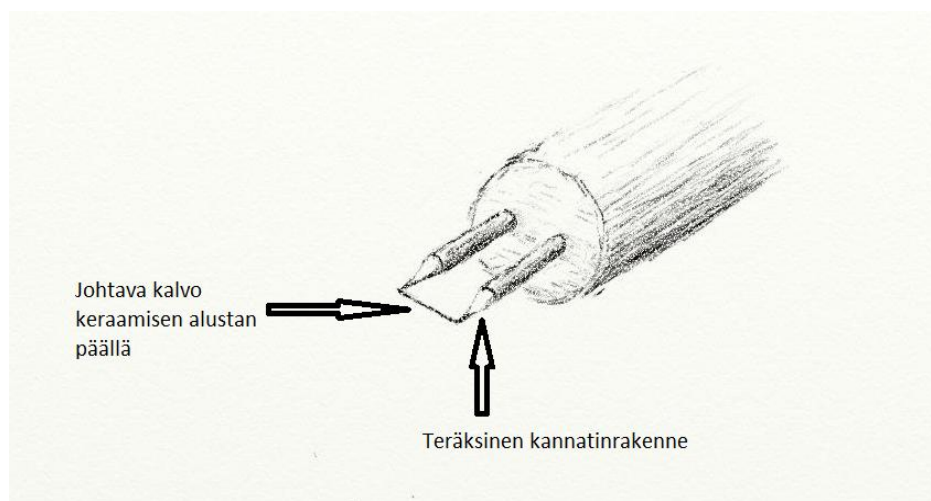
Kuumalanka-anemometrissä eli kuumalanka-anturissa on muutaman mikrometrin paksuinen kuumalanka, joka lämmitetään sähköisesti tiettyyn ympäristöä lämpimämpään lämpötilaan. Elementti viilenee, kun sen ohi virtaa ilmaa ja, koska useimpien metallien resistanssi on riippuvainen lämpötilasta, ilmavirran nopeuden ja elementin resistanssin suhde voidaan määrittää. Yleensä kuumalanka-anemometrillä mitataan nopeuksia, mutta lämpölangan ollessa herkkä lämmön välitykselle sen ja sen ympäristön välillä, anemometrillä voidaan mitata myös lämpötilan ja koostumuksen vaihteluita. Kuumalankasysteemi voidaan toteuttaa monella eri tapaa. [4,36]

Kuumalankalaitteet jaetaan edelleen tasavirtaisiin, tasajännitteisiin ja tasalämpöisiin anemometreihin. Näiden laitteiden mittaama arvo on tulos virtapiiristä, jossa laite pyrkii pitämään tietyn muuttujan vakiona. Anemometrin kuumalangalle, joita käytetään turbulenssitasojen mittaamiseen tuulitunneleissa ja virtausmallien mittaamiseen mallikappaleiden lähellä ja lapojen vanavedessä radiaalikompressoreissa, on tyypillisiä 0,0038-0,005 mm:n halkaisija ja 1,0-2,0 mm:n pituus. Anemometreissä käytetään lämpökalvoa silloin, kun kuumalanka-anturi olisi liian herkkä hajoamaan kuten veden virtausmittauksissa. Myös niin sanottuja pulssinleveysmodulaatioon perustuvia anemometrejä on käytössä, joissa ilmavirran nopeus lasketaan mittaamalla toistuvan pulssin, joka asettaa langan määrättyyn resistanssiin, välinen aika. Virta katkaistaan kunnes tietty alaraja-arvo on saavutettu, jolloin pulssi aloitetaan uudestaan. [4,36]

Jotta kuumalanka-anturi olisi käytännöllinen, sillä täytyy olla korkea vastuksen lämpötilakerroin ja sellainen resistanssi, että sitä on helppo lämmittää käytännöllisillä virran ja jännitteen arvoilla. Yleisimpiä lankamateriaaleja ovat volframi, platina ja platinan ja iridiumin metalliseos. Volframi langat ovat vahvoja ja niillä on korkea vastuksen lämpötilakerroin eli  $0,004/^{\circ}\text{C}$ . Niitä ei kuitenkaan voida käyttää korkeissa lämpötiloissa monenkaan kaasun kanssa, koska niillä on heikko hapettumisen vastustuskyky. Platinalla on hyvä hapettumisen vastustuskyky ja hyvä lämpötilakerroin ( $0,003/^{\circ}\text{C}$ ), mutta se on erittäin heikkkoa etenkin korkeissa lämpötiloissa. Platina-iridiumseos on kompromissi volframin ja platinan väliltä hyvällä hapettumisen vastustuskyvyllä ja platinaa suuremmalla vahvuudella, mutta sillä on alhainen lämpötilakerroin ( $0,00085/^{\circ}\text{C}$ ). Volframi on tällä hetkellä suosituimpi kuumalankamateriaali. Yleensä lankaan lisätään ohut platina pinnoite vahvistamaan langan päällystettyjen päiden ja kannatin piikkien välistä sidosta. [36]

Kuumakalvoanturi on pohjimmiltaan johtava kalvo keraamisen alustan päällä. Kuvassa 22 nähtävässä kuumakalvoanemometrissä anturin pää on kvartsisauva, jonka

päällä on platinakalvo. Kultapäälyste sauvan päissä eristää varsinaisen anturiosan ja tarjoaa lujan metallikontaktin kiinnittämään sauvan tukirakenteeseensa. Saman halkaisijan kuumalanka-anturiin verrattuna sylinterimäinen kuumakalvoanturilla on parempi taajuusvaste, koska anturin varsinainen anturiosa on jakautunut pinnalle enemmän kuin sisältää koko materiaalin kuten lanka-anturissa. Kalvoanturilla on alhaisempi lämmön johtuminen kannatinrakenteisiin johtuen alusmateriaalin alhaisesta lämmönjohtokyvystä, joten voidaan käyttää lyhyempää aistimisväliä. Kuumakalvoanturi mahdollistaa joustavamman anturin muotojen käytön. Näitä muotoja ovat kiila, kartiomainen, parabolinen ja litteä pinta. Kuumakalvoanturi on vähemmän altis likaantumiselle ja helpompi puhdistaa kuin kuumalanka-anturi. Ohut kvartsipinnoite pinnassa vastustaa vieraan materiaalin kertymistä. Likaantuminen tapaa kasvaa anturin koon kasvaessa. Tyypillisen kalvoanturin metallikalvon paksuus on vähemmän kuin 0,1 mikrometriä, joten anturin vahvuus ja vaikuttava lämmön johtuminen määräytyvät melkein kokonaan alusmateriaalista. Useimmat kalvot on tehty platinasta sen hyvän hapettumisen vastustuskyvyn ja siitä johtuvan pitkäkestoisen vakauden vuoksi. Kalvoanturien sitkeyden ja vakauden vuoksi ne ovat tulleet käyttöön monessa mittauksessa, jotka on aikaisemmin ollut erittäin hankala suorittaa hennomilla ja vähemmän vakaila lanka-antureilla. [36]



Kuva 22. Kuumakalvoanturi.

### 6.3 DAQ-laite

Tiedonkeruu on prosessi, jossa otetaan näytteitä signaaleista, jotka kuvaavat oikean maailman fyysisiä olosuhteita, ja muunnetaan saadut näytteet digitaalisiksi numeerisiksi arvoiksi, joita voidaan käyttää tietokoneessa. Tiedonkeruulaitteistot eli DAQ:it tai DAS:it (data acquisition system) tyypillisesti muuntavat analogiset aaltomuodot digi-

taalisiksi arvoiksi käsittelyä varten. Tiedonkeruulaitteiston osiin kuuluu anturi, signaalinkäsittelypiiri sekä analogia-digitaalimuunnin. Anturi muuntaa fysikaaliset parametrit sähkösignaaleiksi. Signaalinkäsittelypiiri muuntaa anturin signaalin muotoon, joka voidaan muuntaa digitaalisiksi arvoiksi. Analogia-digitaalimuunnin muuntaa käsitellyn anturisignaalin digitaalisiksi arvoiksi. Signaalin käsittely on tarpeen, mikäli mittamuuntimelta tuleva signaali ei sovellu käytettävälle DAQ-laitteelle. Signaalia saatetaan joutua vahvistamaan, suodattamaan tai demoduloimaan. [37]

Tiedonkeruusovelluksia ohjataan ohjelmilla, jotka on kehitetty käyttäen erilaisia yleiseen käyttöön tarkoitettuja ohjelmointikieliä kuten esimerkiksi BASIC, C, Java. Erikoistuneet ohjelmistotyökalut, joita käytetään suuren mittakaavan tiedonkeruulaitteiston rakentamiseen, sisältävät EPICS-ohjelmointiympäristön. Graafisiin ohjelmointiympäristöihin kuuluu Ladder logic, Visual C++, Visual Basic, MATLAB ja LabVIEW. [37]

DAQ-laite on yleensä se, joka hoitaa tiedon välityksen signaalien ja tietokoneen välillä. DAQ-laite voi koostua moduuleista, jotka voidaan liittää tietokoneen portteihin, kuten sarjaporttiin tai USB:iin, tai kortteja, jotka liitetään tietokoneen emolevyyn. DAQ-kortit sisältävät usein monia osia kuten esimerkiksi multiplekserin, ADC:n ja DAC:n. Näihin päästään käsiksi mikrokontrollerilla väylän kautta. Kontrolleri on joustavampi kuin johdottamalla tehty logiikka ja halvempi kuin tietokone ja siihen voidaan ohjelmoida yksinkertaisia kiertokyselyilmukoita. Useimmiten uudelleenohjelmitavaa logiikkaa käytetään suuren nopeuden saavuttamiseen tietyissä tehtävissä ja digitaalisia signaalinkäsittelijöitä käytetään, kun tiedot on kerätty, keräämään joitakin tiettyjä tuloksia. Kaikkien DAQ-laitteiden ei täydy olla pysyvästi kiinnitettynä tietokoneeseen. Esimerkkinä tästä ovat älykkäät itsenäisesti toimivat dataloggerit sekä oskilloskoopit, mitä voidaan käyttää tietokoneella, mutta voivat toimia myös itsenäisesti.

Jotta DAQ-laitteet toimisivat tietokoneen kanssa, tarvitaan DAQ-ohjelmistoa. Ohjelmiston laiteajuri suorittaa alhaisen tason rekisterioperaatioita laitteessa samalla paljastaen ohjelmointirajapinnan käyttäjäsovellusten kehittämistä varten. [37]

#### 6.4 Operaatiovahvistin

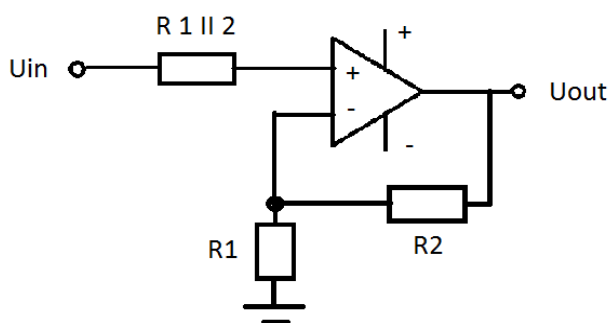
Operaatiovahvistimet ovat monikäyttöisiä mikropiirejä, joilla käsitellään analogisia signaaleja. Yhdessä mikropiirissä voi olla useita operaatiovahvistinyksiköitä. Operaatiovahvistimessa on kolme signaaliliitintä, joista kaksi on tuloja ja yksi lähtö. Operaatiovahvistimen tulot ovat ei-invertoiva (+) sekä invertoiva (-), joka kääntää vaihetta

180°. Operaatiovahvistimessa on myös kaksi liitintä syöttöjännitteelle. Useimmat operaatiovahvistimet tarvitsevat kaksipuoleisen tasajännitteen toimiakseen. Operaatiovahvistin mittaa sen kahden tuloliittimen välisen jännite-eron ja antaa tuloon tämän eron kerrottuna avoimen silmukan vahvistuksella, mikä on ideaalisesti ääretön. Käytännössäkin tämä vahvistus on erittäin suuri, joten lähes aina operaatiovahvistimen lähtöliitin takaisinkytketään jompaankumpaan tuloliittimeen. Takaisinkytkentä voi olla joko positiivinen tai negatiivinen riippuen kytketystä tuloliittimestä. Takaisinkytketyn operaatiovahvistimen vahvistus on koko suljetun piirin vahvistus, minkä suuruus riippuu piirissä käytetyistä komponenteista. Operaatiovahvistin toimii komparaattorina eli vertailijana, jos siihen ei ole tehty takaisinkytkentää. Operaatiovahvistimelle voidaan tehdä myös muita kytkentöjä, jolloin siitä saadaan tehtyä esimerkiksi derivaattori, integraattori tai oskillaattori. [38,39]

Kun operaatiovahvistimesta tehdään ei-invertoiva, saadaan vahvistus kaavalla

$$A_U = 1 + \frac{R_2}{R_1}, \quad (33)$$

jossa  $A_U$  on vahvistus ja vastukset  $R_1$  sekä  $R_2$  näkyvät kuvasta 23, jossa on esitetty ei-invertoiva kytkentä operaatiovahvistimelle. [39]



Kuva 23. Ei-invertoiva vahvistus.

## 6.5 LabVIEW

Labview on graafiseen G-kieleen perustuva ohjelmointiympäristö, jonka on tehnyt National Instruments. Labview on tehty käytettäväksi mittaus-, testi- ja säätöjärjes-



telmien kehittämiseen käyttäen kuvakkeita ja johdotuksia, jotka kuvaavat prosessi-kaaviota. Labview tarjoaa integroinnin tuhansien eri laitteiden kanssa. Labview:ssä on myös satoja sisäänrakennettuja kirjastoja kehittyneeseen analysointiin ja datan visualisointiin. Labview:stä on tehty versiot Windowsille, Linuxille, Macille, Solarikselle sekä joillekin PDA-laitteille. Labview-ohjelmia voidaan siirtää suoraan eri käyttöjärjestelmien välillä, jos mukaan ei lasketa käyttöjärjestelmäkohtaisia rajoituksia kuten ActiveX-komponentteja. Muut erot, kuten esimerkiksi erilaiset tiedostopolut, voidaan sovittaa ohjelmallisesti tai käsin. [40,41]

Labview on hyvä työkalu mittaus- ja testaussovelluksissa ja helppokäyttöisyytensä vuoksi soveltuu myös usein yleisohjelmointikieleksi. Esimerkiksi mutkikkaat merkkijonojen käsittelyoperaatiot on kuitenkin hankala tehdä Labview:lla, joten ne kannattaa tehdä muilla ohjelmilla ja tuoda Labview:hun. Labview:n ohjelmointikieli on helppo oppia. Labview:n muita tyypillisiä käyttökohteita ovat muun muassa tietokonepohjaiset teollisuusautomaatiosovellukset sekä erittäin laajat hajautetut tiedon varastointi- ja analysointisovellukset. Koska Labview on niin tehokas, se kilpailee täysin esimerkiksi C- ja C++-ohjelmoinnin kanssa. [40]

## 7 JÄNNITTEEN JA VIRRAN MITTAAMINEN

### 7.1 Jännitteen mittaaminen

SI-järjestelmässä jännitteen suure on  $U$  ja sen yksikkö on voltti, jonka symboli on  $V$ . Ohmin lain mukaan yhden voltin jännite aiheuttaa yhden ampeerin virran yhden ohmin vastuksen läpi. Jännite voi olla joko tasajännitettä, missä jännite pysyy vakiona, tai vaihtojännitettä, missä jännite vaihtelee positiivisen ja negatiivisen huippuarvon välillä. Vaihtojännitteen tehollisarvo tarkoittaa tasajännitettä, joka aiheuttaisi kuorman saman tehon kuin kyseinen vaihtojännite. [42]

Jännitettä voidaan mitata esimerkiksi yleismittarilla. Digitaalisessa yleismittarissa muunnetaan mitattava jännite analogia-digitaalimuuntimella näytöllä näytettäväksi numeroksi. Yleismittarilla vaihtojännitettä mitattaessa voidaan mitata jännitteen tehollisarvo tai huippuarvo. Kun halutaan mitata jännitettä ajan funktiona, käytetään oskilloskooppia. Oskilloskoopilla voidaan mitata myös vaihtojännitteitä, joiden muutos ajan funktiona nähdään oskilloskoopin näytöllä. Jännitettä voidaan mitata myös kierto-

käämimittareilla, joissa käämin läpi kulkema virta aiheuttaa kestopagneetin kentässä voiman, joka kääntää mittarin osoitinta. [42]

Jännitemittari kytketään mitattavan kohteen kanssa rinnan. Jännitemittarin resistanssin tulee olla mahdollisimman suuri, että se ei vaikuttaisi mitattavaan kohteeseen. Kun jännitemittarin kanssa kytketään sarjaan etuvastus, saadaan jännitemittarin mitausaluetta laajennettua. Etuvastuksessa tapahtuu halutun suuruinen jännitehäviö. [43]

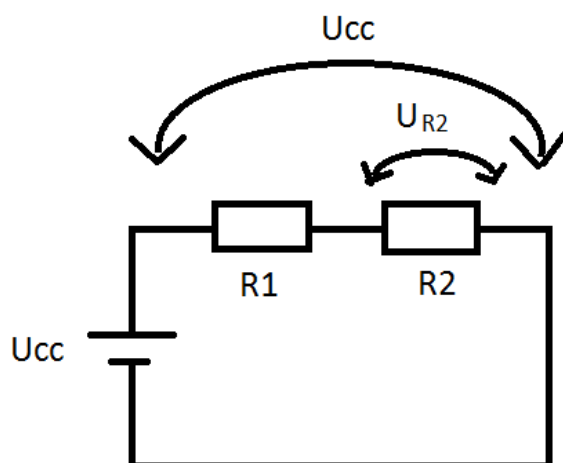
Vastus tulee käytännössä virran ja jännitteen suhteesta ja voidaan laskea Ohmin lain avulla

$$R = \frac{U}{I}, \quad (34)$$

jossa  $R$  on vastus,  $U$  on jännite ja  $I$  on virta. Kytkemällä vastuksia sarjaan saadaan toteutettua jännitteenjako. Jännitteenjako saadaan aikaan haluttu jännite esimerkiksi mittaamista varten. Jännitteenjako saadaan lasketuksi kaavasta

$$U_{R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * U_{CC}, \quad (35)$$

jossa  $U_{R_2}$  on vastuksen  $R_2$  yli aiheutuva jännite,  $R_1$  on vastuksen  $R_2$  kanssa sarjaan kytketty vastus ja  $U_{CC}$  on käyttöjännite. Jännitteenjako on esitetty kuvassa 24. [44]



Kuva 24. Jännitteenjako.

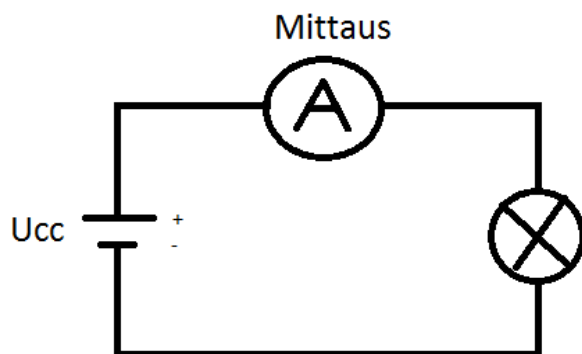
## 7.2 Virran mittaaminen

SI-järjestelmässä sähkövirran suure on  $I$  ja sen yksikkö on ampeeri, jonka tunnus on A. Sähkövirran määritelmän mukaan yhden ampeerin virta aiheuttaa  $2 \cdot 10^{-7}$  newtonin suuruisen voiman johdinmetriä kohden kahden johtimen välille, jotka ovat äärettömän ohuita ja pitkiä ja, jotka kulkevat toisistaan metrin päässä samansuuntaisesti tyhjiössä. Tasavirta on sähkövirtaa, jossa voimakkuus ja suunta pysyvät vakiona. Vaihtovirrassa taas voimakkuus ja suunta vaihtuvat jatkuvasti. Aineet voidaan jakaa johteisiin ja eristeisiin niiden sähkövirran siirtokyvyn mukaan. Kaikilla väliaineilla on sisäinen resistanssi, minkä vuoksi niissä kulkee virta ainoastaan jännitteen ylläpitämänä. Poikkeuksena tästä ovat suprajohteet. [45]

Väliaineen sisäinen resistanssi aiheuttaa virran muuttumisen lämmöksi. Tätä ilmiötä voidaan hyödyntää erilaisissa lämmityslaitteissa. Ilmiö on kuitenkin haitallista sähkönsiirrossa, sillä sen vuoksi tehoa kuluu hukkaan. Tästä johtuen energian siirrossa pyritään käyttämään pientä virtaa ja suurta jännitettä, mikä saadaan aikaan muuntajan avulla, kun kyseessä on vaihtovirta. Sähkövirta aiheuttaa myös ympärilleen pyörteisen magneettikentän. Ulkoinen magneettikenttä voi vaikuttaa virtajohtimiin, mutta ei staattisiin sähkövarauksiin. [45]

Yleisimmin sähkövirtaa mitataan ampeerimittareilla. Analogisen ampeerimittarin toiminta perustuu siihen, että sähkövirta synnyttää johtimeen magneettikentän, jonka voimakkuudesta voidaan mitata sähkövirta. Magneettikenttä siis kääntää mittarin viisaria sähkövirran suuruuden suhteen. Pihtivirtamittarin toiminta perustuu johtimen ympärille muodostuvan magneettikentän mittaamiseen. Sähkövirtaa pystytään myös mittaamaan johtamalla virta shunttivastuksen läpi, mistä voidaan mitata vastuksen yli muodostunut jännite. Jännitteestä voidaan laskea virta Ohmin lain avulla. Virtaa voidaan mitata myös yleismittarilla. [45]

Sähkövirtaa mitattaessa virtamittari kytketään sarjaan piirin kanssa. Virtamittarin resistanssi on pieni, yleensä muutaman ohmin luokkaa, jottei se muuttaisi merkittävästi piirin virtaa. Jos virtamittarin läpi kulkee liian suuri virta, se voi vahingoittua. Virtamittarin mittausaluetta voidaan laajentaa sivuvastuksella. Virtamittaus on esitetty kuvassa 25. [43]



Kuva 25. Virran mittaaminen.

Jännitteen ja virran voimakkuuden tuloa ilmaistaan sähköisenä tehona  $P$  eli

$$P = UI \quad (36)$$

[46]

### 7.3 Lataussäädin

Lataussäädin, latausregulaattori tai akkuregulaattori on laite, joka rajoittaa sähköakulle menevää tai siltä tulevaa sähkövirtaa. Lataussäädin estää akun yllilataamista ja suuria jännitteitä, jotka voivat vähentää akun suorituskykyä tai elinikää. Lataussäädin voi myös estää akun täydellisen tyhjentymisen tai säätimellä voidaan suorittaa kontrolloituja akun purkamisia akun toimintakunnon ylläpitämiseksi. Lataussäätimellä tai latausregulaattorilla voidaan tarkoittaa joko yksittäistä laitetta tai ohjauspiiriä, joka on integroitu akkuun, akkukäyttöiseen laitteeseen tai akun latauslaitteeseen. [47]

Lataussäätimiä myydään kuluttajille erillisinä laitteina yleensä aurinko- tai tuulienergian tuottolaitteiden mukana. Aurinkoenergia sovellutuksissa lataussäätimestä voidaan myös puhua aurinkoenergiaregulaattorina. Sarjakytettävä lataussäädin estää sähkövirran kulun akulle, kun se on täysi. Rinnakkaiskytkettävä lataussäädin ohjaa ylimääräisen sähkövirran varakuormalle, jos ladattava akku on täynnä. [47]

Yksinkertaiset lataussäätimet lopettavat akun lataamisen, kun säädetty jännitetaso ylittyy, ja jatkavat lataamista, kun akun jännite tippuu kyseisen jännitetason alapuolelle. Pulssinleveysmodulaatio (PWM) ja maksimitehopisteen jäljitys (MPPT) ovat elekt-

ronisesti hienostuneempia tekniikoita, joten niitä käyttäen voidaan akkua ladata sen perusteella kuinka täynnä akku on päästen lähemmäs akun maksimikapasiteettia. Joillain lataussäätimillä voidaan myös tarkkailla akun lämpötilaa ylikuumenemisen estämiseksi. Jotkut lataussäätinjärjestelmät myös näyttävät, lähettävät etänäytöille ja tallentavat tietoa sähkövirran tarkkailua varten. [47]

## 8 TUULIVOIMALAN TESTAUSLAITTEISTO

### 8.1 Tuulitunnelin rakentaminen

Tuulivoimalan testauslaitteisto toteutettiin parityönä, jonka toisena tekijänä oli Ville Pietikäinen. Työ alkoi suunnitteluvaiheella, jossa pyrittiin luomaan yleiskuvaa työn tavoitteista ja toteuttamisesta. Päädyttiin siihen, että suoralla putkella tuulitunneli olisi helpoin toteuttaa ja siinä olisi vähän painehäviöitä. Tiedossa oli, että testattava tuuliturbiini oli jo tilattu ja sen halkaisija on noin 600 mm. Yleiskuvan selkiinnyttyä ryhdyttiin tekemään materiaalitilauksia. Tilaukseen laitettiin kaksi kolme metriä pitkää ja halkaisijaltaan 800 millimetriä olevaa ilmastointiputkea. Putkeksi valittiin ilmastointiputkea sen järkevän hinnan vuoksi ja putken halkaisijaksi 800 mm:ä tuuliturbiinin oletetun koon vuoksi. Tilaukseen laitettiin myös JLC Internationalin ilmavirtausanturi, jonka tiedot näkyvät liitteestä 1, sekä ilmastointipuhallin, jonka tiedot näkyvät liitteestä 2. Ilmavirtausanturi on malliltaan EE-75 Model C ja se valittiin sen käyttöalueen, joka voi olla 0 - 40 m/s sekä anturin mittaviestiasetusten vuoksi. Ilmavirtausanturin mittaviestialueet ovat vapaasti skaalattavissa ja viestinä voi käyttää joko virtaa tai jännitettä. Ilmavirtausanturi toimii kuumakalvoperiaatteella, joten sillä voidaan mitata myös lämpötilaa. Puhaltimeksi valittiin 1,4 kW:n kolmivaihesähköllä toimiva poistoilmapuhallin sen mittojen sekä puhallustehon vuoksi. Se, että kyseessä on poistoilmapuhallin vaikuttaa ainoastaan tuotetun ilmavirtauksen suuntaan propelliin nähden ja tätä kautta laitteen asennussuuntaan. Puhallin on malliltaan A36 800-AAG2-03 ja siinä on sisäänrakennettu PID-säädin, joten sen toiminta on hyvin tasaista.

Tilatuista osista ilmastointiputket saapuivat ensimmäisenä. Ryhdyttiin rakentamaan suoraputkista tuulitunnelia ja sille tukirakenteita. Tässä vaiheessa kuitenkin todettiin, että tuulitunnelista aiheutuva melu sekä ilmavirtaus luokkatilassa voivat olla ongelmallisia. Täten päätettiin toteuttaa tuulitunneli suljetulla kierrolla. Näin ollen tilattiin neljä 90 asteen ilmastointiputken mutkaa, joiden halkaisija oli myös 800 mm. Ilmastoointiputket ja mutkat tilattiin Dahl Oy:ltä. Päätettiin odottaa ilmapuhaltimen saapumista ja perustaa seuraava rakennelma puhaltimen ympärille. Puhaltimen saavuttua päästiin rakentamaan sille tukirakennetta silmälläpitäen koko laitoksen tulevaa kokoonpanoa. Rakenne toteutettiin erinäisistä terästangoista hitsaamalla ne yhteen. Kuvassa 26 nähdään kuvasarja puhaltimen tukirakenteen vaiheista ja puhaltimen kiinnityksestä siihen.



Kuva 26. Ilmapuhaltimen tukirakenne ja puhallin siihen liitettynä.

Ilmastointiputken mutkien saavuttua päästiin suunnittelemaan koko putkiston toteutusta ja sen tukirakenteita. Ensimmäisenä liitettiin kahdet mutkat toistensa kanssa yhteen, jotta saatiin mitat tukirakenteelle. Mutkat ja niiden liitos nähdään kuvasta 27.



Kuva 27. Putken mutkat ja niiden liitos.

Tukirakenne koko putkistolle pystyttiin nyt suunnittelemaan ja toteuttamaan, kun kaikki mitat olivat tiedossa. Tälläkin kertaa tukirakenne tehtiin erinäisistä terästangoista ja maalattiin mustaksi kuten puhaltimen tukirakenne. Tällä kertaa kuitenkin vain rakenteen jalat ja pystytangot hitsattiin yhteen. Muut osat tehtiin pulteilla kiinnitettäviksi, jotta rakenteet pystyttiin kuljettamaan osissa ja kasaamaan paikan päällä. Tukirakenteiden osat ja niiden yhteenliittäminen nähdään kuvasta 28.



Kuva 28. Putkiston tukirakenteet.

Seuraava vaihe oli liittää ilmastointiputket sekä mutkat toisiinsa ja tukirakenteisiin. Tämä jouduttiin tekemään rakenteiden ollessa kyljellään rakentamisen mahdollistamiseksi. Osien ollessa yhdessä rakenne putkistoinen nostettiin pystyyn. Putkiston ja tukirakenteen yhdistäminen nähdään kuvasta 29.



Kuva 29. Putkiston ja rakenteiden yhdistäminen.

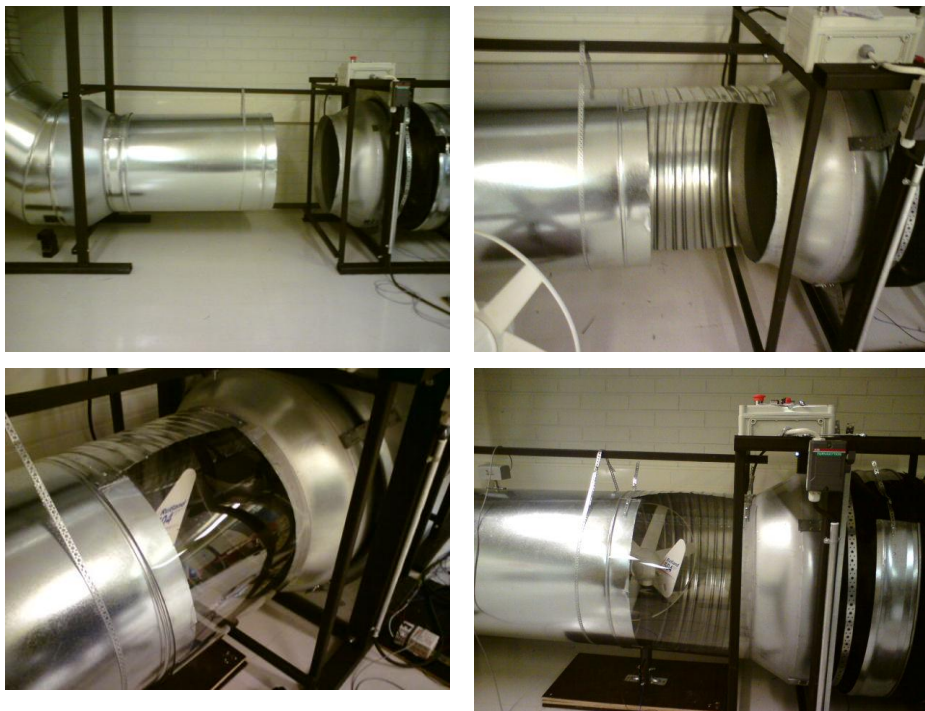


Seuraavaksi putkisto tehtiin loppuun liittämällä viimeisetkin putkiston osat kokonaisuuteen. Putkiston osat liitettiin toisiinsa popniiteillä. Putkiston mutkissa on itsessään kuminen tiiviste, joten erillistä tiivistystä putkien välille ei tarvittu. Puhaltimen ja puhallussuunnan putken välinen tiivistys tehtiin kumimatolla ja kiristyspannoilla, jotka myöhemmin vaihdettiin isoihin peltisiin kiristysnauhoihin. Tuulitunnelin väliaikainen rakenne nähdään kuvasta 30.



Kuva 30. Putkisto valmiina testaamista varten.

Tässä vaiheessa testauslaitteiston rakentamista mitattiin tuulitunnelin sisäinen ilmavirtaus. Putkiston sisäisen ilmavirtauksen nopeudeksi saatiin mitattua noin 11 m/s. Tämä ei kuitenkaan riitä kuvaamaan tuuliolosuhteita kovinkaan hyvin, sillä se vastaa navakkaa tuulta ja tuulivoimatuotannossa käytettävien voimaloiden toiminta-alue on välillä 5 - 25 m/s. Tiedossa oli, että tuuliturbiinin halkaisija olisi 510 mm, joten se mahdollisti putken halkaisijan kavennuksen. Saatavilla oli 630 mm halkaisijaltaan olevaa metalliputkea ja siihen sopivia kavennusosia. Laskujen perusteella tällainen kavennus lisäisi ilmavirran nopeutta kuristuskohtassa noin 7 m/s, eli ilmavirran teoreettinen nopeus tulisi olemaan 17,74 m/s. Tämän nopeuden katsottiin olevan riittävä kuvaamaan tuuliolosuhteita, sillä esimerkiksi Suomessa tuulen kuukausittainen keskinopeus ei ylitä 14 m/s. Täten osat tilattiin ja niiden saavuttua putkistoon rakennettiin kuristusosio. Kuristuskohtaan laskentaan käytettiin kaavaa 30 ja laskutoimituksessa käytetyt arvot löytyvät liitteestä 3. Kuristusosion kohdalle tehtiin aukko testattavalle tuuliturbiinille ja aukolle läpinäkyvä luukku muovista. Tästä muodostui tuuliturbiinien testausasema. Luukun kiinnitys on toteutettu peltisillä kiristysnauhoilla. Kuvassa 31 näkyvät testausaseman rakennusvaiheet sekä testattava tuuliturbiini putken sisällä.



Kuva 31. Kavennusosion rakentaminen putkistoon.

Testausaseman valmistuttua suoritettiin jälleen virtausnopeusmittauksia. Mittaukset suoritettiin siten, että ensin mitattiin virtausnopeuksia testausaseman ollessa tyhjä ja sen jälkeen asettamalla testausasemaan testattavaksi tarkoitettu tuuliturbiini. Tuuliturbiini on malliltaan Rutland 504 Windcharger ja sen tiedot löytyvät liitteestä 4. Tuuliturbiinille täytyi rakentaa alusta ja masto kiinnitystä varten. Kun turbiini oli asennettu tuulitunnelin sisälle, huomattiin, että putken ilmavirtaus hidastui huomattavasti. Liitteestä 5 nähdään, että ilmavirtauksen nopeus tyhjässä putkessa on maksimissaan noin 17,5 m/s, ja Rutland 504-tuuliturbiinin ollessa putkessa nopeus on suurimmillaan 9,5 m/s. Liitteestä 5 nähdään myös, että puhaltimen ajoarvoa nostamalla yli 80 prosentin ei järjestelmällä saavuteta suurempia ilmavirtauksen nopeuksia. Ilmavirtauksen nopeusero tyhjällä putkella ja turbiinin sisältämällä putkella johtuu tuuliturbiinin aiheuttamasta ilmanvastuksesta, joka on laskettu kaavan 2 avulla. Tuuliturbiinin aiheuttama painehäviö on noin 51,5 Pa. Laskutoimitukseen liittyvät arvot löytyvät liitteestä 3. Se, että puhaltimen ajoarvon nostaminen yli 80 prosentin ei nosta virtausnopeutta, johtuu putken sisäisistä painehäviöistä, suurimmaksi osakseen putken mutkista. Kaavan 13 mukaan laskettuna painehäviö tuulitunnelin suoralla osuudella on noin 0,08 Pa, kun taas kaavan 20 avulla laskettuna painehäviö yhteensä kaikissa mutkissa on noin 94,4 Pa. Näihinkin laskutoimituksiin liittyvät arvot löytyvät liitteestä 3. Saadut arvot ovat kuitenkin suunta antavia, sillä Rutland 504-turbiinin ollessa putkessa kokonaispainehäviöksi tulisi noin 146 Pa ja liitteestä 2 katsottuna puhaltimen tuottama maksimi paine on 150 Pa. Tämä tarkoittaisi sitä, että tuulitunnelissa ei olisi

juuri ollenkaan virtausta. Kuvassa 32 on tuulivoimalan testauslaitteisto valmiiksi rakennettuna.

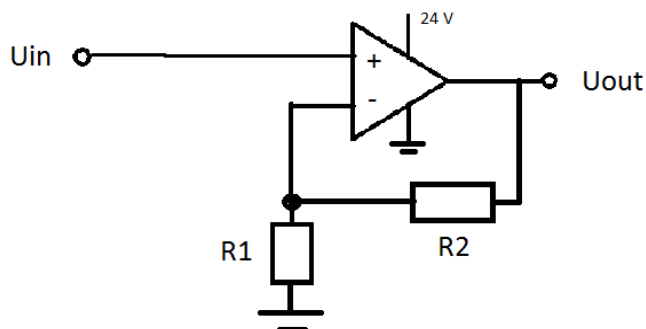


Kuva 32. Tuulivoimalan testauslaitteisto.

## 8.2 Prosessin ohjauksen ja mittausten toteuttaminen

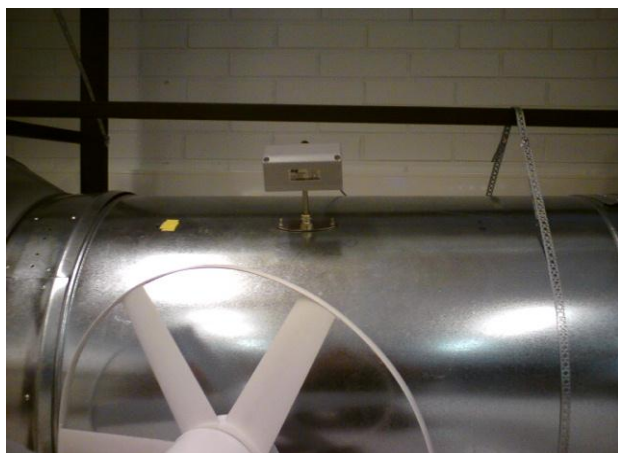
Jotta prosessia pystyttäisiin säätämään ja mittaamaan, täytyi siihen asentaa mittalaitteet ja mittaus- ja ohjausohjelma. Tiedonsiirto prosessin laitteiden ja ohjelman välillä toteutettiin National Instrumentsin NI USB-6008 -DAQ-laitteella. Laitteen tiedot löytyvät liitteestä 6. DAQ-laitteessa on kaksi analogiaulostuloa ja kahdeksan analogiasäätuloa sekä kaksitoista digitaalista I/O linjaa. Jänniteviestialueet laitteessa ovat analogiaulostulolle 0 - 5 V ja analogiasäätulolle 0-10 V. Ensimmäisenä tehtiin puhaltimen ja mittaus- ja ohjausohjelman välinen kytkös. Koska jänniteviestialue puhaltimen ohjauksessa on 0 - 10 V ja DAQ-laitteen ulostuloalue on 0 - 5 V, täytyi rakentaa vahvistin jänniteviestin kasvattamiseksi. Vahvistimessa käytettiin ST:n LME24N-operaatiovahvistinta, jonka tiedot löytyvät liitteestä 7. Operaatiovahvistimen käyttöjännite voi olla yksipuoleinen ja väliltä +3 - +30 V, joten sille päätettiin asentaa 24 V:n tasajännitelähde. Tasajännitelähteenä käytettiin MW:n DR-4542-jännitelähdettä ja sen tiedot löytyvät liitteestä 8. Jännitelähteen yhteyteen asennettiin lisäksi sulake, joka toimii myös katkaisijana. Vahvistinpiiristä jätettiin pois vastus tulevan jännitteen ja ei-invertoivan tulon välistä, joten vahvistus tulee vastuksien  $R_1$  ja  $R_2$  suhteesta. Järjestelmän vahvistinpiiri rakennettiin antamaan vahvistukseksi 2 eli

DAQ-laitteelta puhaltimelle menevä jänniteviesti kerrotaan kahdella. Vahvistinpiiri on esitetty kuvassa 33.



Kuva 33. Vahvistimen piirikaaviokuva.

Seuraavaksi laitteistoon liitettiin ilmavirtausanturi. Anturi tarvitsee myös 24 V:n tasajännitelähteen, joten anturi liitettiin vahvistimelle asennettuun jännitelähteeseen. Ilmavirtausanturi asetettiin toimimaan viestialueella 0-10 V. Ilmavirtausanturi asennettiin tuuliturbiinien testausaseman edelle. Anturille haettiin paikka, jossa sen näyttämät ilmavirtauksen nopeudet vaihtelisivat mahdollisimman vähän. Anturi asennettiin siten, että sen mittapää olisi mahdollisimman keskellä putkea. Anturin asennuskohta näkyy kuvasta 34.



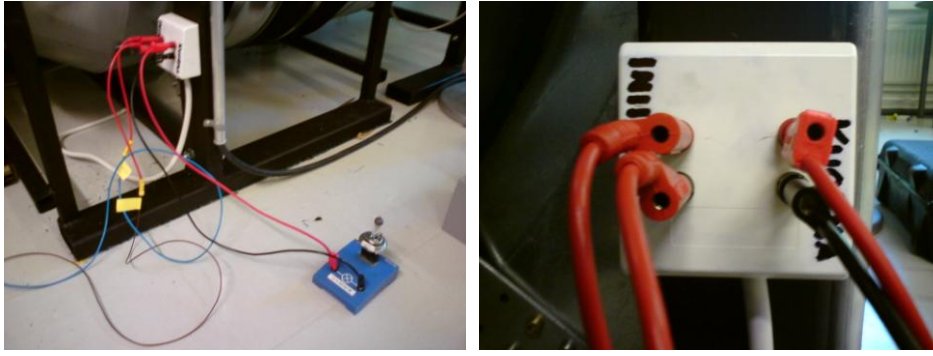
Kuva 34. Virtausnopeusanturin asennuskohta.

Seuraavassa vaiheessa rakennettiin lataus- ja mittausjärjestelmä. Järjestelmä oli aluksi suoraan kytketty kiinni Rutland-tuuliturbiiniin ja akkuun. Järjestelmän latausosuus oli toteutettu siten, että turbiinilta tuleva sähkö ohjattiin lataussäätimen kautta 12 V:n akulle ja akkuun oli kiinnitetty lisäksi 50 W:n polttimo. Lataussäätimenä käytettiin liitteessä 9 näkyvää 12 V:lle tarkoitettua Flexchargin lataussäädintä mallil-

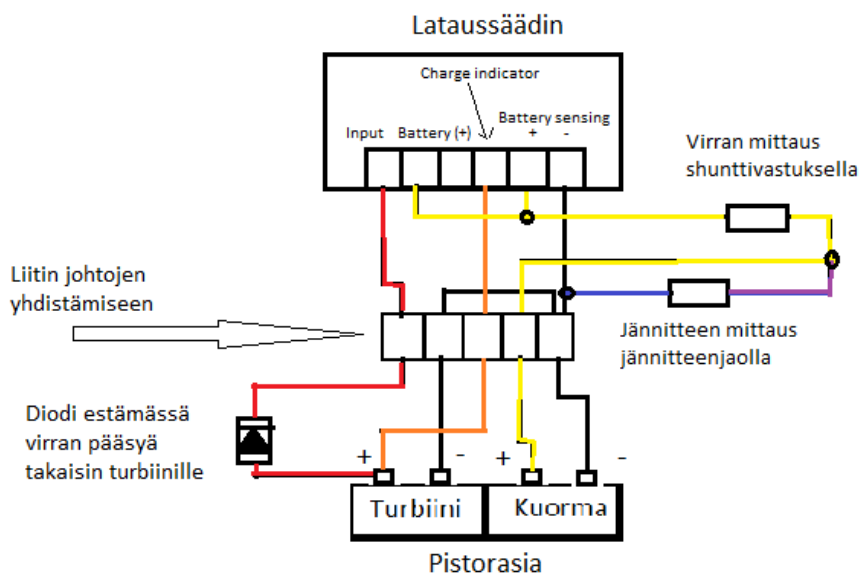
taan NC25A-12. Lataussäädin tasaa jännitteen pysymään halutussa maksimiarvossa. Kyseisessä lataussäätimessä voidaan säätää jännitteelle huippuarvo väliltä 13,8 - 16 V. Järjestelmään asennettiin 50 W:n polttimo siksi, että sen aiheuttama kuorma tasaa latausjärjestelyä. Myöhemmin kävi ilmi, että akku oli rikki ja ei latautunut ollenkaan, joten polttimo oli oikeastaan lataussysteemin ainoa kuorma. Polttimon tarve järjestelmässä olikin ihmetyttänyt, sillä kyseessä ollut tuuliturbiini oli suunniteltu 12 V:n akkujen lataamiseen. Tästä kävi ilmi, että järjestelmässä ei välttämättä tarvitse käyttää akkua kuormana, vaan sopiva vastus riittää ja on ehkä parempi, kun testataan tuuliturbiinin ominaisuuksia.

Lataus- ja mittausjärjestelmän mittausosuus sisältää virran ja jännitteen mittaukset. Virtaa ja jännitettä mitataan, jotta niistä voidaan laskea testattavan tuuliturbiinin tuottamaa tehoa. Virta mitattiin shunttivastuksen avulla. Vastus asennettiin sarjaan akun eli järjestelmän kuorman kanssa. Shunttivastuksen yli voidaan mitata tietty jännite, kun sen läpi kulkee tietty määrä virtaa. Järjestelyssä käytetyn shunttivastuksen yli aiheutuu 60 mV jännite 5 A virralla. Aiheutunut jännite taasen voidaan skaalata takaisin virran arvoa vastaavaksi lukupäässä eli tässä järjestelmässä tietokoneohjelmassa. Jännitteen mittaus latausjärjestelystä tehtiin rakentamalla jännitteenjakopiiri ja asentamalla se rinnan akun kanssa. Jännitteenjaon piirikaaviokuva on esitetty kuvassa 31. Jännitteen jaolla saatiin sovitettua jännite I/O-laitteen 0 -10 V:n viestialueelle. Eli, kun lataussäätimen läpi päästämä jännite on maksimissaan 16 V, saadaan siitä puolittamalla uudeksi maksimi arvoksi 8 V, joka sopii I/O-laitteen viestialueelle. Tämäkin jännite voidaan skaalata takaisin oikeaan arvoonsa lukupäässä.

Myöhemmin lataus- ja mittausjärjestelmä muutettiin toimimaan yleisesti kaikilla testattavilla tuuliturbiineilla. Tämä tehtiin siten, että rakennettiin pistorasia, johon liitettiin johdotukset, jotka olivat ennen menneet suoraan Rutland-tuuliturbiinille ja akulle. Pistorasiaan on asennettu diodi, estämään virran pääsyä takaisin tuuliturbiinille. Pistorasia siis mahdollistaa helpon testattavien tuuliturbiinien ja kuormien vaihtamisen järjestelmässä. Pistorasia näkyy kuvassa 35. Lataus- ja mittausjärjestelmä on esitelty kuvassa 36.



Kuva 35. Järjestelmän pistorasia testattaville tuuliturbiineille sekä kuormille.



Kuva 36. Lataus- ja mittausjärjestelmä.

### 8.3 Testauslaitteiston mittaus- ja ohjausohjelma

Ohjelma, jolla ohjataan ja mitataan testauslaitteisto-prosessia, tehtiin Labview-ohjelmalla. Mittaus- ja ohjausohjelma tehtiin vastaamaan aiemmin esiteltyjä puhaltimen ohjausta sekä mittauksia. Ohjelman etupaneeli on esitetty liitteessä 11. Kuten liitteestä 11 näkyy, ohjelmaan on tehty puhaltimen ohjaukselle liukusäädin ja säätö lukuarvoja syöttämällä. Stop-nappi ajaa säädön alas ja pysäyttää prosessin. Etupaneelissa on kaksi kenttää ilmavirtauksen nopeudelle. Kohta "Ilmavirtaus putkessa [m/s]" näyttää ilmavirtauksen sen hetkisen nopeuden. Kohta "Ilmavirtaus luonnossa [m/s]" näyttää ilmavirtauksen nopeuden mikä olisi tyhjässä tuulitunnelissa, jos tunnelissa on käytössä Rutland 504-tuuliturbiini.

Kohdat "Ohjausviesti I/O 0-5V" ja "Ilmanvirtausviesti 0-10V" ovat lähinnä testausvaiheessa käytettyjä apuvälineitä, jotka näyttävät kyseisten kohtien jänniteviestien arvot. Etupaneelissa näytetään myös mitattavat virta ja jännite, joiden perusteella ohjelmassa näkyvä teho lasketaan. Etupaneelissa on myös havainnollistamisen vuoksi kuvaaja, joka näyttää putken ilmavirtauksen nopeuden ajan funktiona. Vihreä merkkivalo "Lataa" syttyy palamaan, jos tuuliturbiini lataa akkua ja sammuu, jos latausta ei tapahdu.

Mittaus- ja ohjausohjelman lohkoakaaviokuva on esitetty liitteessä 12. Liitteestä 12 näkyy kuinka mittauksen skaalaukset on toteutettu. Ohjelmaan sisään tulevat signaalit otetaan vastaan yhdellä DAQ Assistant-lohkolla, josta täytyy lohkon jälkeen haaroittaa signaalit erikseen. Tämä on tehty siksi, että useamman DAQ Assistant-lohkon käyttö signaalien vastaanotossa sotkee ohjelmaa. Ohjelmassa käytetty laskenta on suoritettu Formula-lohkoilla, joihin voidaan sijoittaa kaava, jonka tuloksen lohko antaa ulos. Signaalien lähetyksessä käytetään myös DAQ Assistant-lohkoa puhaltimen ohjaukseen.

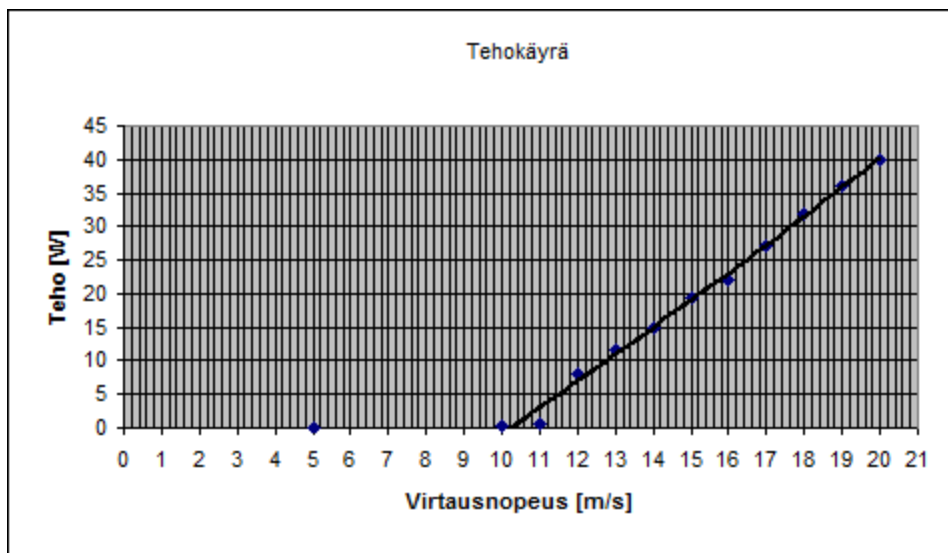
Virranmittauksen skaalauksessa täytyi käyttää lohkoa, jolla lasketaan otettujen näytteiden mediaaniarvoa. Tämä siksi, että shunttivastuksen yli mitattu jännite on millivolttiluokkaa eli hyvin pieni ja se vaihtelee paljon pienestäkin virran muutoksesta sekä 12-bittinen I/O-laite lukee hyvin karkeasti näitä muutoksia. Johtuen virtamittauksesta virran arvo on asetettu näyttämään nolaa sen ollessa alle 0,1 A. Sama raja on asetettu myös "Lataa"-merkkivalon syttymiselle. Tämä siksi, että havaittiin virran arvon olevan noin 0,04 - 0,08 A vaikkei prosessi ollut edes käynnissä. Virran skaalatusta arvosta on jo vähennetty 0,2 ennen mediaani arvon laskemista.

Muuttaessa ilmavirtauksen nopeutta vastaamaan tyhjän putken virtausnopeutta, kun sisällä on Rutland 504-tuuliturbiini, käytettiin apuna liitteessä 5 olevia kuvaajia. Kuvaajia on kaksi, joista toisessa esitetään puhaltimen ajoarvo (%) ilmavirtauksen nopeuden funktiona, ja toisessa esitetään ilmavirtauksen nopeus puhaltimen ajoarvon funktiona. Kuvaajan, jossa ajoarvo esitetään virtausnopeuden funktiona, käyrästä "Tuuliturbiinin kanssa" otetaan sen funktio kuvaamaan y-akselin arvoa eli puhaltimen ajoarvoa. Tämän funktion arvo sijoitetaan kuvaajasta, jossa ilmavirtaus esitetään puhaltimen ajoarvon funktiona, otettuun käyrän "Ilman tuuliturbiinia" funktioon. Tuloksena saadaan tyhjän putken virtausnopeus, kun putken sisällä on Rutland 504-tuuliturbiini.

#### 8.4 Laitteiston testaaminen

Testauslaitteistoa testattiin määrittämällä Rutland 504-turbiinin tehokäyrä. Tehokäyrä näkyy kuvassa 37 ja siihen liittyvien mittausten arvot löytyvät liitteestä 10. Mittauksessa käytettiin tällä kertaa vastuksena 12 V:lla toimivaa 55 W:n halogeenipolttimoa. Mittauksessa otettiin putken virtausnopeuden arvoja ja niitä vastaavia tehon arvoja. Mittauksessa käytettiin ilmvirtauksen mittaamisessa niin sanotusti "tyhjän putken" virtausnopeuksia, kun sen sisällä on tuuliturbiini. Kuvasta 37 nähdään, että Rutland 504-turbiini alkaa varsinaisesti tuottaa sähköä, kun virtausnopeus on 11 - 12 m/s. Kun verrataan mitattua tehokäyrää liitteessä 4 esiintyvään laitevalmistajan virtauskäyrään, huomataan, että käyrät ovat hyvin samankaltaisia.

Tässä testissä huomattiin, että vaikka tuulitunnelista ei ollut tarkoituskaan tehdä sellaista, että siinä virtaus olisi laminaarista, turbulentsisuuden aiheuttama testiturbiinin heiluminen hankaloitti virtausnopeuksien lukemista. Turbulentsisuutta vähentäisi tassaussäleikköjen asentaminen ennen ja jälkeen tuuliturbiinien testausosiota. Tämä kuitenkin hidastaisi ilmvirtausta putkessa, joten parempi vaihtoehto on lukita testattava tuuliturbiini paikoilleen. Rutland-tuuliturbiinia testattaessa kannattaisi käyttää 3,2  $\Omega$ :in vastusta parhaimman tehon saamiseksi, koska Rutland 504-turbiini pystyy oletuksena maksimissaan 80 W:n tehoon ja 5 A:n virtaan ja  $P=U \cdot I$ , jolloin  $U$  on 16 V, joka on lataussäätimen suurin läpi päästämä jännite. Täten, koska  $U=R \cdot I$ , on  $R$  3,2  $\Omega$ .



Kuva 37. Rutland 504-tuuliturbiinin tehokäyrä.



Laitteistosta pyrittiin myös selvittämään kuinka paljon lataussäädin vaikuttaa mitattaviin virtaan ja jännitteeseen. Tämä toteutettiin mittaamalla virran ja jännitteen arvoja sekä lataussäätimen ollessa mittausjärjestelmässä kiinni että lataussäätimen ollessa poissa järjestelmästä. Mittausten tulokset on esitetty liitteessä 13. Tuloksista voidaan todeta, että lataussäädin ei juurikaan vaikuta mittaustuloksiin. Jos tämän mittauksen tuloksia verrataan liitteessä 10 oleviin tuloksiin, huomataan, että ne poikkeavat toisistaan. Tämä johtuu siitä, että tässä mittauksessa testausaseman luukku ei ollut paikallaan, joten putken sisäinen virtausnopeus oli huomattavasti pienempi ja skaalauksella määritetty tyhjän putken virtausnopeus ei pitänyt paikkaansa.

## PÄÄTÄNTÖ

Tavoitteena oli rakentaa järjestelmä, jolla voidaan testata erilaisia pienoistuulivoimaloita. Tuulivoimalan testauslaitteistosta saatiin tehtyä toimiva kokonaisuus ohjauksiin ja mittauksiin. Järjestelmällä pystytään tuottamaan testausosioon noin 17,5 m/s ilman virtausnopeus. Tämä virtausnopeus on riittävä, jos tarkastellaan voimalan tuottoa tuulen kuukausittaisen keskinopeuden kannalta. Laitteistolla voidaan testata pienoistuulivoimaloita, joiden roottorin halkaisija on alle 630 mm. Laitteisto on hyvä pohja jatkokehittämiselle. Yksi jatkokehittämisidea olisi hankkia järjestelmälle tarkempi ja useampipaikkainen DAQ-laite, jotta virranmittaus olisi tarkempaa ja laitteita voitaisiin kytkeä useampi yhtä aikaa. Toinen jatkokehitysidea olisi asentaa toinen ilmavirtausanturi turbiinien testiosion takaosaan, jotta voitaisiin paremmin tarkastella tuuliturbiinien vaikutusta ilmavirtaukseen.

Tuulivoima on kiihtyvästi kasvava teollisuuden ala. Tuulivoiman tuotanto tarvitsee kuitenkin vielä tällä hetkellä tukia pysyäkseen kilpailukykyisenä. Kilpailukykyyn voi vaikuttaa parantavasti tukien lisäksi tuulivoimaloiden tuotantokyvyn parantaminen. Tämä onnistuu ainoastaan suunnittelemalla parempia ja tuottavampia tuulivoimaloita, sillä tuulta tuskin pystyy kukaan lisäämään. Paremmat tuuliolosuhteet kylläkin parantavat tuulivoiman tuottoa. Tuulivoimaloiden ominaisuuksien tutkiminen ja kehittäminen on hyvin tärkeää tulevaisuuden energiantuotannon turvaamiseksi, sillä tuulivoima on ehtymätön energianlähde. Tuulivoima on myös periaatteessa päästötöntä.

## LÄHTEET

- Lähde 1: Suomen tuuliatlas. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://www.tuuliatlas.fi> Hakupäivämäärä 26.4.2011
- Lähde 2: Tuulivoimatieto. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://www.tuulivoimatieto.fi> Hakupäivämäärä 26.4.2011
- Lähde 3: Ilmatieteen laitos, Tuulet. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://ilmatieteenlaitos.fi/tuulet> Hakupäivämäärä 16.5.2011
- Lähde 4: Wikipedia, Anemometri. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Anemometri> Hakupäivämäärä 2.5.2011
- Lähde 5: Wind Power, The History of Wind Power. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://windturbine.me/windpowerhistory.html> Hakupäivämäärä  
31.1.2011
- Lähde 6: Telosnet, Illustrated History of Wind Power Development.  
[www-dokumentti]. <http://telosnet.com/wind/early.html> Hakupäivämäärä  
29.3.2011
- Lähde 7: Wikipedia, Tuulimylly. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Tuulimylly> Hakupäivämäärä 29.3.2011
- Lähde 8: Hinstock Village People, A Brief history of Windmills. [www-dokumentti].  
Saatavilla:  
<http://hinstockvillagepeople.com/globalwarmingwindmillhistory.htm> Ha-  
kupäivämäärä 29.3.2011
- Lähde 9: Wikipedia, Windmill. [www-dokumentti ]. Saatavilla:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Windmill> Hakupäivämäärä 29.3.2011
- Lähde 10: Wikipedia, Wind turbine. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine](http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine) Hakupäivämäärä 11.4.2011

- Lähde 11: Oxford Dictionary of National Biography, James Blyth.  
[www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://www.oxforddnb.com/public/dnb/100957.html> Hakupäivämäärä  
11.4.2011
- Lähde 12: Green Energy Ohio, Charles F. Brush. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://www.greenenergyohio.org/page.cfm?pagelid=341>  
Hakupäivämäärä 11.4.2011
- Lähde 13: Wikipedia, Poul la Cour. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Poul\\_la\\_Cour](http://en.wikipedia.org/wiki/Poul_la_Cour) Hakupäivämäärä 13.4.2011
- Lähde 14: Poul la Cour Museum, Poul la Cour. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://www.poullacour.dk/engelsk/cour.htm> Hakupäivämäärä 13.4.2011
- Lähde 15: Danish Wind Industry Association, History of Wind Turbines.  
[www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.vindselskab.dk/en/pictures/>  
Hakupäivämäärä 23.4.2011
- Lähde 16: Suomen tuulienergia, Tuulivoimamarkkinoiden historiaa.  
[www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://www.suomentuulienergia.fi/historia.html> Hakupäivämäärä  
31.1.2011
- Lähde 17: Alternative Energy News, Wind Power. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://www.alternative-energy-news.info/technology/wind-power/wind-turbines/> Hakupäivämäärä 11.5.2011
- Lähde 18: Wikipedia, Savonius-roottori. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Savonius-roottori> Hakupäivämäärä 12.5.2011
- Lähde 19: Wikipedia, Windside-roottori. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Windside-roottori> Hakupäivämäärä 12.5.2011
- Lähde 20: Windside. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.windside.com>  
Hakupäivämäärä 13.5.2011

- Lähde 21: Haapanen, Erkki. 2004. Tuulivoimatekniikka. [PowerPoint-esitys].  
Saatavilla:  
[http://www.tuulitaito.fi/Artikkelit/tuulivoimatekniikkaa\\_luento.ppt](http://www.tuulitaito.fi/Artikkelit/tuulivoimatekniikkaa_luento.ppt)
- Lähde 22: Wikipedia, Darrieus-roottori. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Darrieus-roottori> Hakupäivämäärä 12.5.2011
- Lähde 23: Stenberg, Anders ja Holttinen, Hannele. 2009. Tuulivoiman  
tuotantotilastot. [pdf-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2010/W145.pdf>
- Lähde 24: Wikipedia, Tuulivoima. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Tuulivoima> Hakupäivämäärä 14.5.2011
- Lähde 25: Wikipedia, Tuulitunneli. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
[http://fi.wikipedia.org/wiki/Tuulitunneli#Ylisooninen\\_tuulitunneli](http://fi.wikipedia.org/wiki/Tuulitunneli#Ylisooninen_tuulitunneli)  
Hakupäivämäärä 3.5.2011
- Lähde 26: Wikipedia, Wind tunnel. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_tunnel](http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_tunnel) Hakupäivämäärä 3.5.2011
- Lähde 27: Wikipedia, Mach-luku. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Mach-luku> Hakupäivämäärä 5.6.2011
- Lähde 28: Wikipedia, Bernoullin laki. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
[http://fi.wikipedia.org/wiki/Bernoullin\\_laki](http://fi.wikipedia.org/wiki/Bernoullin_laki) Hakupäivämäärä 8.5.2011
- Lähde 29: Metropolia, koneautomaatio, putkivirtaus. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
<http://wiki.metropolia.fi/display/koneautomaatio/4.+Putkivirtaus>  
Hakupäivämäärä 8.5.2011
- Lähde 30: Wikipedia, Reynoldsin luku. [www-dokumentti]. Saatavilla:  
[http://fi.wikipedia.org/wiki/Reynoldsin\\_luku](http://fi.wikipedia.org/wiki/Reynoldsin_luku) Hakupäivämäärä 8.5.2011
- Lähde 31: Wikipedia, Venturi-ilmiö. [www-dokumentti].  
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Venturi-ilmi%C3%B6>  
Hakupäivämäärä 8.5.2011

- Lähde 32: Honkanen, Jorma. 1996. Virtausdynamiikka. Luentomoniste.
- Lähde 33: Hiltunen, Jukka. Oulun yliopisto, Systemiteknikan laboratorio, Prosessiautomaatio. [word-dokumentti]. Saatavilla: [www.automaatioseura.fi/index/tiedostot/Prosessiautomaatio.doc](http://www.automaatioseura.fi/index/tiedostot/Prosessiautomaatio.doc)
- Lähde 34: ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, Prosessiautomaatio. [pdf-dokumentti]. Saatavilla: [http://heikki.pp.fi/abb/240\\_0007.pdf](http://heikki.pp.fi/abb/240_0007.pdf)
- Lähde 35: Wikipedia, Anturi. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Anturi> Hakupäivämäärä 5.6.2011
- Lähde 36: Department of Aerospace and Ocean Engineering, Hot-wire and hot-film anemometry. [pdf-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~simpson/aoe4154/hotwirelab.pdf>
- Lähde 37: Wikipedia, Data acquisition. [www-dokumentti] Saatavilla: [http://en.wikipedia.org/wiki/Data\\_acquisition](http://en.wikipedia.org/wiki/Data_acquisition) Hakupäivämäärä 6.6.2011
- Lähde 38: Wikipedia, Operaatiovahvistin. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Operaatiovahvistin> Hakupäivämäärä 6.6.2011
- Lähde 39: Kajaanin ammattikorkeakoulun opintomateriaali, Operaatiovahvistin. [pdf-dokumentti]. Saatavilla: [http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/VAHV\\_opari.pdf](http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/VAHV_opari.pdf)
- Lähde 40: Wikipedia, LabVIEW. [www-dokumentti] Saatavilla: <http://fi.wikipedia.org/wiki/LabVIEW> Hakupäivämäärä 6.6.2011
- Lähde 41: National Instruments, Product Information: What is NI LabVIEW?. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.ni.com/labview/whatis/> Hakupäivämäärä 6.6.2011
- Lähde 42: Wikipedia, Jännite. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://fi.wikipedia.org/wiki/J%C3%A4nnite> Hakupäivämäärä 6.6.2011

- Lähde 43: Etälukio, Jännitteen ja virran mittaaminen. [www-dokumentti].  
Saatavilla: <http://www02.oph.fi/etalukio/opiskelumodulit/fysiikka/skurssi/mittaaminen/index.html> Hakupäivämäärä 6.6.2011
- Lähde 44: Tampereen teknillisen yliopiston opintomateriaali, Elektroniikan perusteita. [pdf-dokumentti] Saatavilla: <http://www.ele.tut.fi/teaching/e-1020/aputiето.pdf>
- Lähde 45: Wikipedia, Sähkövirta. [www-dokumentti] Saatavilla:  
<http://fi.wikipedia.org/wiki/S%C3%A4hk%C3%B6virta> Hakupäivämäärä 6.6.2011
- Lähde 46: Wikipedia, Teho. [www-dokumentti] Saatavilla:  
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Teho> Hakupäivämäärä 6.6.2011
- Lähde 47: Wikipedia, Charge controller. [www-dokumentti] Saatavilla:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Charge\\_controller](http://en.wikipedia.org/wiki/Charge_controller) Hakupäivämäärä 7.6.2011

## ILMAVIRTAUSANTURIN TEKNISET TIEDOT

YOUR PARTNER IN SENSOR TECHNOLOGY



## Technical Data

## Measuring value

## Air velocity

Working range	0... 2m/s (0...400ft/min)	
	0... 10m/s (0...2000ft/min)	
	0... 40m/s (0...8000ft/min)	
Accuracy <sup>1)</sup> in air at 25°C (77°F) <sup>2)</sup> at 45% RH and 1013hPa	0.06... 2m/s (12...400ft/min)	± 0.03m/s / 6ft/min
	0.15... 10m/s (30...2000ft/min)	± (0.10m/s / 20ft/min + 1 % of measuring value)
	0.2... 40m/s (40...8000ft/min)	± (0.20m/s / 40ft/min + 1 % of measuring value)
Uncertainty of factory calibration <sup>1)</sup>	± (1% of measuring value, min. 0.015m/s (3ft/min))	
Temperature dependence electronics	typ. -0.005 % of measuring value / °C	
Temperature dependence probe	± (0.1% of measuring value/°C)	
Dependence	of angle of inflow:	< 3% for $\alpha < 20^\circ$
	of direction of inflow:	< 3%
Response time $\tau_{90}$ <sup>3)</sup>	< 1.5... 40s (configurable)	

## Temperature

Working range	probe:	-40...120°C (-40...248°F)
	probe cable:	-40...105°C (-40...221°F)
	electronic:	-40...60°C (-40...140°F)
	electronic with display:	-30...60°C (-22...140°F)
Accuracy at 20°C (68°F)	±0.5°C (±0.9°F)	
Temperature dependence electronics	typ. -0.01 °C / °C	
Response time $\tau_{90}$ <sup>3)</sup>	10s	

## Outputs

output signals and display ranges are freely scaleable (see ranges below)

voltage	0-10V (e.g. 0-5V, 1-5V etc.)	-1mA < $I_L$ < 1mA
current (3-wire)	0-20mA (e.g. 4-20mA etc.)	$R_L < 350 \text{ Ohm}$
v-scaling	0...2 / 10 / 40m/s (0...400 / 2000 / 8000ft/min)	
T-scaling	-40...120°C (-40...248°F)	
Vol-scaling	0...10000m <sup>3</sup> /min (0...353147ft <sup>3</sup> /min)	

## General

Supply voltage	24V DC/AC ± 20%	
Current consumption	max. 100mA; max. 160mA (with display)	
Connection	screw terminals max. 1.5mm <sup>2</sup> (AWG 16)	
Electromagnetic compatibility	EN61326-1 EN61326-2-3	ICES-003 ClassB FCC Part15 ClassB
Pressure range	Model E and P pressure tight up to 10bar (145psi)	
Material	housing / protection class:	metal (AlSi3Cu) / IP65; Nema 4
	measuring probe:	stainless steel
	measuring head:	PBT (polybutylenterephthalat)
System requirements	for configuration software: Windows 2000 or Windows XP	
Interface	USB 1.1	

<sup>1)</sup> The accuracy statement includes the uncertainty of the factory calibration with an enhancement factor k=2 (2-times standard deviation).  
The accuracy was calculated in accordance with EA-402 and with regard to GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement).

<sup>2)</sup> Accuracy refers to measurement in air.

<sup>3)</sup> Response time  $\tau_{90}$  is measured from the beginning of a step change to the moment of reaching 90% of the step.

## Configuration Software

An easy setup of the EE75 can be made via standard USB interface and the software included in the scope of supply.

The user can easily set the response time, correct for the gas (air) pressure, perform an one or two point adjustment and define the duct cross section for the volumetric flow rate.



EE75



ILMASTOINTIPUHALTIMEN TEKNISET TIEDOT

EC axial fans

S-Range, Ø 800



- **Material:** stator and electronics housing made of die-cast aluminium, rotor made of sheet steel (black, KTL coated), impeller blades made of die-cast aluminium
- **Technical features:** control input 0-10VDC / PWM, RS485 ebrmBUS, alarm relay, integrated PID control, voltage supply for sensor, input for sensor 0-10 V respectively 4-20 mA, 0-10 V output for slave, PFC (passive), soft start, line undervoltage detection, phase failure detection, motor current limitation, over-temperature protected electronics and motor, locked-rotor protection
- **Type of protection:** IP 54 according to DIN VDE 0470, part 1 (EN 60 529) category 2
- **Insulation class:** "F"
- **Approvals:** UL, CE and GOST; with 380-480 VAC with VDE; CCC is planned

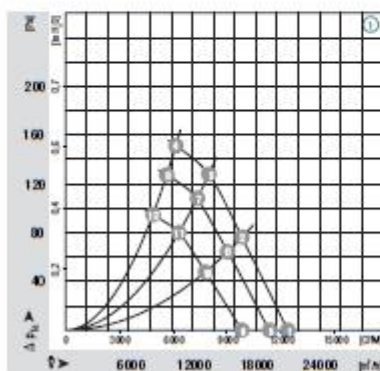
ebm-papst - Mulfingen

Nominal data <sup>®</sup>		Characteristic	Nominal voltage range	Frequency	Speed/rpm	Max. power input <sup>®</sup>	Max. current draw <sup>®</sup>	Max. back pressure	Perm. amb. temp.	Mass A3G...	Mass S3G...	Mass W3G...
Type	Motor	VAC	Hz	min <sup>*</sup>	kW	A	Pa	°C	kg	kg	kg	
*3G 800	M3G150-FF	① 200-240	50/60	860	1,40	4,8	150	-25...+60	23,0	30,5	44,5	
	M3G150-FF	② 380-480	50/60	860	1,40	2,5	150	-25...+60	23,0	30,5	44,5	

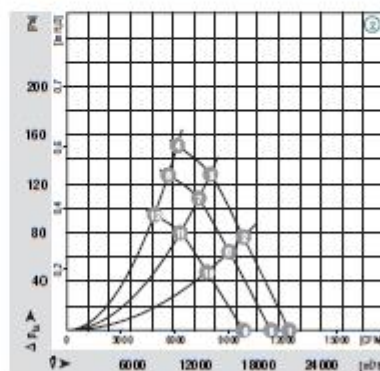
subject to alterations      <sup>®</sup>at 230 vsp, 400VAC      <sup>\*</sup>in operating point with no air flow

n [min <sup>-1</sup> ]	P <sub>1</sub> [kW]	I [A]	Lp <sub>A</sub> [dBA]	η <sub>L</sub> [%]	n [min <sup>-1</sup> ]	P <sub>1</sub> [kW]	I [A]	Lp <sub>A</sub> [dBA]	η <sub>L</sub> [%]	n [min <sup>-1</sup> ]	P <sub>1</sub> [kW]	I [A]	Lp <sub>A</sub> [dBA]	η <sub>L</sub> [%]	n [min <sup>-1</sup> ]	P <sub>1</sub> [kW]	I [A]	Lp <sub>A</sub> [dBA]	η <sub>L</sub> [%]
① 860	0,96	3,4	72	69	① 860	0,48	1,8	67	69	② 860	0,96	1,7	72	69	② 860	0,48	0,9	67	69
① 860	1,16	4,0	75	63	① 860	0,59	2,2	69	63	① 860	1,16	2,0	75	63	② 860	0,59	1,1	69	63
① 860	1,21	4,0	77	58	① 860	0,61	2,2	72	58	② 860	1,21	2,0	77	58	① 860	0,61	1,1	72	58
① 860	1,21	4,0	78	46	① 860	0,61	2,2	72	46	③ 860	1,21	2,0	78	46	② 860	0,61	1,1	72	46
① 790	0,75	2,6	70	69						③ 790	0,75	1,3	70	69					
① 790	0,91	3,2	73	63						③ 790	0,91	1,6	73	63					
① 790	0,95	3,4	76	58						④ 790	0,95	1,7	76	58					
① 790	0,95	3,4	76	46						④ 790	0,95	1,7	76	46					

Characteristics



Characteristics



## TUULITUNNELIN LASKUTOIMITUKSET

Suoran putken pituus (800mm)	$L_1$	4,49 m
Putken halkaisia	$D$	0,8 m
Suoran putken pituus (630mm)	$L_2$	1,46 m
Putken halkaisia	$d$	0,63 m
Virtausnopeus	$v_1$	11 m/s
Virtausnopeus	$v_2$	17,55 m/s
Ilman tiheys	$\rho$	1,3 kg/m <sup>3</sup>
Mutkan kertavastus kerroin	$\zeta$	0,3
Ilman viskositeetti	$\mu$	0,018 mPas
Tilavuusvirtaus 1		5,529203 m <sup>3</sup> /s 19905,13 m <sup>3</sup> /h
Tilavuusvirtaus 2		5,470766 m <sup>3</sup> /s 19694,76 m <sup>3</sup> /h
Halkaisijoiden suhde	$d/D$	0,7875
Kuristuskohdan teoreettinen virtausnopeus		17,73747 m/s
Paine-ero (suora osa 1)		0,044451 Pa
Paine-ero (suora osa 2)		0,037185 Pa
Paine-ero (suora osa yht.)		0,081636
Painehäviö mutkassa		23,595 Pa
Neljä mutkaa		94,38 Pa
Tuuliturbiinin painehäviö		51,54512 Pa
Kokonaishäviö		146,0068 Pa
Puahiltimen tuottama max paine	$p$	150 Pa

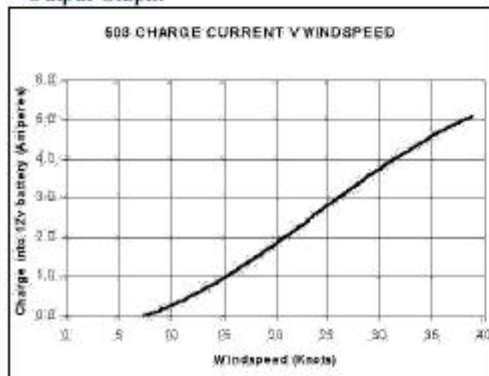
## RUTLAND 504 WINDCHARGER-TUULITURBIINI

### Features & Benefits

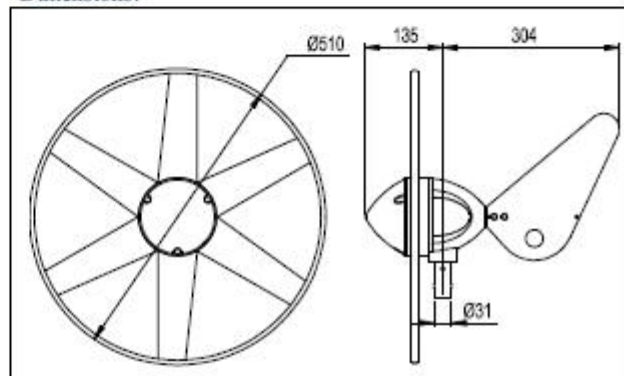
- Efficient power conversion – Rutland Windchargers generate greater ampere-hours in real wind conditions than turbines of equal and often larger diameter! That's because between gusts, our unique high inertia alternator designs maintain momentum with a flywheel effect where other units stall. This adds up to more free power generated and stored for you.
- Rutland Windchargers are the lowest cost per watt of power generated. Not only is the generator efficient but volume production for our worldwide customers and in-house manufacturing here at Marlec ensures that we deliver a consistently high quality at an affordable cost.
- Our low friction 3-phase alternator gives a smooth and silent output. The low wind speed start up means power is almost continuously produced and certainly in the most typical conditions as well as being powerful in higher winds.
- Rutland 504 turbines are made from computer designed efficient aerofoil blades whose tips are joined by an outer protective ring.
- No radiated interference. Complies with EEC Directive 89/336/EEC

### Specifications:

#### Output Graph:



#### Dimensions:



**Low wind speed start up of just 5 Knots. Generates 25W @ 19 knots, 6W @ 10 knots and up to 80W.**

**Net Weight: 3.5Kg Gross Weight: 6Kg  
Packing Specifications: 550x550x260mm  
Part No: CA-05/02 (12V)**

#### What else is needed to complete a system?

**Marine Mounting Kit** – a stainless steel mounting kit with deck bracket and guy fasteners (guys not included) is available or a mount may be constructed using a tube of 31mm internal diameter (max external diameter 37mm). Short sections of tube to affix to user's own pole are also available.

**Land Tower & Rigging Kit** – a 4m tower made of 2 sections, ground spike and rigging kit for temporary land installation. Ideal for temporary installation on motor homes and caravans. NB. There are other Rutland Windchargers designed for professional land uses, contact Marlec to discuss.

**Voltage Controller** – To avoid overcharging choose from the HRS503 Regulator, the HRSi Regulator or the HRDX Controller which has a digital display and dual charging facility and inputs for both windcharger and solar panels. See individual datasheets for more details.

**Cable** – for installations using less than a 20m run of cable we recommend 2.5mm<sup>2</sup> cable, available from Marlec.

**Batteries** – Deep cycle or leisure batteries are recommended. Gel and Absorbed Glass Matt ranges are available from Marlec.

**For expert system advice and to discuss your power requirements call our technical sales team.**

Available from:

Manufactured in the UK by:

**Marlec Eng Co Ltd**

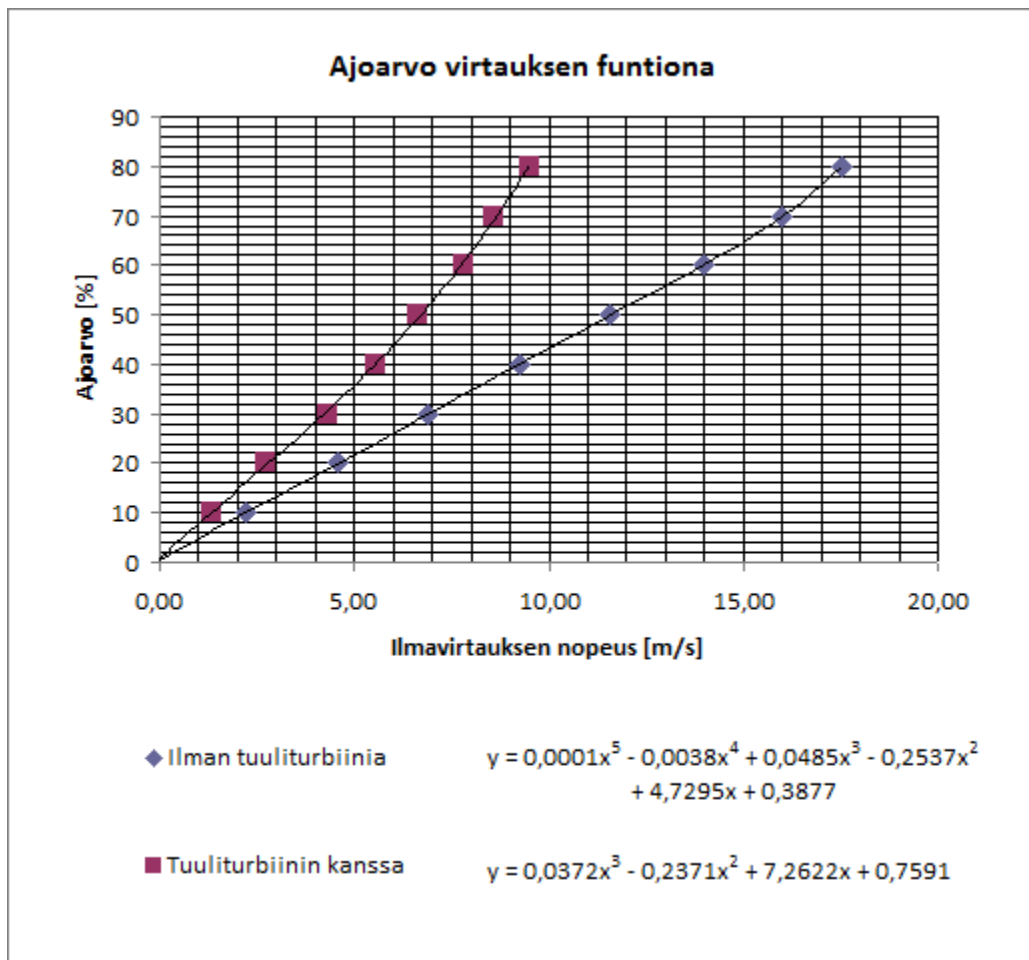
Rutland House, Trevithick Rd, Corby, NN17 5XY

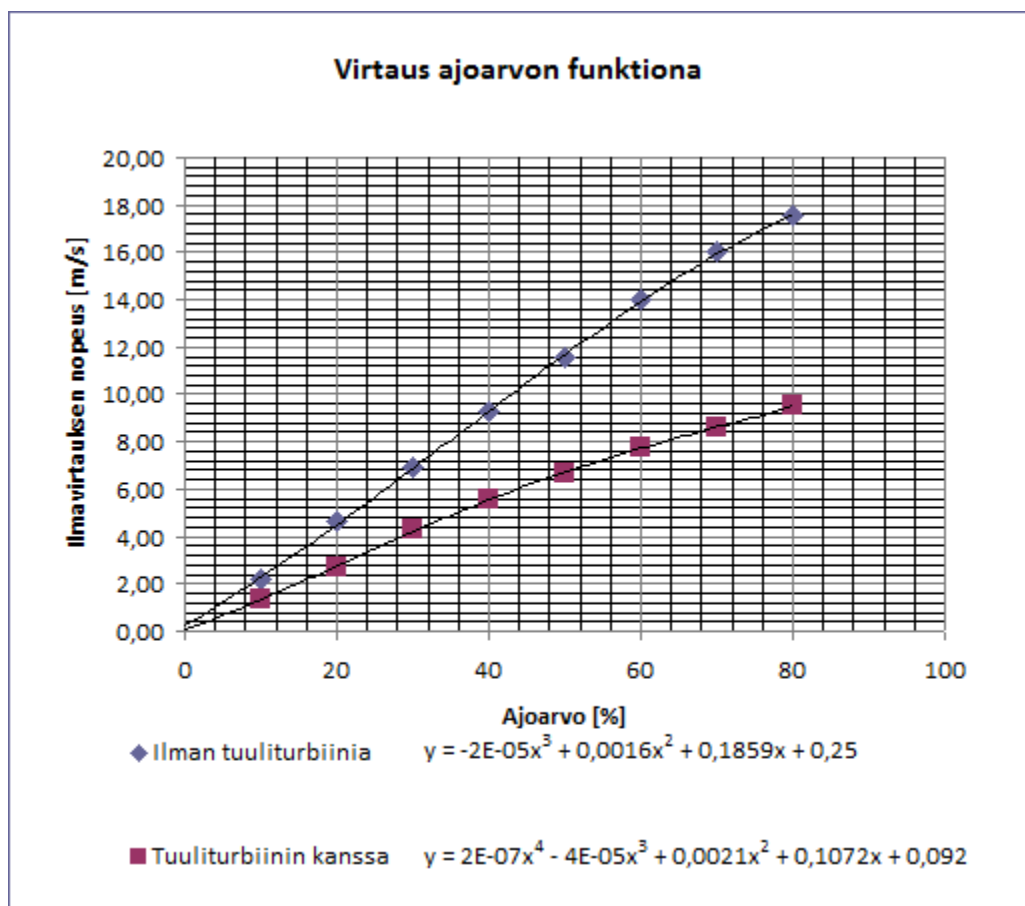
Tel: +44 (0)1536 201588 Fax: +44(0)1536 400211

sales@marlec.co.uk www.marlec.co.uk

## ILMAVIRTAUKSEN SKAALAUUS

Ajoarvo [%]	Ilmavirtausten nopeudet	
	Ilman tuuliturbiinia	Tuuliturbiinin kanssa
10	2,20	1,35
20	4,60	2,70
30	6,90	4,30
40	9,25	5,55
50	11,55	6,65
60	14,00	7,80
70	16,00	8,60
80	17,55	9,50
90	17,55	9,50
100	17,55	9,50





DAQ-LAITTEEN TEKNISET TIEDOT

# Low-Cost, Bus-Powered Multifunction DAQ for USB – 12- or 14-Bit, up to 48 kS/s, 8 Analog Inputs

## NI USB-6008, NI USB-6009

- 8 analog inputs at 12 or 14 bits, up to 48 kS/s
- 2 analog outputs at 12 bits, software-timed
- 12 TTL/CMOS digital I/O lines
- 32-bit, 5 MHz counter
- Digital triggering
- Bus-powered
- 1-year warranty

### Operating Systems

- Windows Vista (32- and 64-bit)/XP/2000
- Mac OS X<sup>†</sup>
- Linux<sup>††</sup>
- Windows Mobile<sup>†</sup>
- Windows CE<sup>†</sup>

### Recommended Software

- LabVIEW
- LabVIEW SignalExpress
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio

### Other Compatible Software

- C#, Visual Basic .NET
- ANSI C/C++

### Measurement Services Software (included)

- NI-DAQmx driver software
- Measurement & Automation Explorer configuration utility
- LabVIEW SignalExpress LE

<sup>†</sup>You need to download NI-DAQmx Base for these operating systems.



Product	Bus	Analog Inputs <sup>1</sup>	Input Resolution (bits)	Max Sampling Rate (kS/s)	Input Range (V)	Analog Outputs	Output Resolution (bits)	Output Rate (Hz)	Output Range (V)	Digital I/O Lines	32-Bit Counter	Trigger
USB-6009	USB	8 SE/4 DI	14	48	a1 to a20	2	12	150	0 to 5	12	1	Digital
USB-6008	USB	8 SE/4 DI	12	10	a1 to a20	2	12	150	0 to 5	12	1	Digital

<sup>1</sup>SE = single-ended, DI = differential. <sup>†</sup>Software-only.

## Overview and Applications

With recent bandwidth improvements and new innovations from National Instruments, USB has evolved into a core bus of choice for measurement applications. The NI USB-6008 and USB-6009 are low-cost entry points to NI flagship data acquisition (DAQ) devices. With plug-and-play USB connectivity, these modules are simple enough for quick measurements but versatile enough for more complex measurement applications.

The USB-6008 and USB-6009 are ideal for a number of applications where low cost, small form factor, and simplicity are essential.

Examples include:

- Data logging – quick and easy environmental or voltage data logging
- Academic lab use – student ownership of DAQ hardware for completely interactive lab-based courses (Academic pricing available. Visit [ni.com/academic](http://ni.com/academic) for details.)
- OEM applications as I/O for embedded systems

### Recommended Software

National Instruments measurement services software, built around NI-DAQmx driver software, includes intuitive application programming interfaces, configuration tools, I/O assistants, and other tools designed to reduce system setup, configuration, and development time. National Instruments recommends using the latest version of NI-DAQmx

driver software for application development in NI LabVIEW, LabVIEW SignalExpress, LabWindows/CVI, and Measurement Studio software.

To obtain the latest version of NI-DAQmx, visit [ni.com/support/daq/versions](http://ni.com/support/daq/versions).

NI measurement services software speeds up your development with features including:

- A guide to create fast and accurate measurements with no programming using the DAQ Assistant.
- Automatic code generation to create your application in LabVIEW.
- LabWindows/CVI; LabVIEW SignalExpress; and C#, Visual Studio .NET, ANSI C/C++, or Visual Basic using Measurement Studio.
- Multithreaded streaming technology for 1,000 times performance improvements.
- Automatic timing, triggering, and synchronization routing to make advanced applications easy.
- More than 3,000 free software downloads available at [ni.com/zone](http://ni.com/zone) to jump-start your project.
- Software configuration of all digital I/O features without hardware switches/jumpers.
- Single programming interface for analog input, analog output, digital I/O, and counters on hundreds of multifunction DAQ hardware devices. M Series devices are compatible with the following versions (or later) of NI application software – LabVIEW, LabWindows/CVI, or Measurement Studio versions 7.x; and LabVIEW SignalExpress 2.x.



## Low-Cost, Bus-Powered Multifunction DAQ for USB – 12- or 14-Bit, up to 48 kS/s, 8 Analog Inputs

### Specifications

Typical at 25 °C unless otherwise noted.

#### Analog Input

##### Absolute accuracy, single-ended

Range	Typical at 25 °C (mV)	Maximum (0 to 55 °C) (mV)
±10	14.7	138

##### Absolute accuracy at full scale, differential<sup>1</sup>

Range	Typical at 25 °C (mV)	Maximum (0 to 55 °C) (mV)
±20	14.7	138
±10	7.73	84.8
±5	4.28	58.4
±4	3.59	53.1
±2.5	2.56	45.1
±2	2.21	42.5
±1.25	1.70	39.9
±1	1.53	37.5

Number of channels ..... 8 single-ended/4 differential  
Type of ADC ..... Successive approximation

##### ADC resolution (bits)

Module	Differential	Single-Ended
USB-6008	12	11
USB-6009	14	13

##### Maximum sampling rate (system dependent)

Module	Maximum Sampling Rate (kS/s)
USB-6008	10
USB-6009	48

Input range, single-ended ..... ±10 V  
Input range, differential ..... ±20, ±10, ±5, ±4, ±2.5, ±2, ±1.25, ±1 V  
Maximum working voltage ..... ±10 V  
Overvoltage protection ..... ±35 V  
FIFO buffer size ..... 512 B  
Timing resolution ..... 41.67 ns (24 MHz timebase)  
Timing accuracy ..... 100 ppm of actual sample rate  
Input impedance ..... 144 kΩ  
Trigger source ..... Software or external digital trigger  
System noise ..... 5 mV<sub>rms</sub> (±10 V range)

#### Analog Output

Absolute accuracy (no load) ..... 7 mV typical, 36.4 mV maximum at full scale  
Number of channels ..... 2  
Type of DAC ..... Successive approximation  
DAC resolution ..... 12 bits  
Maximum update rate ..... 150 Hz, software-timed

Output range ..... 0 to +5 V  
Output impedance ..... 50 Ω  
Output current drive ..... 5 mA  
Power-on state ..... 0 V  
Slew rate ..... 1 V/μs  
Short-circuit current ..... 50 mA

#### Digital I/O

Number of channels ..... 12 total  
8 (P0.<0..7>)  
4 (P1.<0..3>)  
Direction control ..... Each channel individually programmable as input or output  
Output driver type  
USB-6008 ..... Open-drain  
USB-6009 ..... Each channel individually programmable as push-pull or open-drain  
Compatibility ..... CMOS, TTL, LVTTL  
Internal pull-up resistor ..... 4.7 kΩ to +5 V  
Power-on state ..... Input (high impedance)  
Absolute maximum voltage range ..... -0.5 to +5.8 V

#### Digital logic levels

Level	Min	Max	Units
Input low voltage	0.3	0.8	V
Input high voltage	2.0	5.8	V
Input leakage current	–	50	μA
Output low voltage (I = 3.5 mA)	–	0.8	V
Output high voltage (push-pull, I = -85 mA)	2.0	3.5	V
Output high voltage (open-drain, I = -0.6 mA, nominal)	2.0	5.0	V
Output high voltage (open-drain, I = -3.5 mA, with external pull-up resistor)	2.0	–	V

#### Counter

Number of counters ..... 1  
Resolution ..... 32 bits  
Counter measurements ..... Edge counting (falling edge)  
Pull-up resistor ..... 4.7 kΩ to 5 V  
Maximum input frequency ..... 5 MHz  
Minimum high pulse width ..... 100 ns  
Minimum low pulse width ..... 100 ns  
Input high voltage ..... 2.0 V  
Input low voltage ..... 0.8 V

#### Power available at I/O connector

+5 V output (200 mA maximum) ..... +5 V typical  
+4.85 V minimum  
+2.5 V output (1 mA maximum) ..... +2.5 V typical  
+2.5 V output accuracy ..... 0.25% max  
Voltage reference temperature drift... 50 ppm/°C max

<sup>1</sup> Input voltages may not exceed the working voltage range.

OPERAATIOVAHVISTIMEN TEKNISET TIEDOT



LM124  
LM224 - LM324

LOW POWER QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS

- WIDE GAIN BANDWIDTH : 1.3MHz
- INPUT COMMON-MODE VOLTAGE RANGE INCLUDES GROUND
- LARGE VOLTAGE GAIN : 100dB
- VERY LOW SUPPLY CURRENT/AMPLI : 375µA
- LOW INPUT BIAS CURRENT : 20nA
- LOW INPUT OFF SET VOLTAGE : 5mV max. (for more accurate applications, use the equivalent parts LM124A-LM224A-LM324A which feature 3mV max.)
- LOW INPUT OFF SET CURRENT : 2nA
- WIDE POWER SUPPLY RANGE : SINGLE SUPPLY : +3V TO +30V DUAL SUPPLIES : ±1.5V TO ±15V

DESCRIPTION

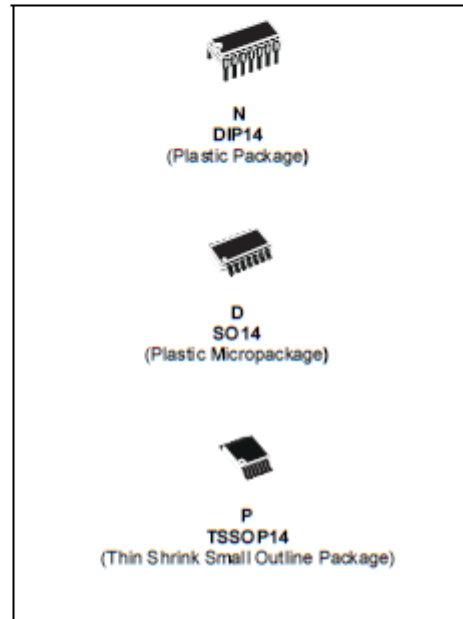
These circuits consist of four independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers. They operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

ORDER CODE

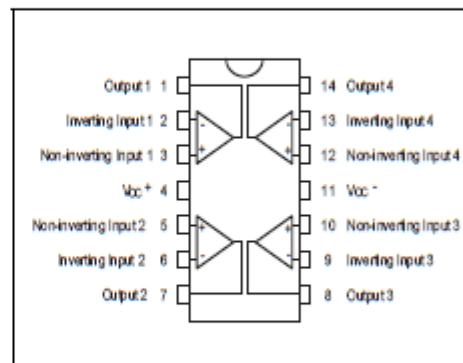
Part Number	Temperature Range	Package		
		N	D	P
LM124	-55°C, +125°C	•	•	•
LM224	-40°C, +105°C	•	•	•
LM324	0°C, +70°C	•	•	•

Example : LM224N

N = Dual In Line Package (DIP)  
D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)  
P = Thin Shrink Small Outline Package (TSSOP) - only available in Tape & Reel (PT)



PIN CONNECTIONS (top view)





## LM124-LM224-LM324

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

 $V_{CC}^+ = +5V$ ,  $V_{CC}^- = \text{Ground}$ ,  $V_o = 1.4V$ ,  $T_{amb} = +25^\circ C$  (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{io}$	Input Offset Voltage - note <sup>1)</sup> $T_{amb} = +25^\circ C$ LM324		2	5 7	mV
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ LM324			7 9	
$I_{io}$	Input Offset Current $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		2	30 100	nA
$I_b$	Input Bias Current - note <sup>2)</sup> $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		20	150 300	nA
$A_{vd}$	Large Signal Voltage Gain $V_{CC}^+ = +15V$ , $R_L = 2k\Omega$ , $V_o = 1.4V$ to $11.4V$ $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	50 25	100		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ( $R_s \leq 10k\Omega$ ) $V_{CC}^+ = 5V$ to $30V$ $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	65 65	110		dB
$I_{CC}$	Supply Current, all Amp, no load $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ $V_{CC} = +5V$ $V_{CC} = +30V$ $V_{CC} = +5V$ $V_{CC} = +30V$		0.7 1.5 0.8 1.5	1.2 3 1.2 3	mA
$V_{cm}$	Input Common Mode Voltage Range $V_{CC} = +30V$ - note <sup>3)</sup> $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	0 0		$V_{CC} - 1.5$ $V_{CC} - 2$	V
CMR	Common Mode Rejection Ratio ( $R_s \leq 10k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	70 60	80		dB
$I_{source}$	Output Current Source ( $V_{id} = +1V$ ) $V_{CC} = +15V$ , $V_o = +2V$	20	40	70	mA
$I_{sink}$	Output Sink Current ( $V_{id} = -1V$ ) $V_{CC} = +15V$ , $V_o = +2V$ $V_{CC} = +15V$ , $V_o = +0.2V$	10	20		mA
		12	50		$\mu A$
$V_{OH}$	High Level Output Voltage $V_{CC} = +30V$ $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ $V_{CC} = +5V$ , $R_L = 2k\Omega$ $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	$R_L = 2k\Omega$	26 26	27	V
		$R_L = 10k\Omega$	27 27	28	
		3.5 3			

## LM124-LM224-LM324

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{OL}$	Low Level Output Voltage ( $R_L = 10k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		5	20 20	mV
SR	Slew Rate $V_{CC} = 15V, V_I = 0.5$ to $3V, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$ , unity Gain		0.4		V/ $\mu s$
GBP	Gain Bandwidth Product $V_{CC} = 30V, f = 100kHz, V_{in} = 10mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$		1.3		MHz
THD	Total Harmonic Distortion $f = 1kHz, A_v = 20dB, R_L = 2k\Omega, V_o = 2V_{pp}, C_L = 100pF, V_{CC} = 30V$		0.015		%
$e_n$	Equivalent Input Noise Voltage $f = 1kHz, R_s = 100\Omega, V_{CC} = 30V$		40		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
$DV_{io}$	Input Offset Voltage Drift		7	30	$\mu V/^\circ C$
$DI_{io}$	Input Offset Current Drift		10	200	pA/ $^\circ C$
$V_{o1}/V_{o2}$	Channel Separation - note 4) $1kHz \leq f \leq 20kHz$		120		dB

1.  $V_o = 1.4V, R_s = 0\Omega, 5V < V_{CC} < 30V, 0 < V_{ic} < V_{CC} - 1.5V$

2. The direction of the input current is out of the IC. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.

3. The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3V. The upper end of the common-mode voltage range is  $V_{CC} - 1.5V$ , but either or both inputs can go to +32V without damage.

4. Due to the proximity of external components insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of capacitance increases at higher frequencies.

JÄNNITELÄHTEEN TEKNISET TIEDOT

CLICK HERE TO REQUEST PRICE | DELIVERY | SAMPLE | SUPPORT

**POWERGATE LLC**

Global Power Solutions

Mean Well

**DR-45 Series**

45 Watt DIN Rail Mount power Supplies

Size: 3.86 x 3.07 x 2.64"



- Features :
  - Universal AC input/Full range
  - Protections: Short circuit / Overload / Over voltage / Over temperature
  - Cooling by free air convection
  - Can be installed on DIN rail TS-35/7.5 or 15
  - UL 508(industrial control equipment)approved
  - LED indicator for power on
  - 100% full load burn-in test
  - Fix switching frequency at 100KHz
  - 3 years warranty



**SPECIFICATION**

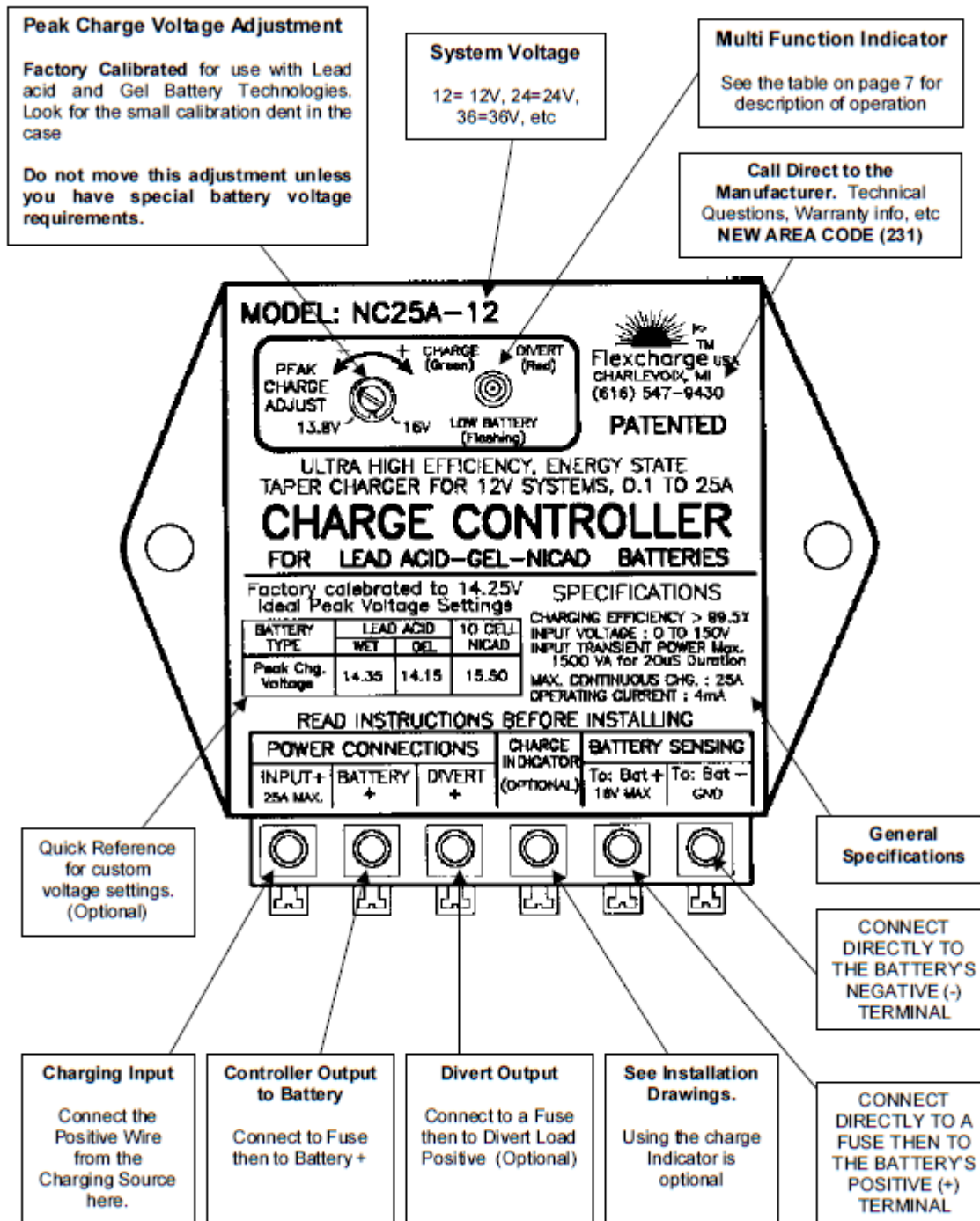
MODEL		DR-4505	DR-4512	DR-4515	DR-4524
OUTPUT	DC VOLTAGE	5V	12V	15V	24V
	RATED CURRENT	5A	3.5A	2.8A	2A
	CURRENT RANGE	0 ~ 5A	0 ~ 3.5A	0 ~ 2.8A	0 ~ 2A
	RATED POWER	25W	42W	42W	48W
	RIPPLE & NOISE (max.) <small>Notes 2</small>	100mVp-p	200mVp-p	240mVp-p	480mVp-p
	VOLTAGE ADJ. RANGE	4.75 ~ 5.5V	10.8 ~ 13.2V	13.5 ~ 16.5V	21.6 ~ 26.4V
	VOLTAGE TOLERANCE <small>Notes 3</small>	±2.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%
	LINE REGULATION	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%
	LOAD REGULATION	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%
	SETUP, RISE TIME	800ms, 60ms/230VAC at full load			
HOLD UP TIME (Typ.)	100ms/230VAC at full load				
INPUT	VOLTAGE RANGE	85 ~ 264VAC 120 ~ 370VDC			
	FREQUENCY RANGE	47 ~ 63Hz			
	EFFICIENCY (Typ.)	72%	77%	77%	80%
	AC CURRENT (Typ.)	1.5A/115VAC 0.75A/230VAC			
	INRUSH CURRENT (Typ.)	COLD START 28A/115VAC 96A/230VAC			
	LEAKAGE CURRENT	<1mA/ 240VAC			
PROTECTION	OVERLOAD	105 ~ 190% rated output power Protection type : Constant current limiting, recovers automatically after fault condition is removed			
	OVER VOLTAGE	5.75 ~ 6.75V	13.8 ~ 16.2V	17.25 ~ 20.25V	27.6 ~ 32.4V
	OVER TEMPERATURE	Protection type : Shut down o/p voltage, re-power on to recover <small>Tj 135°C typically (U1) detect on heat sink of power transistor</small>			
ENVIRONMENT	WORKING TEMP.	-10 ~ +60°C (Refer to output load derating curve)			
	WORKING HUMIDITY	20 ~ 90% RH non-condensing			
	STORAGE TEMP., HUMIDITY	-20 ~ +85°C, 10 ~ 95% RH			
	TEMP. COEFFICIENT	±0.03%/°C (0 ~ 50°C)			
	VIBRATION	10 ~ 500Hz, 2G 10min./cycle, period for 60min. each along X, Y, Z axis; Mounting: Compliance to IEC60068-2-6			
SAFETY & EMC <small>(Notes 4)</small>	SAFETY STANDARDS	UL508, TUV EN60950-1 approved			
	WITHSTAND VOLTAGE	I/P-O/P:3KVAC I/P-FG:1.5KVAC O/P-FG:0.5KVAC			
	ISOLATION RESISTANCE	I/P-O/P, I/P-FG, O/P-FG:100M Ohms/500VDC			
	EMI CONDUCTION & RADIATION	Compliance to EN55011, EN55022 (CISPR22) Class B			
	HARMONIC CURRENT	Compliance to EN61000-3-2, -3			
OTHERS	EMSI MMUNITY	Compliance to EN61000-4-2, 3, 4, 5, 6, 8, 11, EN61024, EN61024, EN61000-6-2 (EN60083-2), heavy industry level, criteria A			
	MTBF	364.6K hrs/min. MIL-HDBK-217F (25°C)			
	DIMENSION	93*78*37mm(L*W*H)			
	PACKING	0.31Kg 48pcs/16.1Kg/1.3CUFT			
NOTE	1. All parameters NOT specially mentioned are measured at 230VAC input, rated load and 25°C of ambient temperature. 2. Ripple & noise are measured at 20MHz of bandwidth by using a 12" twisted pair-wire terminated with a 0.1uF & 47uF parallel capacitor. 3. Tolerance : includes set up tolerance, line regulation and load regulation. 4. The power supply is considered a component which will be installed into a final equipment. The final equipment must be re-confirmed that it still meets EMC directives.				

File Name: DR-45-SPEC 2008-04-07

specifications are subject to change without notice

**(866) 588-1750**  
[www.powergatellc.com](http://www.powergatellc.com)  
[sales@powergatellc.com](mailto:sales@powergatellc.com)

LATAUSSÄÄDIN



## Operating Characteristics

<b>Flexcharge NC25A-12 (24,36,48)</b>	<b>Min.</b>	<b>Max.</b>
Charge Input Voltage	0Vdc	140Vdc
Allowable Battery Voltage on Sense Wires 12V Systems <i>(Multiply by 2, 3, or 4 for 24V, 36V, or 48V Systems)</i>	0Vdc	16Vdc
Standby/Operating Current of the Controller	2mA	7mA
Charging Amperes	0.005A	25A
Short Term Over-Current (1/2 Second Maximum)	-	50A
Total Charging Efficiency	98.9%	99.8%
Insertion Loss Resistance (Ohms)	0.001Ω	0.004Ω
Charge Divert Current	0A	25A
Charge Divert Over Current (1/2 Second)	-	50A
Transient Surge Protection (20uS)		1500VA
Operating Temperature	-40°C	+60°C
Storage Temperature	-55°C	+60°C
Case Dimensions	4"W x 3.75"H x 1.5" D	

### HOOKUP WIRE SIZE CHART

This chart provides the minimum wire size to minimize power loss. Larger wires would be always better for operating efficiency

<b>Max Charging Capacity</b>	<b>WIRE SIZE FOR 1 TO 10FT LENGTHS</b>	<b>WIRE SIZE FOR 10 TO 20FT LENGTHS</b>
0A TO 3A	#14 AWG	#12 AWG
3A TO 6A	#12 AWG	#12 AWG
6A TO 12A	#10 AWG	#10 AWG
12A TO 18A	#10 AWG	#8 AWG
18A TO 25A	#8 AWG	#8 AWG

### Diode Selection Table

<b>Ampere Rating</b>	<b>Voltage Rating</b>	<b>Part Number</b>	<b>Type</b>	<b>Manufacturer</b>
1A	40V	1N5819	Schottky	Diodes Incorporated
3A	40V	1N5822	Schottky	International Rectifier
5A	100V	50SQ100	Schottky	International Rectifier
8A	45V	80SQ045	Schottky	International Rectifier
1A	400V	1N4004	Silicon	Diodes Incorporated
3A	400V	1N5404	Silicon	Diodes Incorporated
6A	1000V	6A10	Silicon	Diodes Incorporated

If you cannot find these parts locally, call Flexcharge USA. All the above diodes are in stock.

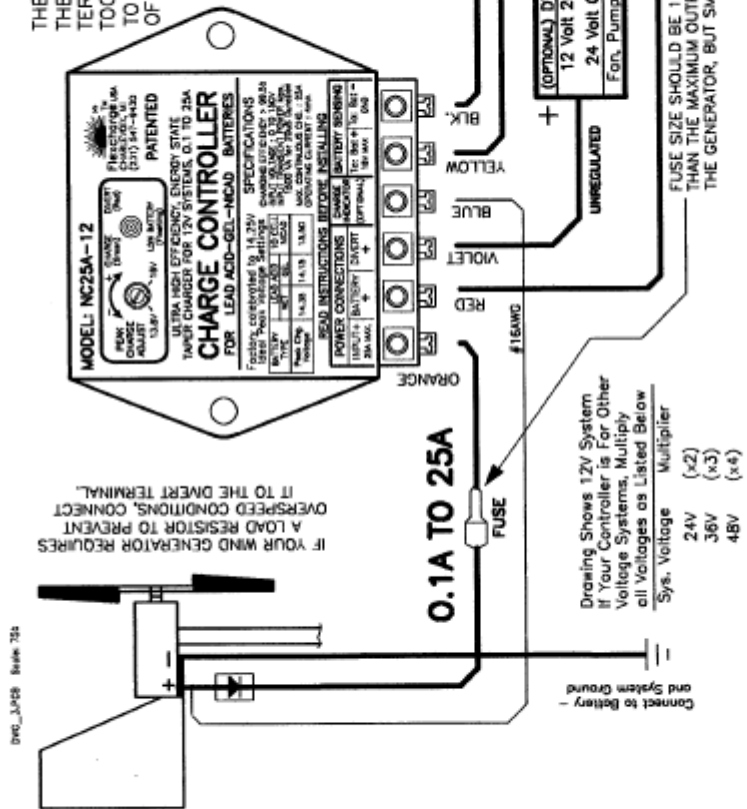
# WIND CHARGING SYSTEM WITH ONE BATTERY BANK

## CAUTION STATEMENTS:

THE CONTROLLER WILL BE DAMAGED IF, WHILE CHARGING, THE POSITIVE SENSE WIRE, AND THE WIRE FROM THE BAT + TERMINAL ON THE CONTROLLER ARE CONNECTED TOGETHER, BUT REMOVED FROM THE BATTERY TERMINAL. TO PREVENT DAMAGE TO THE CONTROLLER, REMOVE ONE OF THE FUSES WHEN PERFORMING BATTERY MAINTENANCE

Do NOT charge a second battery bank with the Divert Output. It could be damaged by over or under charging

VOLTAGE SENSING WIRES MUST CONNECT DIRECTLY TO THE BATTERIES TERMINALS. ANY EXTENSIONS TO THIS WIRE MUST BE MADE WITH #14AWG WIRE OR LARGER.



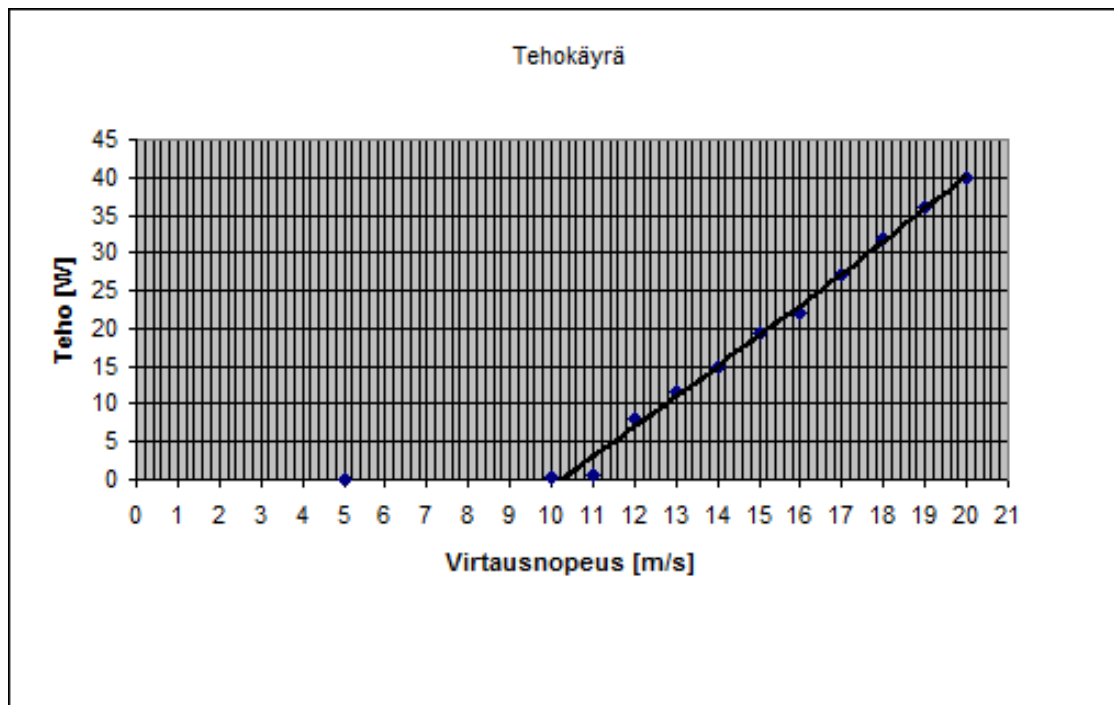
## CHARGE INDICATOR OPTION

AN ISOLATION DIODE SHOULD BE INSTALLED IN THE GENERATORS POSITIVE WIRE TO PREVENT FLOW OF ELECTRICITY FROM THE BATTERY BACK INTO THE GENERATOR. SIMPLY CONNECT THE CHARGE INDICATOR WIRE TO THE ANODE SIDE OF THE BLOCKING DIODE (WIND GENERATOR SIDE). SOME GENERATORS INSTALL THE DIODES IN THE HOUSING. YOU WILL NOT BE ABLE TO USE THE CHARGE INDICATOR WITH THESE TYPES OF GENERATORS.

## TEHOKÄYRÄ

Virtausnopeus [m/s]		Teho [W]	
Puhaltimen ohjaus	5	0,01	
	10	0,32	
	11	0,7	
	50 %	12	8
	13	11,5	
	14	15	
	15	19,5	
	16	22	
	17	27	
	18	32	
	75 %	19	36
	20	40	

Tehon mittaamiseen on käytetty Rutland 504-tuuliturbiinin kanssa 55 wattista 12 V:n jännitteellä toimivaa halogeenipolttimea vastuksena. Ilmavirtauksen nopeuden arvot ovat "luonnon tuulen" arvoja.

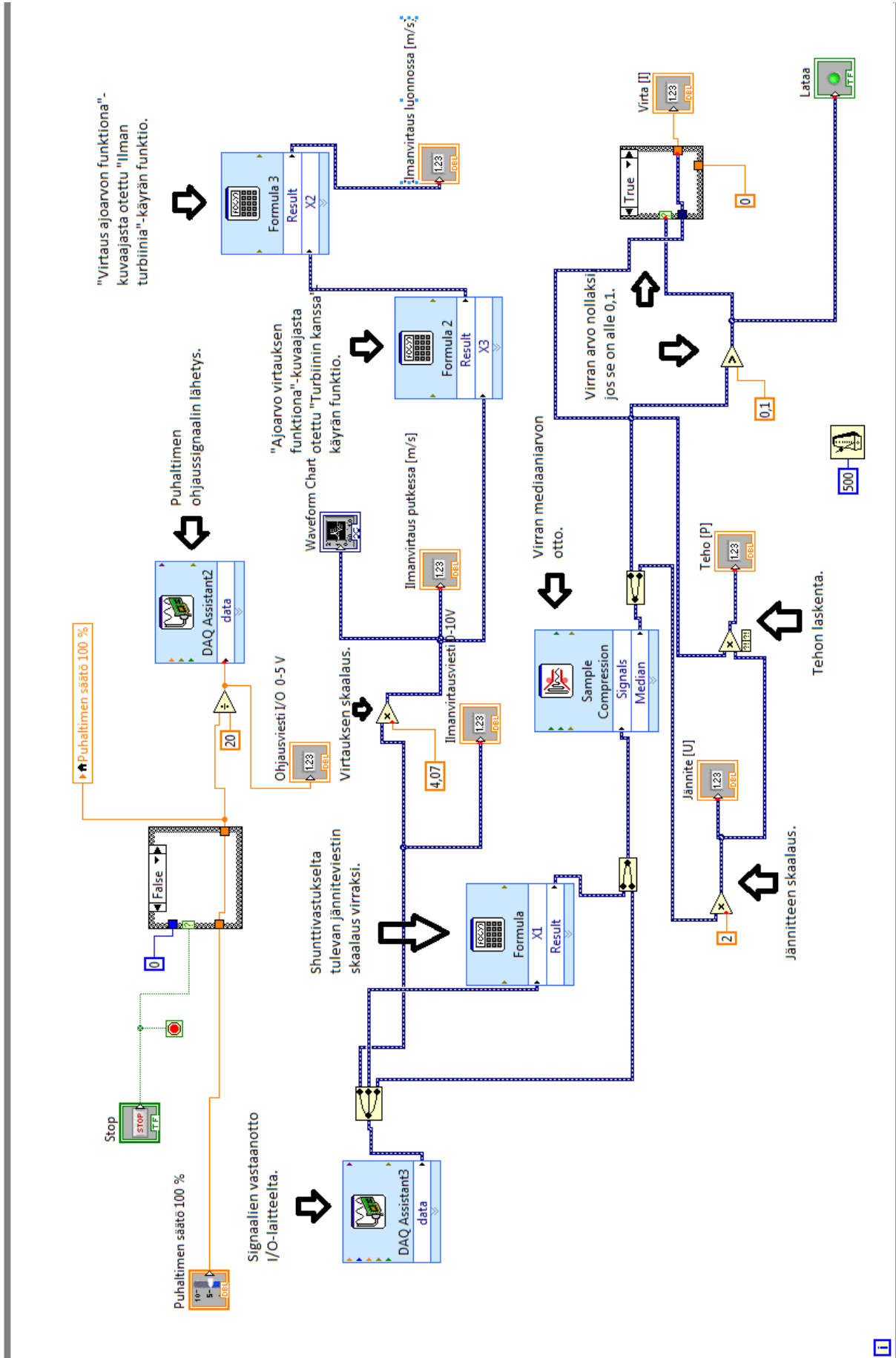


## MITTAUS- JA OHJAUSOHJELMAN ETUPANEELI





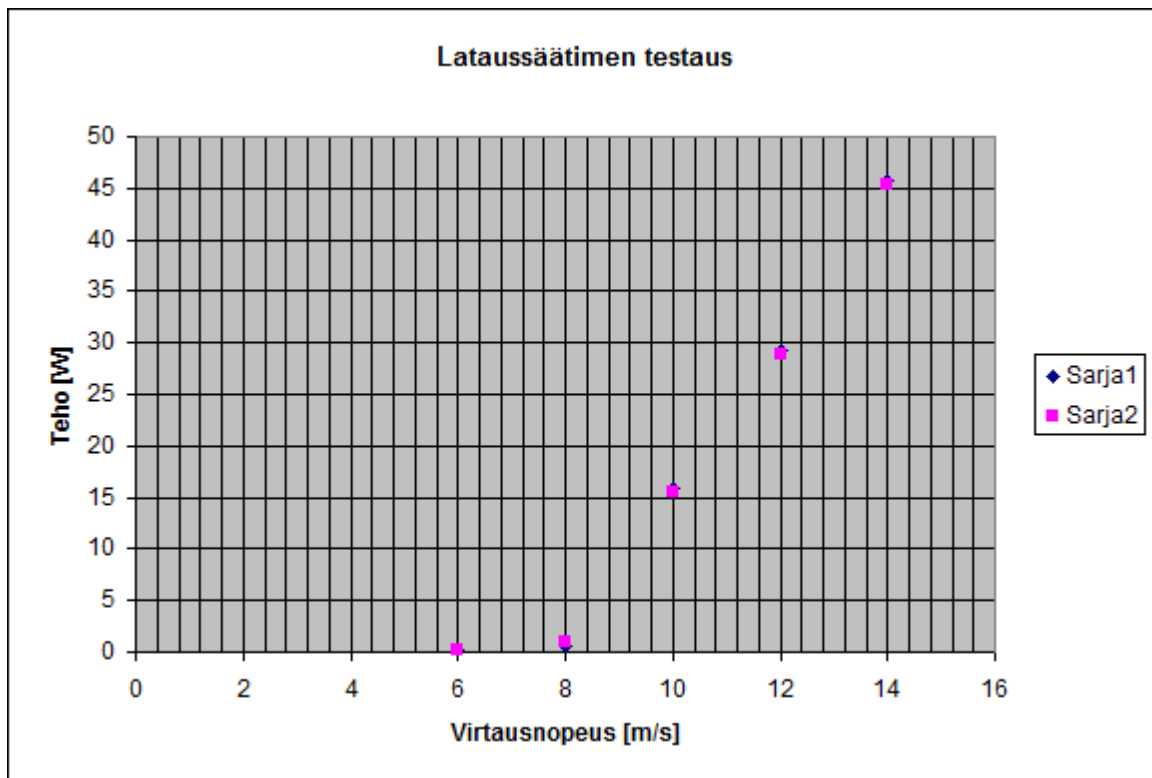
MITTAUS- JA OHJAUSOHJELMAN LOHKOKAAVIOKUVA



## LATAUSSÄÄTIMEN TESTAUS

Ilman lataussäädintä			
v [m/s]	I [A]	U [V]	P [W]
6	0,44	0,27	0,1188
8	1	0,62	0,62
10	3	5,3	15,9
12	3,8	7,7	29,26
14	4,4	10,4	45,76

Lataussäätimen kanssa			
v [m/s]	I [A]	U [V]	P [W]
6	0,48	0,31	0,1488
8	1,2	0,85	1,02
10	3	5,2	15,6
12	3,7	7,8	28,86
14	4,4	10,3	45,32





---

[www.savonia.fi](http://www.savonia.fi)

