

TUULIVOIMALOIDEN AERODYNAAMINEN MELU

Seppo Uosukainen

VTT

PL 1000, 02044 VTT

etunimi.sukunimi@vtt.fi

1 JOHDANTO

Tässä paperissa esitetään tuulivoimaloiden aerodynaamisen melun syntymekanismeja ja erityisesti tarkastellaan häiritsevyyteen liittyvää melun amplitudimodulaatiota. Amplitudimodulaatio on tuulivoimaloiden aerodynaamisen melun häiritsevyyden tärkeimpiä fysikaalisia selittäjiä ja sen erityisen häiritsevien ominaisuuksien pääasiallinen syy [1].

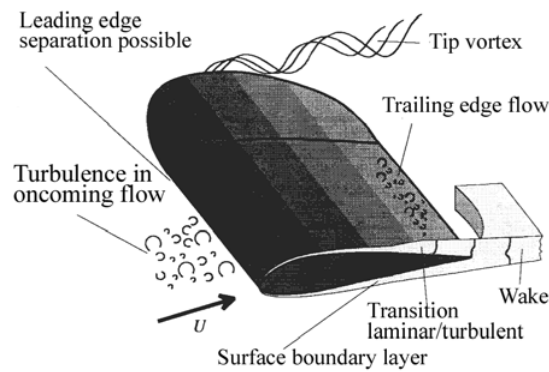
2 AERODYNAAMISEN MELUN SYNTYMEKANISMIT

Merkittävin tuulivoimaloiden melulähde sekä melun voimakkuuden että häiritsevyyden kannalta on turbiinien roottorilavat, jotka tuottavat pääosin aerodynaamista melua. Muita melulähteitä ovat sähköntuotantokoneiston yksittäiset osat, kuten vaihteisto, generaattori, muuntajat, jäähdytysjärjestelmät ja taajuusmuuttaja, jotka tuottavat pääosin mekaanista melua [2, 3, 4]. Laitevalmistajat ovat kyenneet vaimentamaan nykytekniikalla rakennettujen tuulivoimaloiden mekaanisen melun selvästi aerodynaamista pienemmäksi. Mekaanisen melun suhteellinen osuus saattaa vielä vähetä turbiinikokojen kasvaessa, koska aerodynaaminen melu kasvaa turbiinin dimensioiden myötä voimakkaammin kuin mekaaninen melu [2, 3].

2.1 Laajakaistainen aerodynaaminen melu

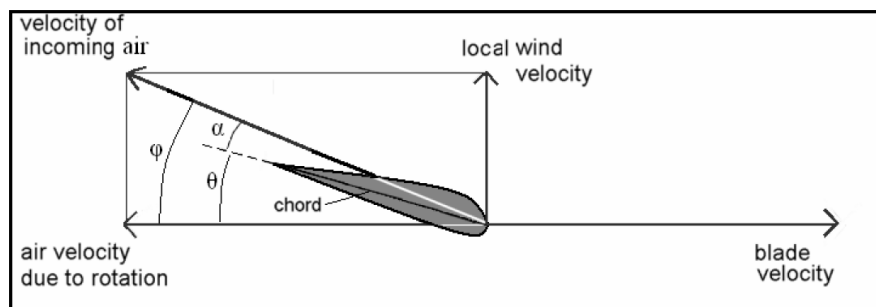
Roottoreiden tuottama melu koostuu virtauksen turbulenssin aiheuttamasta neljästä pääkomponentista: jättöreunaääni, tylpän jättöreunan ääni, kärkipyörreääni ja tulovirtauksen turbulenssin aiheuttama ääni. Jättöreunaääni on merkittävin melukomponentti [5, 6]. Turbulenssi aiheuttaa laajakaistaista aerodynaamista melua taajuusalueella 60 – 4 000 Hz [7, 4].

Kun roottorilapa pyörii, ilmavirtaus osuu lavan profiilin kohtauspinnalle ja jatkaa matkaansa lavan yli jättöreunalle, jossa se irtoaa (kuva 1). Virtauksen alkupää lavan pinnalla on laminaarinen, mutta virtauksen edetessä kohti jättöreunaa sen turbulentsisuus kasvaa lavan pinnan lähellä niin kutsutussa rajakerroksessa. Lavan eri puolilta tulevat turbulentsiset virtaukset kohtaavat jättöreunalla synnyttäen pyörteisen virtausvanan [4]. Turbulenssi rajakerroksessa synnyttää ääntä, erityisesti kun se on vuorovaikutuksessa jättöreunan kanssa [6]. Turbulentsisuuden kasvu lavan yli on sitä suurempaa, mitä suurempi on lavan profiilin muutos. Turbulenssi kasvaa, kun lavan kärkinopeus kasvaa jättöreunaäänien tason ollessa verrannollinen suureeseen $50 \cdot \log_{10}(M)$, missä M on lapaan kohdistuvan ilman Machin luku [5]. Moderneissa lapa-profiileissa lavan pinta-ala kapenee kärjessä, jolloin suurin osa melusta ei synnykään lavan kärjessä vaan alueella, joka sijaitsee lavassa kohdassa 0.75 – 0.95 tyvestä mitattuna [7, 4]. Lapapinnan rosoisuus (likaisuus, jää) lisää äänensäteilyä erityisesti pienillä taajuuksilla. Tylpää jättöreuna aiheuttaa selvän kapeakaistaisen maksimin spektriin noin 1 kHz:n kohdalle tai sen yläpuolelle [8]. Lavan kärjessä ilmavirtaukset kohtaavat kolmesta eri suunnasta aiheuttaen ns. kärkipyörteen (*tip vortex*), joka tuottaa ääntä [6, 4], erityisesti jos pyörre on vuorovaikutuksessa jättöreunan kanssa [9].



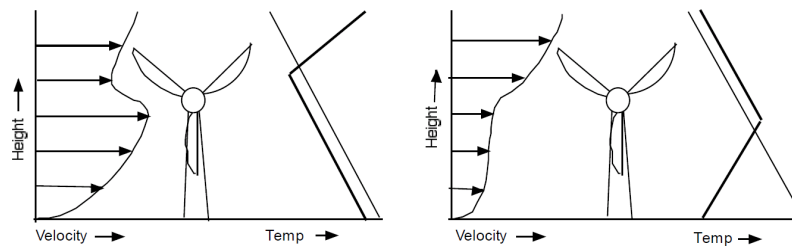
Kuva 1: Virtaukset lapaprofilissa [10].

Lavan kohtauskulmalla (kohtaavan ilmvirran ja lavan jänteen välinen kulma, kuva 2) on tärkeä merkitys sekä tuuliturbiinin toimintaan että laajakaistaisen melun syntyyn [5, 11]. Turbiinin lavan yli kulkeva ilmavirta generoi noston. Kantopinta toimii parhaiten, kun noste on maksimissaan ja vastus minimissään. Kumpikin niistä määräytyy kohtauskulmasta. Kohtauskulman optimiarvo on tavallisesti välillä $0 - 4^\circ$ riippuen lapaprofilista. Kun kohtauskulma kasvaa optimiarvostaan, turbulentsin rajakerroksen paksuus lavan pienipainepuolella kasvaa vähentäen tehokkuutta ja lisäten äänen syntyä [5].



Kuva 2: Kulmassa φ turbiinilapaa lähestyvä virtaus; lavan nousukulma θ , kohtauskulma $\alpha = \varphi - \theta$ [5].

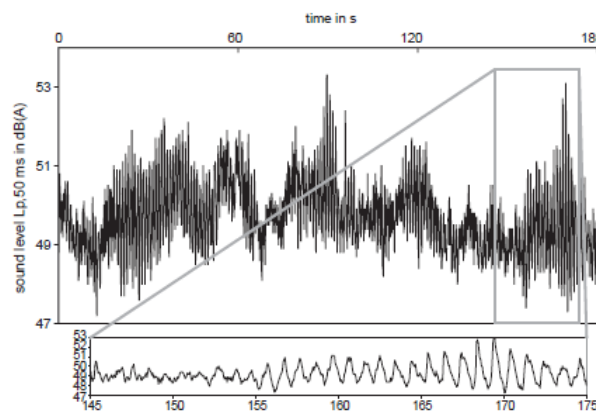
Stabiilissa ilmkehässä, joka vallitsee pääosin ilta- ja yöaikaan, aurinko ei lämmitä maanpintaa ja lämmön takia syntyvää ilman liikettä vertikaalisuunnassa ei esiinny. Koska ilmakerrokset eivät tällöin sekoitu, lapakorkeuksilla voi esiintyä voimakkaasti muuttuva tuuliprofiili (kuva 3). Tämä johtaa tilanteeseen, missä tuuli on heikko lähellä maanpintaa ja ylempänä voimakas. Voimakas tuuliprofiili aiheuttaa, että tuuliturbiinien tuottamat äänitasot voivat olla yöaikaan paljon odotettua korkeammat, jos niitä arvioidaan esimerkiksi 10 m korkeudella mitatusta tuulen nopeudesta ja mittaus on kalibroitu neutraalissa ilmkehässä. Näin voi käydä erityisesti modernien (korkeiden) tuulivoimaloiden yhteydessä. Jopa 15 dB poikkeamia odotetusta on havaittu 400 m etäisyydellä tuulipuistosta tyyninä öinä [5]. Myös lämpimän ilman nousemisen tuottamien turbulenssien aiheuttaman sironnan puuttuminen stabiilissa ilmkehässä aiheuttaa turbiinimelun etenemisvaimennuksen vähentymistä yöaikaan [12]. Voimakas tuuliprofiili stabiilissa ilmkehässä ja lämpötilainversio erittäin stabiilissa ilmkehässä aiheuttavat myös äänen taittumista alaspäin vähentäen näin etenemisvaimennusta (edellinen alavirtasuuntaan). Näistä seikoista johtuen tuulivoimaloiden melumittausten tulisi sisältää myös yöaikaisia tuloksia [5].



Kuva 3: Neutraali ilmakehä maanpinnan lähellä (vasen); stabiili ilmakehä maanpinnan lähellä (oikea) [11].

2.2 Aerodynaamisen melun amplitudimodulaatio

Kuvassa 4 on esitetty mitattu A-äänitaso erään tuulivoimalaitoksen läheltä. Hidas tasovaihtelu liittyy tuulen nopeuden ja ilmakehän muutoksiin. Noin 1 Hz:n amplitudimodulaatio äänessä johtuu roottorilapojen tuottaman aerodynaamisen melun jättöreunaäänien amplitudimodulaatiosta. Modulaatiosyvyyden vaihtelu johtuu useiden turbiinien roottoriäänien keskinäisten vaiheiden muutoksista, koska roottorit eivät pyöri täsmälleen samoilla nopeuksilla. [13, 5]



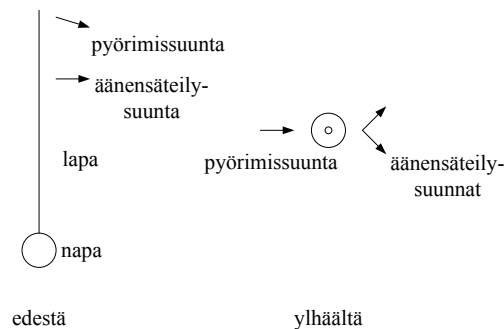
Kuva 4: Erään tuulivoimalaitoksen tuottama A-äänitaso 750 m etäisyydellä lähimmästä turbiinista 3 min ajalta mitattuna; osa äänitasovaihtelusta on zoomattu kuvan alapuolelle [13].

Amplitudimodulaatio esiintyy yleisimmin 500 Hz:n, 1 kHz:n ja 2 kHz:n oktaavikaistoilla modulaatiosyvyyden ollessa noin $\pm 2 - 3$ dB [14, 15]. Modulaatiotaajuus on sama kuin lapataajuus eli lapojen lukumäärä kertaa kierrosnopeutta vastaava taajuus, tyypillisesti noin 1 Hz.

Amplitudimodulaation syntymekanismia ei ole täysin yksiselitteisesti selvitetty [3]. Bowdler [15] on antanut modulaation synnylle ilmeisimmän selityksen, jonka mukaan amplitudimodulaation synnyssä vaikuttaa kaksi eri mekanismia: ”swishing”, joka on peräisin voimakkaasti ääntä suuntaavien roottoreiden pyörimisliikkeestä, ja ”thumping”, joka aiheutuu lapojen liikkeestä epätasaisesti jakautuneiden virtausten läpi. Jälkimmäiseen mekanismiin perustuva amplitudimodulaatio on tuulivoimalamelun pääasiallinen häiritsevyyden aiheuttaja.

Lapa suuntaa säteilemäänsä ääntä lavan akseliin nähden kohtisuoraan tasoon. Pääsäteilysuunnat tässä tasossa ovat eteenpäin lavan kärjen liikkeeseen nähden noin $\pm 45^\circ$ kulmiin (kuva 5). Nämä suunnat vaihtuvat lapojen pyöriessä aiheuttaen swishing-tyyppisen amplitudimodulaation. Modulaatio on helpoimmin havaittavissa pääsäteilysuunnissa kaukokentässä erityisesti alavirran puolella [15, 8, 16]. Doppler-ilmiö vaikuttaa swishing-ilmiöön [17]. Swishing-

tyyppinen modulaatio on funktio vain geometriasta (havaintsija – turbiini) eikä pyörivän lavan tuottaman äänitason vaihtelusta [15].



Kuva 5: Äänensäteilysuunnat swishing-ilmiössä.

Kuten edellä esitettiin, stabiilissa ilmakehässä voi esiintyä voimakas tuuliprofilin muutos lapakorkeuksilla. Koska lavan synnyttämä melu kasvaa, kun virtausnopeus kasvaa, ja koska virtausnopeus kasvaa korkeuden funktiona stabiilissa ilmakehässä, lapa tuottaa enemmän ääntä ylä- kuin ala-asennossa ollessaan aiheuttaen thumping-ilmiön. Kohtauskulma muuttuu koko ajan tämän kaltaisessa tilanteessa vahvistaen äänen amplitudivaihtelua. Thumping-tyyppisen amplitudimodulaation perustuminen tähän ilmiöön saa lisäksi tukea siitä, että modulaatio ilmenee voimakkaimmin yöaikaan, jolloin stabiili ilmakehä maanpinnan läheisyydessä on todennäköisempää [11]. Epätasaiset virtaukset, jotka aiheuttavat thumping-ilmiön, voivat olla peräisin, paitsi edellä esitetystä tuuliprofilista, myös meteorologisesta, topografiaperäisestä tai muiden turbiinien aiheuttamasta turbulenssista [18, 15]. Thumping-ilmiö on helpoiten havaittavissa kaukana turbiinista, lähellä turbiinia sitä ei normaalisti havaita [5].

2.3 Pientaajuinen ääni ja infraääni

Tuulivoimalat säteilevät pientaajuista ääntä ja infraääntä, kun roottorilapa kohtaa paikallisia muutoksia tornin ohittavassa virtauksessa, tai kun ilma puristuu periodisesti lavan ja tornin väliin. Ääntä syntyy lapataajuudella ja sen kerrannaisilla korkeampien harmonisten ulottuessa kuuloalueelle. Tämä on pääasiassa vanhojen alavirtakoneiden ongelma. [19, 5]

3 MELUNTORJUNTATOIMENPITEITÄ

Uusissa tuulivoimaloissa siirtyminen ylävirtakoneiden käyttöön on vähentänyt joitakin melukomponentteja, erityisesti pientaajuista ääntä ja infraääntä. Kärkinopeuden rajoittaminen ja lapakulman säätö kohtauskulman optimoimiseksi ovat eräitä meluntorjuntakeinoja [4, 19, 11]. Käyttämällä siivekkeitä lapojen kärjissä ääntä synnyttävä karkipyörre voidaan eliminoida [4]. Roottorilapojen aerodynaaminen optimointi erityisesti jättöreunan osalta (uritettu/terävä) vähentää melua [9]. Pituusakselin suhteen kierrettyjä lapoja ja tuloreunan karkeuden vaikutuksen vähentämistä on käytetty [20]. Uusista innovatiivisista lähestymistavoista on esimerkkinä lavan tuloreunan uritus, jossa on otettu esimerkkiä ryhävalaan evästä [21].

Swishing-tyyppisen amplitudimodulaation vähentämiseksi ei ole juuri mitään tehtävissä, koska se on funktio vain geometriasta [15]. Lavan kierteityksen optimointi äänen suuntaavuuden pienentämiseksi voisi olla yksi keino. Thumping-tyyppistä amplitudimodulaatiota voidaan vähentää pitämällä lavan kohtauskulma vakiona lavan pyöriessä. Tämä voidaan toteuttaa lavan nousukulman jaksoittaisella varioinnilla (*individual pitch control*), jota tekniikkaa on so-

vellettu esim. helikoptereihin [5, 11]. Tämä optimoi myös nostovoimaa eri roottorikulmilla ja vähentää thumping-ilmion syntyyn liittyvää mekaanista lisäkuormaa lavoille [5].

4 YHTEENVETO

Tuulivoimaloiden merkittävin melulähde on turbiinien roottorilavat, jotka tuottavat pääosin aerodynaamista laajakaistaista melua taajuusalueella 60 – 4 000 Hz. Lavan kohtauskulmalla on tärkeä merkitys tuuliturbiinin toiminnalle ja sen synnyttämän laajakaistaisen melun syntymiselle. Kun kohtauskulma kasvaa optimiarvostaan, tehontuotto vähenee ja äänitaso kasvaa. Pääosin yöaikaan esiintyvä voimakkaasti muuttuva tuuliprofiili stabiilissa ilmakehässä aiheuttaa sen, että tuuliturbiinien äänitasot saattavat olla paljon odotettua korkeampia, erityisesti modernien (korkeiden) tuulivoimaloiden, yhteydessä. Jopa 15 dB poikkeamia on havaittu 400 m etäisyydellä tuulipuistosta tyyninä öinä. Myös äänen etenemisvaimennus on vähäisempää stabiilissa ilmakehässä.

Roottorilapojen tuottamassa melussa esiintyy amplitudimodulaatiota syvyydeltään noin $\pm 2-3$ dB tyypillisesti noin 1 Hz modulaatiotaajuudella. Näyttää siltä, että amplitudimodulaation syntyyn vaikuttaa kaksi erillistä mekanismia ja ilmiötä: swishing-ilmio, joka syntyy voimakkaasti ääntä suuntaavien roottoreiden pyörimisliikkeestä, ja thumping-ilmio, joka syntyy lapojen liikkeestä epätasaisesti jakautuneiden virtausten läpi. Epätasaiset virtaukset johtuvat pääasiassa muuttuvasta tuuliprofiilista stabiilissa ilmakehässä.

Thumping-tyyppistä amplitudimodulaatiota voidaan vähentää pitämällä kohtauskulma mahdollisimman vakiona lapojen pyöriessä. Tämä voidaan toteuttaa varioimalla jaksottaisesti lavan nousukulmaa. Tämä optimoi myös nostovoimaa eri roottorikulmilla ja vähentää näin thumping-ilmion syntyyn liittyvää mekaanista lisäkuormaa lavoille.

VIITTEET

- [1] UOSUKAINEN S, *Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys*. VTT Tiedotteita 2529, Espoo 2010. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2529.pdf>
- [2] PEDERSEN E & WAYE K P, Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose-response relationship. *J Acoust Soc Am* **116**(2004)6, 3460–3470.
- [3] PEDERSEN E, *Noise Annoyance from Wind Turbines – a Review*. Swedish Environmental Protection Agency, Report 5308, Stockholm 2003.
- [4] DI NAPOLI C, *Tuulivoimaloiden melun syntytavat ja leviäminen*. Ympäristöministeriö, Suomen ympäristö 4, Helsinki 2007.
- [5] VAN DEN BERG G P, *The Sounds of High Winds, the Effect of Atmospheric Stability on Wind Turbine Sound and Microphone Noise*. University of Groningen, Groningen 2006. <http://dissertations.ub.rug.nl/faculties/science/2006/g.p.van.den.berg/>, <http://tinyurl.com/78baby>
- [6] MOORHOUSE A & HAYES M & VON HÜNERBEIN S & PIPER B & ADAMS M, *Research into Aerodynamic Modulation of Wind Turbine Noise: Final report*. University of Salford, 2007.

- [7] SCHEPERS J G & CURVERS A & OERLEMANS S & BRAUN K & LUTZ T & HERRIG A & WUERZ W & MATESANZ A & GARCILLÁN L & FISHER M & KOEGLER K & MAEDER T, SIROCCO: Silent rotors by acoustic optimization. *Second International Meeting on Wind Turbine Noise*, 20.–21.9.2007, Lyon.
- [8] OERLEMANS S & LÓPEZ B M, Localisation and quantification of noise sources on a wind turbine. *First International Meeting on Wind Turbine Noise*, 17.–18.10.2005, Berlin.
- [9] KLUG H, A review of wind turbine noise. *First International Meeting on Wind Turbine Noise*, 17.–18.10.2005, Berlin.
- [10] ROGERS A L & MANWELL J F & WRIGHT S, *Wind turbine acoustic noise*. University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts 2006. http://www.ceere.org/rerl/publications/whitepapers/Wind_Turbine_Acoustic_Noise_Rev2006.pdf
- [11] PALMER W K G, A new explanation for wind turbine whoosh – wind shear. *Third International Meeting on Wind Turbine Noise*, 17.–19.6.2009, Aalborg.
- [12] *Wind Energy Noise Impacts*. Acoustic Ecology Institute Special Report 1/6/09, Santa Fe NM 2009. <http://www.acousticecology.org/srwind.html>
- [13] VAN DEN BERG G P, Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *J Sound Vib* **277**(2004) 955–970.
- [14] DUNBABIN P, An investigation of blade swish from wind turbines. *Internoise 96*, 30.7.–2.8.1996, Liverpool.
- [15] BOWDLER D, Amplitude modulation of wind turbine noise. A review of the evidence. *Institute of Acoustic Bulletin* **33**, 4. <http://www.wind-watch.org/documents/wp-content/uploads/bowdler-amofwindturbines.pdf>
- [16] OERLEMANS S & SCHEPERS G, Prediction of wind turbine noise and comparison to experiment. *Second International Meeting on Wind Turbine Noise*, 20.–21.9.2007, Lyon.
- [17] RICHARZ W & RICHARZ H, Wind turbine noise diagnostics. *Third International Meeting on Wind Turbine Noise*, 17.–19.6.2009, Aalborg.
- [18] VAN DEN BERG G P, Do wind turbines produce significant low frequency sound levels? *11th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration*, 2004.
- [19] HUBBARD H H & SHEPHERD K P, Aeroacoustics of large wind turbines. *J Acoust. Soc Am* **89**(1991)6, 2495–2508.
- [20] *Wind Power in the UK*. Sustainable Development Commission, 2005. http://www.sd-commission.org.uk/publications/downloads/Wind_Energy-NovRev2005.pdf
- [21] FISH F E & LAUDER G V, Passive and active flow control by swimming fishes and mammals. *Annu Rev Fluid Mech* **38**(2006), 193–224.