



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

KAVITAATIO KONETEKNIKASSA

Miko Kuha

KONETEKNIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2019

TIIVISTELMÄ

Kavitaatio konetekniikassa

Miko Kuha

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2019, 25 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Hannu Koivurova

Tämän kirjallisuusselvityksen tavoitteena on tutustua kavitaation taustalla oleviin fysikaalisiin ilmiöihin, teoreettiseen perustaan ja vaikutuksiin laitteissa. Työssä myös käydään läpi yleisimpiä kavitaation esiintymiä. Nesteiden kanssa tekemisissä olevien laitteiden käyttöön, suorituskyvyn sekä värinä- ja melutason optimoinnin kannalta on erittäin tärkeä huomioda mahdollinen kavitaatio jo suunnittelupöydältä lähtien, sen aiheuttamien komplikaatioiden takia. Tätä varten on kehitetty useita matemaattisia malleja, joista muutamia esitellään myös tässä. Työ antaa yleisen näkemyksen kavitaatiosta etenkin konetekniikan näkökulmasta.

Asiasanat: kavitaatio, fluidit, virtaus, hydrodynamiikka

ABSTRACT

Cavitation in mechanical engineering

Miko Kuha

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2019, 25 pp.

Supervisor at the university: Hannu Koivurova

The aim of this literature review is to introduce the physics, the theoretical foundation and the effects of cavitation. Common occurrences of cavitation are also presented. Cavitation should be taken into account when optimizing the operating life, the performance and the level of vibration and noise of devices that are in contact with fluids because of the potential complications it may cause. For that there are numerous mathematical models developed, few of which are shown here. Thesis gives an overview of cavitation especially from mechanical engineering point of view.

Keywords: cavitation, fluids, flow, hydrodynamics

ALKUSANAT

Tämä työ kuuluu Oulun yliopiston konetekniikan koulutusohjelman kandidaatintutkielman osakokonaisuuteen. Pää tarkoituksena on perehtyä kavitaation tieteelliseen taustaan. Työ on tehty kevätlukukauden 2019 aikana. Haluaisin kiittää työn ohjaajaa ja tarkistajaa Hannu Koivurovaa asiallisesta ja selkeästä opastuksesta.

Oulu, 08.05.2019

Mikko Käha

Työn tekijä

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	7
2 PERUSILMIÖT	8
2.1 Aineen tilanmuutos	8
2.2 Virtaustyytit.....	9
3 KAVITAATIOTYYPIT.....	11
3.1 Hydrodynaaminen kavitaatio	11
3.2 Akustinen kavitaatio.....	11
3.3 Partikkeli- ja optinen kavitaatio	12
4 MALLINTAMINEN.....	13
4.1 Numeerinen virtausdynamiikka	13
4.2 Navierin–Stokesin yhtälöt.....	13
4.3 Rayleighin–Plessetin yhtälö	14
4.4 Singhal et al. malli.....	15
4.5 Kavitaatioparametrit.....	16
5 VAURIOMEKANISMIT.....	18
5.1 Eroosio	18
5.2 Ääni	19
6 KAVITOIVIA VIRTAUKSIA.....	20
6.1 Pyörrekavitaatio	20
6.2 Pilvikavitaatio	21
6.3 Lapakavitaatio	21
7 YHTEENVETO	23
LÄHDELUETTELO	

MERKINNÄT JA LYHENTEET

C_e	höyrystymisvakio
C_c	tiivistymisvakio
C_{pmin}	paineen minimikerroin
\mathbf{F}	voimavektori
f_v	höyryn massaosuus
f_g	kaasun massaosuus
k	turbulenttinen kineettinen energia
L	pituus
P	keskiarvoistettu paine
p	fluidin paine
Δp	nesteen aiheutettu jännitys
$p_{app.}$	kavitaation rajapaine
p_B	paine kuplan pinnalla
Δp_c	nesteen murtolujuus
p_{min}	minimipaine
p_v	kylläisen höyryn paine
p_1	tuloaukon paine
p_1^T	tuloaukon kokonaispaine
p_∞	paikallisen kaukokentän paine
Q	tilavuusvirta
R	säde
R_c	tiivistymistahti
Re	Reynoldsin luku
Re	höyrystymistahti
S	imupuolen ominaispyörimisnopeus
S_i	imupuolen kavitaation rajaominaispyörimisnopeus
T	lämpötila
t	aika
ΔT	nesteeseen aiheutettu ylikuumeneminen
ΔT_c	kriittinen tulistuslämpötila
T_s	kyllästyslämpötila
U	nopeus tuloaukolla

\mathbf{U}	keskiarvoistettu nopeusvektori
\mathbf{u}	fluidin nopeusvektori
\mathbf{u}_v	höyrytilan nopeusvektori
V	tilavuus
v_s	virtauksen nopeus
Γ	diffuusiovakio
γ	pintajännitys
μ	dynaaminen viskositeetti
μ_T	turbulentti/eddy viskositeetti
ν	kinemaattinen viskositeetti
ρ	fluidin tiheys
ρ_v	höyryn tiheys
ρ_l	nesteen tiheys
σ_i	kavitaatioluku
Ω	pyörimisnopeus

1 JOHDANTO

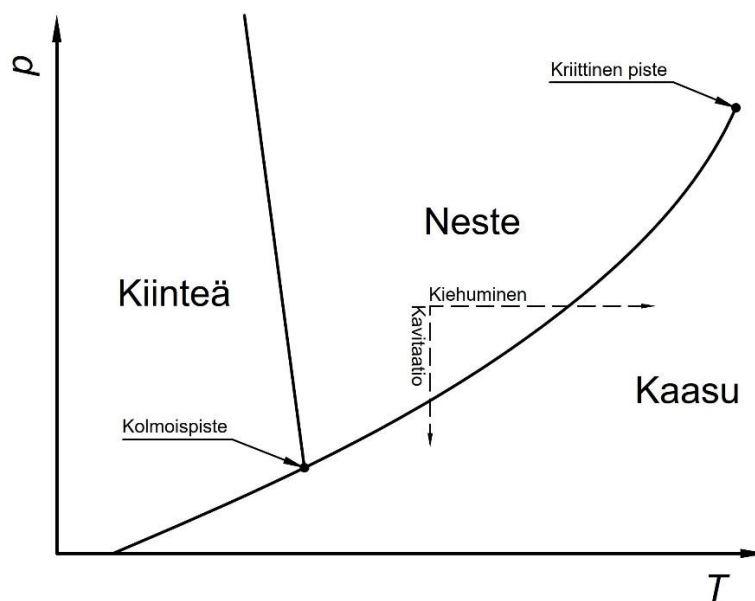
Kavitaatio on prosessi, jossa neste vaihtaa tilansa kaasuksi, eli höyrystyy, paineen laskun myötä. Tällainen paineen lasku on yleistä virtaavissa systeemeissä, kuten pumpuissa ja venttiileissä. Usein kavitaation sanotaan olevan kiehumista, mutta kirjallisuudessa kiehumisen prosessi mielletään yleensä höyrystymiseksi lämpötilan noston myötä. Yksityiskohtaisessa tarkastelussa kiehumisen ja kavitaatio eroavat paljon, koska lämpötilan muutos tapahtuu yleensä epätasaisesti kiinteän rajapinnan välityksellä, kun vastaavasti muutos paineessa tapahtuu yhtenäisesti. Tietenkin on myös tapauksia, joissa lämpötila ja paine kumpikin muuttuvat, joten tarkkaa rajaa kiehumiselle ja kavitaatiolle ei voi määritellä, mutta höyrystymisen voidaan ajatella olevan kavitaatiota silloin, kun paine on hallitseva muuttuja ja kiehumista, kun hallitseva muuttuja on lämpötila.

Se mikä kavitaatiosta tekee mielenkiintoisen ei niinkään ole se, että neste höyrystyy paineen laskun myötä, vaan se, että nesteeseen muodostuneet kaasukuplat luhistuvat siirryttäessä pois alipaineen alueelta synnyttäen suuria paineaaltoja ja mikrosuihkuja, jopa kymmenien tuhansien asteiden lämpötiloja sekä joskus hieman yllättävästi valoa (sonoluminesenssi). Paineaalto ja mikrosuihku kykenevät aiheuttamaan suuria, erittäin paikallisia jännityksiä läheisille pinnoille, mitkä johtavat paikallisiin pinnan väsymismurtumiin ja lopulta pintaerosioon. Tästä syystä kavitaation huomiotta jättäminen laitteen suunnittelussa ja käytössä voi pudottaa käyttöikä ja suorituskykyä sekä nostaa tärinä- ja melutasoa merkittävästi. Kavitaatiolle on myös joitain hyötykäyttökohteita esimerkiksi vesileikkauksessa ja ultraäänipuhdistuksessa.

2 PERUSILMIÖT

2.1 Aineen tilanmuutos

Kavitaation ymmärtämiseksi on olennaista ensin tarkastella aineen eri olomuotojen eli faasien muutosta. Faasidiagrammi kuvaa aineen olomuotoja paineen p lämpötilan T ja tilavuuden V muuttuessa (Kuva 1), tässä tapauksessa tärkein tilamuutos on nesteestä kaasuksi. Neste murtuu eli vaihtaa tilaansa kaasuksi, kun lämpötila nostetaan kiehumisrajan yli tai kun paine lasketaan höyrystymisrajan alle. (Brennen 1995) Nesteen murtumista voidaan hyvin havainnollistaa vesiruiskulla: Kun estetään ilman pääsy sylinterin sisälle ja samalla vedetään ruiskun mäntää, luodaan ruiskun sisälle alipaine. Veden molekyylien väliset voimat pitävät vielä nesteen kasassa, mutta kun alipaine laskee tarpeeksi alas veteen nukleoituu eli ydintyy kaasukuplia, vesi murtuu.



Kuva 1. Esimerkki faasidiagrammista.

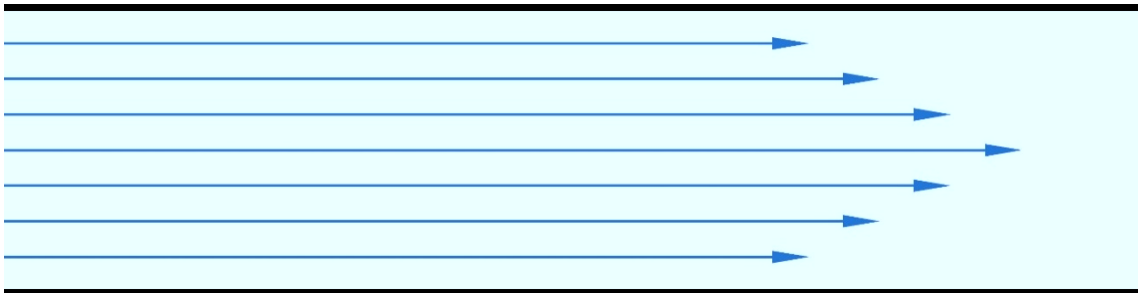
Brennenin (1995) mukaan Nesteen murtolujuus esiintyy ainakin kahdella tavalla. Tapa 1: Kun tasaisessa lämpötilassa olevan nesteen painetta p lasketaan kylläisen höyryn paineen p_v alapuolelle, on erotus $(p_v - p)$ eli Δp , nesteeseen aiheutettu jännitys. Se jännityksen suuruus, jossa nesteessä tapahtuu murtuminen, on nesteelle ominainen murtolujuus Δp_c . Nesteen murtumista paineen laskun myötä nimitetään yleensä kavitaatioksi. Tapa 2: Kun tasaisessa lämpötilassa olevan nesteen lämpötilaa T nostetaan kyllästyslämpötilan T_s yläpuolelle, on erotus $(T - T_s)$ eli ΔT , nesteeseen aiheutettu ylikuumentuminen. Se piste missä nesteeseen muodostuu höyryä, on nesteelle ominainen kriittinen tulistuslämpötila

ΔT_c . Nesteen murtumista lämpötilan nousun myötä kutsutaan yleensä kiehumiseksi. Tosin läheskään aina ei voi tehdä selvää erotusta kavitaation ja kiehumisen välille. Käytännön tilanteissa nesteessä on paljon murtolujuutta pienentäviä epäpuhtauksia (Brennen 1995; Leighton 2012).

Nesteen lämpötilaa on melkein mahdoton nopeasti muuttaa tasaisesti, koska lämpötilan muutos tapahtuu yleensä kiinteän rajapinnan välityksellä. Tästä johtuen kiehumisprosessiin vaikuttaa kiinteän pinnan ja termisen rajapyykin kerroksen vuorovaikutukset. Toisaalta nopea, yhtenäinen muutos nesteen paineessa on tavallista, joten yksityiskohdat kavitaation ja kiehumisen takana voivat erota toisistaan merkittävästi. (Brennen 1994)

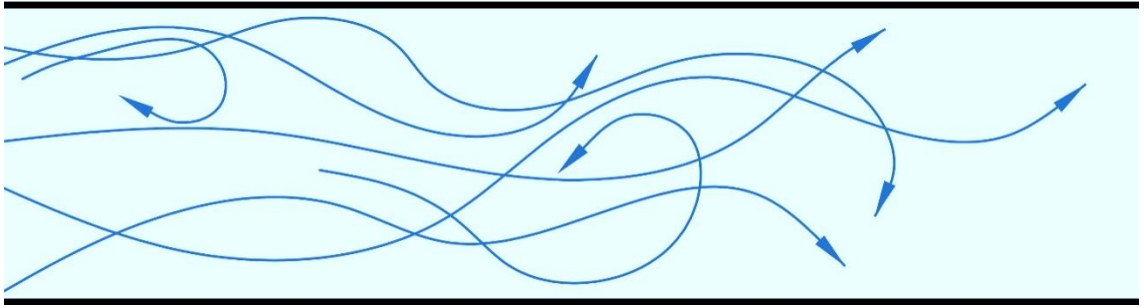
2.2 Virtaustyyppit

Virtaustyypeillä on suuri vaikutus kavitaation syntyyn. Virtaus alhaisilla nopeuksilla tai läpimitaltaan pienissä johtimissa on virtaviivaista, mikä tarkoittaa sitä, että fluidin (neste, kaasu tai plasma) kerrokset eivät tule toistensa tielle, vaan ne liikkuvat tasaisissa kerroksissa (Kuva 2). Tätä kutsutaan laminaariseksi virtaukseksi.



Kuva 2. Laminaarinen virtaus.

Virtauksen nopeutta lisäämällä fluidin kerrokset alkavat käyttäytyä epätasaisesti ja sekoittua keskenään. Virtaukseen syntyy tällöin pyörteitä eli turbulenssia ja tällaista virtausta kutsutaan turbulentiksi virtaukseksi (Kuva 3). Turbulenttia virtausta aiheuttaa virtauksen nopeuden ohella monet muutkin tekijät, kuten virtauksen johtimen geometria ja pinnanlaatu. (Tabatabaian 2015) Turbulentin virtauksen pyörteet aiheuttavat paikallisia paine-eroja nesteessä, jonka myötä pyörteet aiheuttavat kavitaatiota, sillä vaikka keskimääräinen paine nesteessä ei olisi riittävän alhainen, voi pyörteessä se laskea kylläisen höyryn paineen p_v alapuolelle (Brennen 1995).



Kuva 3. Turbulentti virtaus.

Virtauksen turbulentsuutta kuvataan dimensiottomalla Reynoldsin luvulla

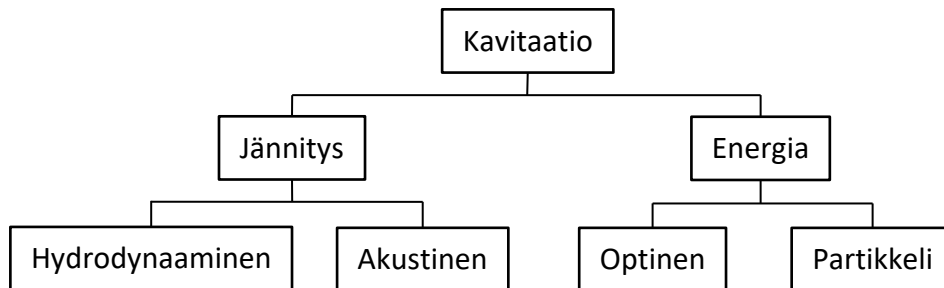
$$Re = \frac{\rho v_s L}{\mu} = \frac{v_s L}{\nu}, \quad (1)$$

missä ρ on fluidin tiheys [kg/m^3],
 v_s on virtauksen nopeus [m/s],
 L on virtausta luonnehtiva pituus (esim. putken halkaisija) [m],
 μ on dynaaminen viskositeetti [Pas] ja
 ν on kinemaattinen viskositeetti [m^2/s].

Reynoldsin luku on virtaavan fluidin hitausvoimien ja virtauksen sekoittumista vastustavien viskoottisten ominaisuuksien suhde (Hauer et al. 2007). Pienellä Reynoldsin luvulla virtaus on laminaarista ja suurella turbulentsista.

3 KAVITAATIOTYYPIT

Kavitaation syntymekanismit voidaan jakaa neljään pääkategoriaan (Kuva 4). Näistä konetekniikalle oleelliset ovat hydrodynaaminen ja akustinen kavitaatio.



Kuva 4. Kavitaation pääkategoriat (mukaillen Lauterborn 1980).

3.1 Hydrodynaaminen kavitaatio

Mahdollisesti yleisin kavitaation esiintymä on virtaavissa nestesysteemeissä, joissa hydrodynaamiset vaikutukset aikaansaavat alueita, missä paine laskee höyrystymispisteen alapuolelle (Brennen 1995). Hydrodynaamisia vaikutuksia aiheuttavat esimerkiksi rajoitetussa tilavuudessa muuttuva virtausnopeus (esim. venturi), tasojen geometria ja nesteessä pyörivän kappaleen pyörimisnopeus. Laitteiden suunnittelussa täytyy huomioida virtausten käyttäytyminen kavitaation minimoimiseksi, koska se voi aiheuttaa merkittäviä vaurioita, ääntä ja värähtelyä.

3.2 Akustinen kavitaatio

Akustiikassa tutkitaan ääntä sekä kaasun, nesteen ja kiinteän väliaineen mekaanista aaltoliikettä. Akustisella kavitaatiolla tarkoitetaan prosessia, jossa mekaaninen aaltoliike (ääni) synnyttää nesteeseen värähtelyä, joka aiheuttaa nopeita painemuutoksia, jotka johtavat höyrykuplien muodostumiseen. Ultraäänen aiheuttaman kavitaatiokuplan luhistuminen voi synnyttää valoa, jota kutsutaan sonoluminesenssiksi. Kuplan luhistumisen on myös havaittu aiheuttavan hetkellisiä kymmenien tuhansien asteiden lämpötiloja. (Gaitan 1990) Akustisella kavitaatiolla on monia hyödyllisiä käyttökohteita esimerkiksi lääketieteessä ja ultraäänipuhdistuksessa.

3.3 Partikkeli- ja optinen kavitaatio

Partikkelikavitaatio on prosessi, jossa neste murtuu, kun sitä säteilytetään suurienergisillä partikkeleilla. Optinen kavitaatio on partikkelikavitaatiota, jossa partikkelina käytetään fotoneja, tällainen kavitaatio aikaansaadaan intensiteetiltään suurella laserilla, jonka valo kohdistetaan nesteeseen. (Lauterborn 1979) Optinen kavitaatio on hyödyllinen kupladynamiikan tutkimuksissa, koska sillä voidaan kontrolloidusti aikaansaada kuplia nesteeseen (Lauterborn et al. 1989).

4 MALLINTAMINEN

4.1 Numeerinen virtausdynamiikka

Kavitaatiota mallinnetaan numeerisen virtausdynamiikan eli CFD:n (Computational Fluid Dynamics) keinoin, joka on virtausmekaniikan osa-alue, missä analyttiset differentiaaliyhtälöt korvataan numeerisilla likimääräisratkaisuilla. Yleisesti käytettyjä numeerisia keinoja ovat esimerkiksi differenssimenetelmä (FDM), tilavuusmenetelmä (FVM) ja elementtimenetelmä (FEM). Numeerisen virtausdynamiikan ongelmat vaativat jopa miljoonia toistuvia yksittäisratkaisuja, mikä on ihmiselle mahdoton tehtävä. Tästä syystä ratkaisuun käytetään tietokoneita. Ratkaisujen tarkkuus on suoraan verrannollinen tietokoneen suorituskykyyn, jonka takia numeerisen virtausdynamiikan tarpeet ovatkin merkittäviä supertietokoneiden kehitystä ajavia tekijöitä. (Anderson et al. 2009)

4.2 Navierin–Stokesin yhtälöt

Kavitaatiolle on kehitetty ja kehitetään edelleen lukuisia malleja, mitkä ovat johdettu Navierin–Stokesin yhtälöistä. Nämä yhtälöt määrittelevät fluidien liikettä. Kokoonpuristuville newtonilaisille fluideille yhtälöt saavat muodon

$$\underbrace{\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right)}_A = -\nabla p + \underbrace{\nabla \cdot \left[\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right]}_B + \mathbf{F}, \quad (2)$$

missä t on aika [s],
 \mathbf{u} on fluidin nopeusvektori [m/s],
 p on fluidin paine [Pa] ja
 \mathbf{F} on ulkoinen voimavektori [N].

Yhtälössä (2) termi A on hitausvoima ja termi B on viskoosivoima. Nämä yhtälöt ratkaistaan aina yhdessä jatkuvuusyhtälön

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

kanssa. Navierin–Stokesin yhtälöt kuvaavat liikemäärän säilymistä ja jatkuvuusyhtälö kuvaa massan säilymistä. Näillä yhtälöillä voidaan ratkaista fluidin nopeus ja paine tietyn

geometrian sisällä. Sovellukset, missä Reynoldsin luku on suuri (turbulentti virtaus), johtavat siihen, että yhtälön (2) hitausvoima A on paljon suurempi kuin viskoosivoima B. Tämä taas johtaa siihen, että Navierin–Stokesin yhtälöiden ratkaisu nykytietokoneilla vaikeutuu suorituskyvyn puutteen takia. Turbulenteille virtauksille käytetäänkin kevyempää Reynolds-keskiarvoistettua Navierin–Stokesin yhtälöä (Reynolds-averaged Navier-Stokes) eli RANS-yhtälöä

$$\underbrace{\rho(\mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U}) + \nabla \cdot \left[\mu_T (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T) - \frac{2}{3} \mu_T (\nabla \cdot \mathbf{U}) \mathbf{I} \right]}_A = -\nabla P + \nabla \cdot \underbrace{\left[\mu (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{U}) \mathbf{I} \right]}_B + \mathbf{F}, \quad (4)$$

missä \mathbf{U} ja P ovat keskiarvoistetut nopeusvektori ja paine sekä μ_T on turbulentti/eddy viskositeetti. (COMSOL 2017)

4.3 Rayleighin–Plessetin yhtälö

Rayleighin–Plessetin yhtälö kuvastaa pyöreiden kuplien dynamiikkaa, se ottaa huomioon epäjatkuvan ulkoisen paineen, viskositeetin ja pintajännityksen. Tämä yhtälö on johdettu Navierin–Stokesin yhtälöistä pyöreiden kuplien oletuksella. Virtaavissa nesteissä, joissa ei tapahdu liukumaa nesteen ja kuplien välillä, saa Rayleighin–Plessetin yhtälö yleisen muodon

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4v_l}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{2\gamma}{\rho_l R} + \frac{p_B(t) - p_\infty(t)}{\rho_l} = 0, \quad (5)$$

missä $R(t)$ on kuplan säde [m],
 γ on pintajännitys [N/m],
 ρ_l on nesteen tiheys [kg/m³],
 $p_B(t)$ on paine kuplan pinnalla [Pa] ja
 $p_\infty(t)$ on paikallisen kaukokentän paine [Pa].

Tästä yhtälöstä voidaan ratkaista $R(t)$, mikäli tunnetaan $p_B(t)$ ja $p_\infty(t)$ on annettu (Brennen 1995). Se antaa fyysisen lähestymistavan, jolla voidaan lisätä kuplan dynamiikka kavitaatiomalliin ja lisäksi se voidaan mieltää kavitaatio-ontelon etenemisen ja seoksen tiheyden yhtälönä (Singhal et al. 2002).

4.4 Singhal et al. malli

Singhal et al. (2002) kehittivät mallin, jota kutsutaan myös täydeksi kavitaatiomalliksi (full cavitation model). He kirjoittivat yhtälön muotoon

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho f_v) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}_v f_v) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla f_v) + R_e - R_c, \quad (6)$$

missä f_v on höyryn massaosuus,
 \mathbf{u}_v on höyrytilan nopeusvektori [m/s] ja
 Γ on diffuusiovakio [m²/s].

Yhtälössä höyrystymistahti R_e ja tiivistymistahti R_c ovat:

$$R_e = C_e \frac{\sqrt{k}}{\gamma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2 p_v - p}{3 \rho_l}} (1 - f_v - f_g) \quad (7)$$

$$R_c = C_c \frac{\sqrt{k}}{\gamma} \rho_l \rho_l \sqrt{\frac{2 p - p_v}{3 \rho_l}} f_v, \quad (8)$$

missä $C_e = 0,02$,
 $C_c = 0,01$,
 k on turbulenttinen kineettinen energia [m²/s²],
 ρ_v on höyryn tiheys [kg/m³] ja
 f_g on kaasun massaosuus.

Se ottaa huomioon kaikki ensimmäisen asteen vaikutukset eli tilanmuutoksen, kupladynamiikan, turbulentin paineen vaihtelun ja tiivistymättömät kaasut. Se kykenee huomioimaan monifaasisen virtauksen, liukunopeuksien vaikutukset neste- ja kaasutilojen välillä sekä neste- ja kaasutilan lämpötilavaikutukset ja kokoonpuristuvuuden. (ANSYS 2009) Kyseistä mallia voidaan soveltaa kaikissa geometrioissa (3D, 2D-taso ja 2D-pyörähdyssymmetria) sekä kaikissa verkkotyypeissä. Sillä voidaan mallintaa kavitaatiota esimerkiksi diesel polttoaineen suuttimissa, missä on monia mutkikkaita virtausportti- ja ajassa vaihtelevia geometrioita sekä painekuormitusta; lamelli- ja hammaspyöräpumppujen optimoinnissa; turbokoneissa ja termostaattiventtiileissä sekä monissa muissa ongelmissa. (Singhal et al. 2002)

4.5 Kavitaatioparametrit

On olemassa dimensiottomia parametreja, joilla voidaan kuvailla kavitaatiota. Näitä ovat esimerkiksi tässä käsiteltävät kavitaatioluku σ_i ja imupuolen ominaispyörimisnopeus (suction specific speed) S tai N_{ss} . Missä tahansa virtauksessa, jolle on määrätty fluidin nopeus, geometria ja Reynoldsin luku, tulee olemaan tietty kohta, missä paine on minimissään p_{min} . Tällöin minimipaineen ja tuloaukon paineen p_1 erotus on

$$C_{pmin} = \frac{p_{min} - p_1}{\frac{1}{2}\rho U^2}, \quad (9)$$

missä U on nopeus tuloaukolla ja C_{pmin} on jokin negatiivinen luku mikä on vain laitteen (pumpun) geometrian ja Reynoldsin luvun funktio. Jos C_{pmin} on mahdollista löytää kokeellisesti tai teoreettisesti, voidaan osoittaa tuloaukon paineelle p_1 arvo, milloin kavitaatio ilmenee ensimmäistä kertaa $p_{app.}$, kun painetta pienennetään. Tämä paine

$$p_{app.} = p_v + \frac{1}{2}\rho U^2(-C_{pmin}), \quad (10)$$

on tietylle laitteelle, fluidille ja lämpötilalle vain nopeuden U funktio. Virtaukselle voidaan määritellä kavitaatioluku

$$\sigma_i = \frac{p_{app.} - p_v}{\frac{1}{2}\rho U^2}, \quad (11)$$

millä kuvataan virtauksen potentiaalia kavitaatiolle. Kavitaatioluvulle löytyy monia variaatioita ja määritelmiä kirjallisuudesta. Pumpujen ja turbiinien tapauksessa on käytössä myös muita kavitaatioparametreja, kuten imupuolen ominaispyörimisnopeus

$$S = \frac{\Omega Q^{1/2}}{(p_1^T - p_v)^{3/4}}, \quad (12)$$

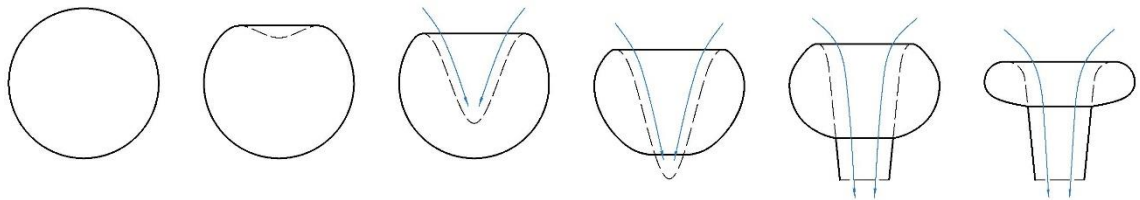
missä Ω on pyörimisnopeus [rad/s],
 Q on tilavuusvirta [l/s] ja
 p_1^T on tuloaukon kokonaispaine [Pa].

Imupuolen ominaispyörimisnopeus on samankaltainen kavitaatioluvun kanssa, sillä se on dimensioton versio tulo- tai imupaineesta sekä sille on ominainen arvo, jolla kavitaatio ensimmäisen kerran ilmenee. Tästä arvosta käytetään nimitystä imupuolen kavitaation rajaominaispyörimisnopeus (inception suction specific speed) S_i . (Brennen 1994)

5 VAURIOMEKANISMIT

5.1 Eroosio

Kavitaatiokuplan luhistuminen (Kuva 5) synnyttää nesteessä paikallisen ja amplitudiltaan suuren paineaallon ja mikrosuihkun, joka voi kiinteän pinnan lähellä tapahtuessa aiheuttaa paikallisia ja tilapäisiä pintajännityksiä. Kun tällainen kuormitus tapahtuu toistuvasti se aiheuttaa paikallisen pintaväsymismurtuman ja pinnan materiaalin irtoamisen tai hilseilyä. Kavitaation aiheuttamalle eroosiolle tyypillistä on rosainen ja kiteinen ulkonäkö (Kuva 6), minkä erottaa helposti tavallisesta liikkuvien partikkeleiden aiheuttamasta eroosiosta, joka on ulkonäöltään paljon sileämpi. Teräksillä korroosio nopeuttaa kavitaatioeroosion vaurioiden syntymistä. (Brennen 1995)



Kuva 5. Havainnekuva kavitaatiokuplan luhistumisesta (mukaillen Lauterborn et al. 1989).



Kuva 6. Kavitaatioeroosio pumpun juoksupyörässä (WaterWorld 2017).

Käytännön laitteissa kavitaatiovaurio on yleensä hyvin epämieluisa, mutta sille on myös hyötykäyttöä. Kiven vesileikkaamisen mekanismin uskotaan perustuvan ainakin osaltaan vesisuihkussa syntyvään kavitaatioon, kun suihku virtaa tarpeeksi karkean kiven pinnalla. Hammaslääkärit käyttävät kavitoivaa suihkua hampaiden puhdistuksessa ja esimerkiksi

tekohampaiden puhdistukseen on saatavilla ultraäänipuhdistuslaitteita, jotka hyödyntävät akustista kavitaatiota. On myös epäilty, että luhistuva kupla on merkittävä kudosvaurioiden aiheuttaja päävammoissa. (Brennen 1995)

5.2 Ääni

Luhistuvat kuplat synnyttävät rätisevää ääntä, mikä voi johtaa myös systeemin värähtelyyn. Äänen avulla voidaan myös havaita järjestelmän ongelmakohdat, koska ääni viittaa mahdollisiin vaurioihin. Kavitaation synnyttämää ääntä voidaankin pitää karkeana eroosionopeuden mittana. Äänen on huomattu korreloivan kavitaatiovaurion aiheuttaman painohäviön kanssa, kun virtauksen nopeutta muutetaan. (Brennen 1994)

Hydraulisissa toimilaitteissa kavitaatio aiheuttaa melua esimerkiksi pumpuissa ja venttiileissä. Pumpuissa kavitaatio esiintyy imupuolella, joka johtuu huonosti mitoitettusta imuputkesta, tukkeutuneesta suodattimesta tai kylmyyden takia jäykästä öljystä. Paineenrajoitus- ja vastusventtiileissä esiintyy usein kavitaatiosta johtuen suhisevaa ääntä. (Mäkinen 1994) Käytännön tilanteissa melu on yleensä ainut tapa havaita kavitaatiota laitteissa, kuten pumpuissa ja venttiileissä (Brennen 1995).

6 KAVITOIVIA VIRTAUKSIA

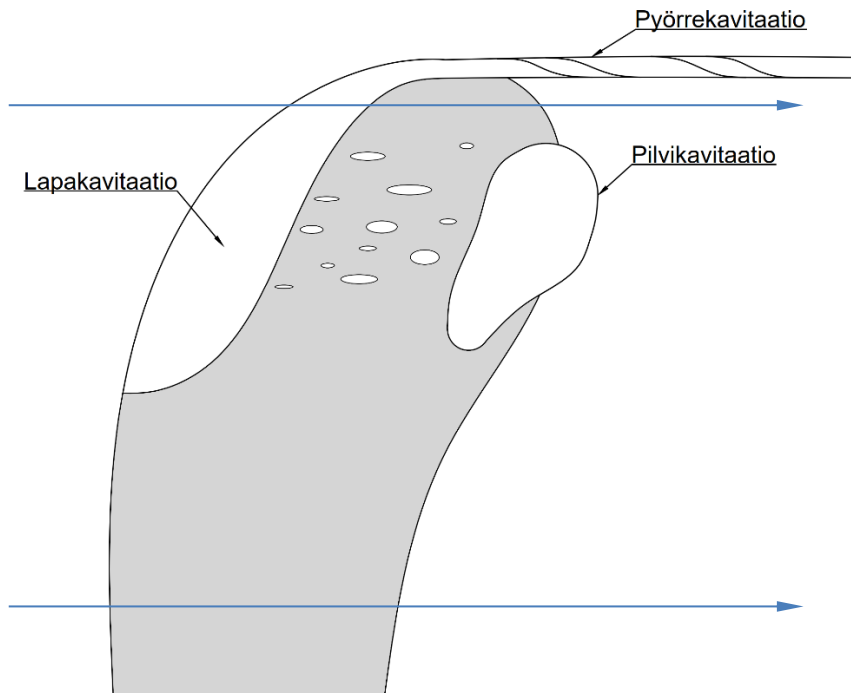
Virtauksessa yksi kavitaatiotapahtuma on prosessi, joka sisältää kavitaation ydintymisen alhaisen paineen alueella, sen räjähdysmäisen kasvamisen makroskooppiseksi ja luhistumisen siirryttäessä suuremman paineen alueelle. Kun kavitaatiotapahtumien tiheys kasvaa tarpeeksi suureksi, ne muuttavat virtausta merkittävästi. Kavitaatioluvun laskeminen, mikä aktivoi entistä pienempiä ytimiä tai lisäys ytimien määrässä lähestyvässä virrassa voivat johtaa tapahtumien tiheyden kasvuun. Laajat kavitaatorakenteet, jotka syntyvät, kun kavitaatiolukua lasketaan, voivat ottaa monia muotoja. (Brennen 1995) Tarkastellaan tässä kappaleessa muutamia hydrodynaamisen kavitaation erikoistapauksia.

6.1 Pyörrekavitaatio

Yleensä virtauksen minimipaine esiintyy kiinteällä pinnalla tai sen läheisyydessä. Tästä poikkeuksena on korkean Reynoldsin luvun virtauksen pyörrekavitaatio (Kuvat 7 ja 8), jossa pyörteen irtautuminen kiinteältä pinnalta tai sen turbulenssi johtaa paineen minimikohdan syntymiseen pyörteen keskelle. Pyörrekavitaatiota esiintyy esimerkiksi laivapotkureiden lapojen kärjissä, pumppujen juoksupyörissä ja vesiturbiinien vetoputkissa. Tarpeeksi alhaisella kavitaatioluvulla koko pyörteen ydin voi täytyä höyryllä. (Brennen 1995)



Kuva 7. Yhdysvaltain laivaston 1940-luvulla suorittama potkurin kavitaatiosimulointi vesitunnelissa (Yhdysvaltain laivasto 2008).



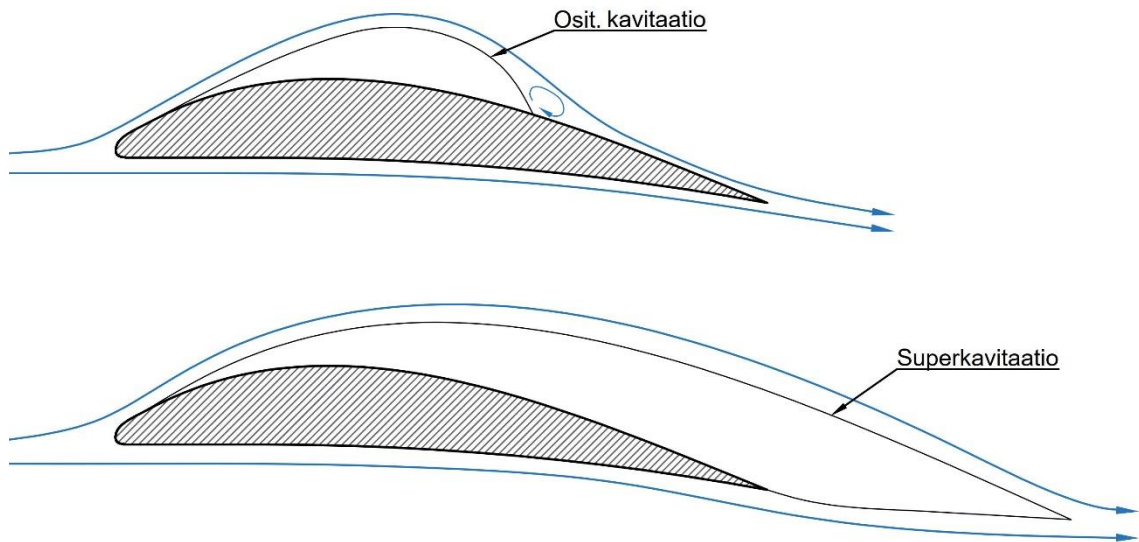
Kuva 8. Eri kavitaatiovirtauksia potkurin lavassa. Nuolet osoittavat virtauksen suunnan.

6.2 Pilvikavitaatio

Pilvikavitaatio (Kuvat 7 ja 8) syntyy, kun kavitoivista kuplista koostuva pilvi muodostuu ja luhistuu jaksollisesti. Jaksollisuuden saattaa aiheuttaa luonnollinen kavitaatiopyörteen irtautuminen tai se voi olla vaste määrätylle virtaukselle aiheutetulle jaksolliselle häiriölle. Esimerkkejä tällaisesta määrätystä vaihtelusta ovat roottorin ja staattorin lapojen välinen vuorovaikutus pumpussa tai turbiinissa sekä laivan potkurin ja rungon aiheuttaman hajanaisen vanaveden välinen vuorovaikutus. Näissä tapauksissa pilven kuplien yhtenäinen luhistuminen voi aiheuttaa voimakkaampaa ääntä ja suuremman potentiaalin vauriolle, kuin vastaavassa tasaisessa virtauksessa. Pilvikavitaatio on ensisijainen huoli potkureiden ja pumppujen valmistajille. (Brennen 1995)

6.3 Lapakavitaatio

Lapakavitaatio (Kuvat 7 ja 8) syntyy, kun vanavesi tai jakaantunut virtaus luo alipaineisen alueen, joka täyttyy höyryllä. Lapakavitaatio on yleistä kantosiivissä, potkureissa ja muissa lavoissa/siivissä. Lapakavitaatio voi saada monia muotoja: Kun ontelo sulkeutuu lavan imupinnalle, sitä sanotaan osittaiseksi kavitaatioksi (Kuva 9).



Kuva 9. Osittainen ja superkavitaatio lavan pinnalla (mukaillen Brennen 1995).

Kyseinen muoto on usein havaittavissa potkureissa ja pumpuissa. Pienillä kavitaatioluvuilla ontelo saattaa sulkeutua vasta pitkälle jättöreunan taakse, tätä kutsutaan superkavitaatioksi (Kuva 9). Esimerkiksi pikaveneiden potkurit ovat monesti suunniteltu toimimaan tällaisissa olosuhteissa. Kun ontelon pituus on suunnilleen lavan pituinen, muuttuu virtaus epävakaaksi ja ontelon koko alkaa vaihtelevaan nopeasti. Vaihtelujakson aikana ontelo pitenee suhteellisen tasaisesti, mutta lyhenemisessä ontelon perästä irtautuu kuplapilvi, joka myöhemmin luhistuu. Pumpuissa ja muissa laitteissa osittaisen ja superkavitaation välistä tilaa, jossa tapahtuu kuplapilven irtautumista, on syytä välttää sen mahdollisesti aiheuttamien vaurioiden takia. (Brennen 1995)

7 YHTEENVETO

Kavitaatio on hyvin erikoinen ja jokseenkin salakavala ilmiö, sillä ei ainakaan ihan heti ensimmäisenä tulisi mieleen, että pelkästä paineen vaihtelusta syntyvät kaasukuplat nestesysteemissä kykenevät johtamaan koneen rikkoontumiseen. Sen syntytapoja on monia ja sitä esiintyy lähes kaikissa virtaavissa systeemeissä. Onneksi kavitaation simuloimiseksi on kehitetty ja kehitetään edelleenkin useita matemaattisia malleja, jotka helpottavat koneiden suunnittelutyötä. Tästä voisi jatkaa esimerkiksi tutkimalla, miten eri mallit toimivat eri tapauksissa.

LÄHDELUETTELO

Anderson, J. D., Degrez, G., Degroote, J., Dick, E., Grundmann, R., Vierendeels, J. & Wendt, J. F., 2009. Computational Fluid Dynamics – An Introduction. 3. painos. Berliini: Springer, 332 s. ISBN 978-3-540-85055-7

ANSYS, 2009. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, 16.7.4 Cavitation Models [verkkodokumentti]. Saatavissa:

<http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node343.htm> [viitattu 25.4.2019].

Brennen, C. E., 1994. Hydrodynamics of Pumps. Norwich: Concepts ETI, Inc., 316 s. ISBN 0-933283-07-5

Brennen, C. E., 1995. Cavitation and Bubble Dynamics. New York: Oxford University Press, 282 s. ISBN 0-19-509409-3

COMSOL, 2017. Fluid, Navier-Stokes Equations [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.comsol.com/multiphysics/navier-stokes-equations> [viitattu 25.4.2019].

Gaitan, D. F., 1990, An Experimental Investigation of Acoustic Cavitation in Gaseous Liquids [verkkodokumentti]. Oxford, Mississippi: The University of Mississippi. Saatavissa: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a230033.pdf> [viitattu 25.4.2019]. 207 s.

Hauer, F. R. & Lamberti, G. A., 2007. Methods in Stream Ecology. Amsterdam: Academic Press, 674 s. ISBN 9780123329080

Lauterborn, W., 1979. Optic Cavitation. Journal de Physique Colloques, 40 (C8), s. 273-278.

Lauterborn, W., Timm, R. & Vogel, A., 1989. Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary. Journal of Fluid Mechanics, 206, s. 299-338.

Leighton, T. G., 2012. *The Acoustic Bubble*. 3. painos. Lontoo: Academic Press, 640 s. ISBN 0-12-441920-8

Mäkinen, R., 1994. *Hydrauliikka 3 – Suunnittelu*. 2. painos. Keuruu: Otava, 165 s. ISBN 951-1-05923-8

Singhal, A. K., Athavale, M. M., Jiang, Y. & Li, H., 2002. Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model. *Journal of Fluids Engineering*, 124, 617-624.

Tabatabaian, M., 2015. *CFD Module: Turbulent Flow Modeling*. Dulles, Virginia: Mercury Learning and Information, 201 s. ISBN 9781942270614