



Alessia Hausmann

Ilmastustornin mitoitusohjeen laadinta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

20.8.2022

Tiivistelmä

Tekijä(t):	Alessia Hausmann
Otsikko:	Ilmastustornin mitoitushjeen laadinta
Sivumäärä:	40 sivua + 4 liitettä
Aika:	20.8.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Bio- ja kemiantekniikka
Suuntautumisvaihtoehto:	Kemian prosessitekniikka
Ohjaaja(t):	Johanna Herttuainen, Projekti-insinööri Timo Seuranen, Lehtori

Tämän insinööritöiden tavoitteena oli luoda ilmastustornin mitoitusta varten laskenta-työkalu ja ohje AFRY Finland Oy:n vesihuollon osaston prosessisuunnitteluyksikölle. Työ suoritettiin kirjallisuuskatsauksena. Työssä keskityttiin puhdasvesilaitoksille suunniteltaviin ilmastustorneihin ja niiden haitta-aineiden poistoon, mitä etenkin pohjavesissä voi esiintyä.

Ilmastustorneja käytetään vesilaitoksilla parantamaan käsiteltävän veden laatua. Pohjavedet ovat usein happamia johtuen liiallisesta hiilidioksidipitoisuudesta ja ne voivat sisältää lisäksi radonia, rautaa, mangaania ja erilaisia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. Näitä yhdisteitä voidaan poistaa vedestä ilman avulla hyödyntämällä aineensiirtoa neste- ja kaasufaasien välillä, ja ilmassa oleva happi hapettaa rauta- ja manganiyhdisteet liukenemattomaan muotoon, jolloin ne voidaan poistaa puhdistusprosessin seuraavissa vaiheissa.

Työssä tarkasteltiin muun muassa ilmastustornin yleistä rakennetta, torneissa käytettäviä täytekappaleita ja teoriaa kaasun siirtymisestä nesteessä ja sen fysikaalis-kemiallisia seurauksia veden laadulle. Mitoitusesimerkinä käytettiin poistettavan aineen osalta hiilidioksidia.

Työn lopputuloksena saatiin laskettua tarvittava ilma-vesisuhde tarpeellisen hiilidioksidimäärän poistoa varten, tornin pinta-ala ja halkaisija, tornin täytekappalekorkeus ja erilaisia mitoitukseen käytettäviä aineensiirtokertoimia.

Syntyneellä Excel-pohjaisella työkalulla voidaan jatkossa mitoittaa ilmastustorneja eri haitta-aineiden poistoa varten syöttämällä tarvittavat ainekohtaiset lähtötiedot.

Avainsanat: ilmastus, ilmastustorni, ilmastustornin suunnittelu, aineensiirto, talousveden käsittely, täytekappaleetorni

Abstract

Author(s): Alessia Hausmann
Title: Design instruction for an Aeration tower
Number of Pages: 40 pages + 4 appendices
Date: 20 August 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Biotechnology and Chemical Engineering
Specialisation option: Chemical Engineering
Instructor(s): Johanna Herttuainen, Project engineer
Timo Seuranen, Senior Lecturer

The purpose of this thesis was to create a calculation tool and instructions for the design of an aeration tower for the Process Design Unit of AFRY Finland Oy's Water Treatment Department. The thesis was conducted as a literature review. It focused on aeration towers for drinking water plants and the removal of contaminants which are commonly found in groundwaters.

Aeration towers are used in water utilities to improve the quality of treated water. Groundwater is often acidic due to the excessive amount of dissolved carbon dioxide and the water can also contain radon, iron, manganese and various volatile organic compounds. These compounds can be removed from the water by utilizing mass transfer between the liquid and gas phases and the oxygen in the air oxidizes iron and manganese to an insoluble form which then can be removed further in the purification process.

Among other things, the general structure of an aeration tower, packing material options, gas transfer in liquid and its physical and chemical impacts on water were reviewed in this thesis. Carbon dioxide was used as a design example for a compound to be removed.

As an end result, calculations were made for the air-water ratio required for the removal of the necessary amount of carbon dioxide, the cross sectional area, diameter and packing material height of the tower, and the different mass transfer coefficients required for the design process.

With the resulting Excel-based tool, the aeration tower sizing can be made for various contaminants by entering the required input data.

Keywords: aeration, aeration tower, aeration tower design, mass transfer, water treatment, packed column

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Ilmastus pohjavedenkäsittelylaitoksilla	1
3	Pohjaveden käyttö talousveden valmistuksessa	3
3.1	Hiilidioksidin vaikutus veden pH:hon	4
3.2	Radon	6
3.3	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet	7
3.4	Raudan ja mangaanin haitat	8
3.5	Raudan ja mangaanin poisto ilmastuksella	8
4	Kaasun siirtyminen vedessä	9
4.1	Kaksoisfilmitheoria	9
4.2	Henryn laki	10
4.3	Henryn vakio	10
5	Ilmastustorni	13
5.1	Ilmastustornin toimintaperiaate	14
5.2	Täytekappaleet	15
5.3	Täytekappaleiden vaikuttavat tekijät mitoituksessa	16
6	Ilmastustornin mitoituksen pääperiaatteet	18
6.1	Ilmastustornin ainetaseet	20
6.2	Ilma-vesisuhde	21
6.3	Painehäviö	23
6.4	Tornin poikkipinta-alan ja halkaisijan määrittäminen	25
6.5	Volumetrinen aineensiirtokerroin k_L	26
6.6	Aineensiirtokertoimien määrittäminen Ondan korrelaation avulla	26
6.7	Tornin korkeuden määrittäminen	32
7	Laskentamallin kehitys	32
8	Yhteenveto	34
	Lähteet	36

Liitteet

Liite 1: Teoreettinen ilmantarve raudan ja mangaanin hapetuksessa

Liite 2: Laskennallisesti määritelty ilmastustornin pinta-ala ja halkaisija

Liite 3: Painehäviökuvaajan avulla määritelty tornin pinta-ala ja halkaisija

Liite 4: Volumetrisen aineensiirtokertoimen KLa esimerkkilasku

Lyhenteet

MTBE	Metyyli-tert-butyylieetteri, bensiinissä käytettävä oktaanilukua nostattava apuaine
STP	Standardi lämpötila ja paineolosuhteet kaasuille
VOC	Volatile organic compounds, haihtuvat orgaaniset yhdisteet

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli kehittää AFRY Finland Oy:lle Excel-pohjainen laskentatyökalu, jonka avulla voidaan mitoittaa vesilaitoksilla käytettäviä ilmastustorneja. Mitoituksessa määritellään tornin poikkipinta-ala ja halkaisija, täytekappalekorkeus, ilma-vesisuhde ja poistettavan aineen toivottu loppupitoisuus käsitellyssä vedessä.

Ilmastustorneja käytetään yleensä niillä vesilaitoksilla, jotka käyttävät raakavetenään pohjavettä- tai tekopohjavettä, sillä hiilidioksidipitoisuus ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden, eli VOC-yhdisteiden, määrät ovat pohjavesissä usein korkeampia kuin pintavesissä. Liiallinen hiilidioksidi aiheuttaa vedessä monesti liian matalan pH:n ja VOC-yhdisteet terveystahaittoja tai pahaa hajua ja makua veteen. Lisäksi pohjavesissä voi olla korkeat rauta- ja mangaanipitoisuudet, joita voidaan poistaa hapettamalla vettä ilman avulla.

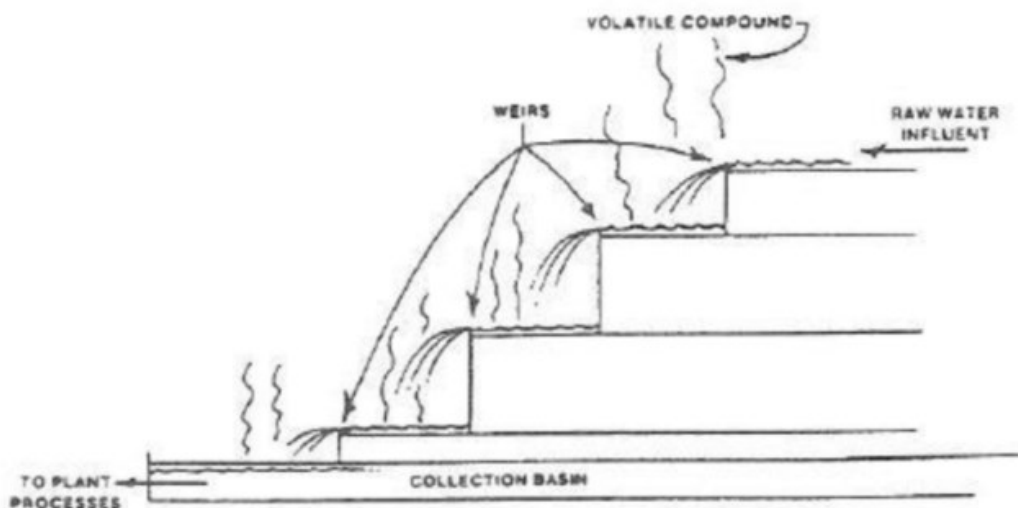
Vesilaitoksen kemikaalikuormaa voidaan myös vähentää, jos pH:ta voidaan nostaa kemikaalien sijaan ilmastustornin avulla. Ilmastustorni vie myös vähemmän lattiapinta-alaa verrattuna moniin muihin ilmastusratkaisuihin.

2 Ilmastus pohjavedenkäsittelylaitoksilla

Ilmastusta käytetään talousvettä toimittavilla pohjavesilaitoksilla parantamaan käsiteltävän veden laatua. Ilmastuksella voidaan poistaa vedestä kaasuja, kuten hiilidioksidia, radonia, haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, hajua ja makua aiheuttavia yhdisteitä, nostaa pH:ta, lisätä veden happimäärää ja hapettaa näin rauta- ja mangaaniyhdisteitä liukenemattomaan muotoon, jotta ne voidaan myöhemmissä prosessivaiheissa helpommin poistaa. [1, s. 366-367.]

Ilmastuksessa voidaan käyttää monenlaisia laitteita, joista yleisimmin käytettäviä ovat seuraavat:

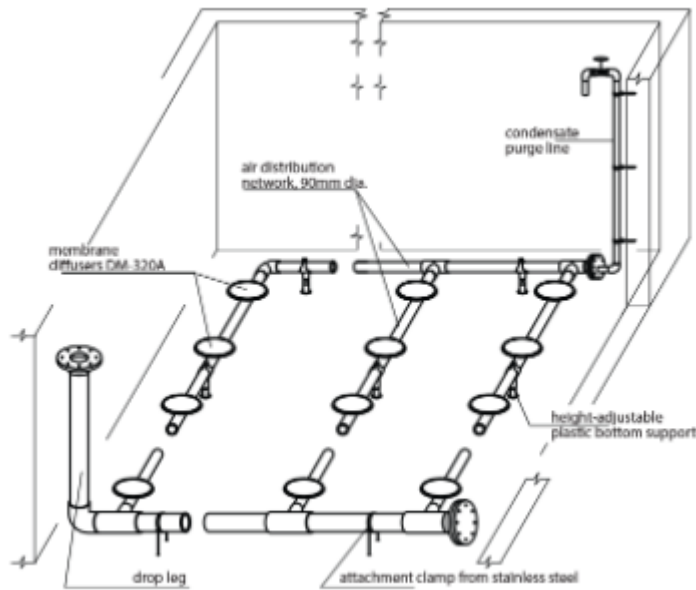
Kaskadi- ja valutusilmastimet. Valutusilmastimissa vesi valuu painovoimaisesti tasolta tai kourulta toiselle ja kaskadi-ilmastimissa portaalta toiselle. Valutusilmastimet ovat hyvä vaihtoehto silloin, kun ilman pumppauksen tarvetta on käytettävissä tarpeeksi korkeuseroa [1, s. 372].



Kuva 1. Kaskadi-ilmastimen toimintaperiaate [2].

Suihkutusilmastimet, joissa vettä suihkutetaan pieninä pisaroina ilmaan erilaisilla suittimilla ja luodaan näin paljon kontaktipinta-alaa ilmalle ja vedelle. Vettä voidaan suihkuttaa myös ohuena kerroksena pintaa pitkin, jolloin saavutetaan sama efekti kontaktipinta-alan suhteen [1, s. 373].

Diffuusio- eli kuplailmastimet, jotka voidaan jakaa hieno- ja karkeakuplailmastiimiin. Diffuusioilmastimissa ilmaa johdetaan pieninä kuplina esimerkiksi vesialtaan pohjalta yllä olevaan veteen [1, s. 375].



Kuva 2. Diffuusioilmastin [3].

Täytekappaleilla täytetyt ilmastustornit ovat nimensä mukaisesti korkeita sylinterin muotoisia onttoja säiliöitä, jotka on täytetty sattumanvaraisesti pienillä muovisilla, keraamisilla tai teräksisillä täytekappaleilla, jotka luovat kontaktipinta-alaa kaasunsiirollle. Vesi ja ilma voidaan pumpata joko vasta-, myötä- tai ristivirtaan toisiinsa nähden [1, s. 367].

3 Pohjaveden käyttö talousveden valmistuksessa

Pohjaveden osuus suomalaisille valmistetusta talousvedestä on noin 65 %. Pohjaveden käyttöä puoltaa sen vähäinen käsittelyn tarve, sillä pohjavesi on monesti juomakelpoista ilman käsittelyäkin [4].

Suomen sosiaali- ja terveysministeriö on asettanut talousvedelle laatuvaatimukset ja tavoitteet, joihin kaikkien vesilaitosten tulee toimitettavan veden osalta ylittää taulukon 1. mukaisesti.

Taulukko 1. Sosiaali- ja terveysministeriön talousvedelle asettamia laatusuosituksia ja suositeltuja enimmäisarvoja. [5.]

pH (tavoitearvo)	6,5 – 9,5
Rauta (enimmäisarvo)	200 µg/l
Mangaani (enimmäisarvo)	50 µg/l
Radon (enimmäisarvo)	300 Bq/l

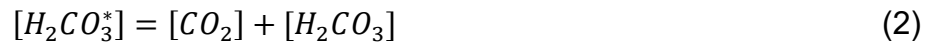
Pohjavedet ovat Suomessa monesti happamia ja niiden pH-arvo voi vaihdella välillä 3,6–9 riippuen geologisista tekijöistä ja ihmisen toiminnan vaikutuksista. Happamuus johtuu liiallisesta hiilidioksidin määrästä vedessä, mikä aiheuttaa vedelle myös alhaista alkaliteettiä. Happamuus, matala alkaliteetti ja liian korkeat sulfaatti- ja kloridipitoisuudet aiheuttavat vesijohtoverkoston ja laitteiden korroosiota. Veden pH:n tulisi olla yli 7,5 ja alkaliteetin yli 0,6 mmol/l, sulfaattipitoisuuden alle 150 mg/l ja kloridipitoisuuden alle 25 mg/l, jotta syövyttävältä vaikutukselta vältyttäisiin. Liiallinen raudan ja mangaanin määrä vedessä aiheuttavat veteen väri- ja makuhaittoja, ja ne voivat myös värjätä pyykkiä ja kylpyhuoneen keraamisia kalusteita. Molemmat edistävät myös vesijohtoverkoston korroosiota. [6.] Mangaani on lisäksi uudempien tutkimusten mukaan todettu myös terveydelle haitalliseksi neurotoksiiniksi, joka voi aiheuttaa etenkin lapsille oppimis- ja käyttäytymishäiriöitä, kun juomavedenpitoisuus on mangaanin osalta yli 100 µg/l. [7.]

3.1 Hiilidioksidin vaikutus veden pH:hon

Hiilidioksidi muodostaa veden kanssa hapanta hiilihappoa seuraavan reaktioyhtälön (1) mukaisesti.



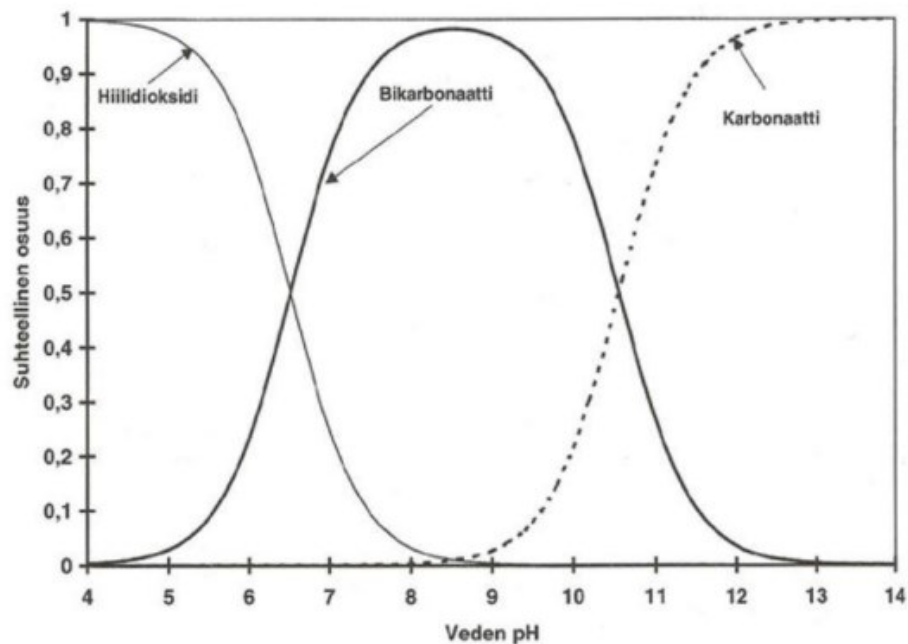
Hiilihapon ja hiilidioksidin määrien välillä vallitsevia suhteita vedessä on vaikea määrittellä, joten voidaan ilmaista, että hiilihapon lisäksi vedessä on aina myös vapaata liuennutta hiilidioksidia kaavan (2) mukaisesti. [8.]



Hiilihappo muodostaa vedessä edelleen bikarbonaatti-ioneja (3) ja bikarbonaatti-ionit edelleen karbonaatti-ioneja (4). Molempien reaktioiden yhteydessä vapautuu vetyioneja, jotka edelleen reagoidessaan veden kanssa aiheuttavat oksoniumionien muodostumisen ja veden pH:n laskun (5). [8.]



Veden sisältämä hiilidioksidin, bikarbonaatin ja karbonaatin suhteelliset osuudet ovat kytköksissä pH:hon. Veden pH:n ollessa 6–7 ovat vapaan hiilidioksidin ja bikarbonaatin osuudet vedessä n. 50 % – 50 %. Kun hiilidioksidin määrä vähenee, kasvaa bikarbonaatin osuus vedessä ja pH:n ollessa n. 8,3 ei vapaata hiilidioksidia käytännössä enää ole, vaan vedessä on ainoastaan bikarbonaattia ja karbonaattia, joiden suhteelliset osuudet muuttuvat pH:n noustessa. [9.]



Kuva 3. Hiilidioksidin, bikarbonaatin ja karbonaatin suhteelliset osuudet suhteessa pH:hon [9].

Veden sanotaan olevan aggressiivista vettä, kun vapaata hiilidioksidia on enemmän, kuin veden kalkki-hiilidioksiditasapaino edellyttää. Teoriassa veden hiilidioksidipitoisuus voidaan ilmastuksella laskea pitoisuuteen 0,5 mg/l lämpötilan ollessa 20 °C, mutta yleensä se ei ole taloudellisesti järkevää, vaan voidaan tyytyä suurempiin pitoisuuksiin. [10.]

3.2 Radon

Suomen pohjavesissä radonpitoisuudet ovat Euroopan korkeimpia. Kohonneita pitoisuuksia todetaan kuitenkin lähinnä yksityisissä porakaivoissa ja pienemmillä vesilaitoksilla, jotka käyttävät vesilähteenään kalliopohjavettä. Radon haihtuu helposti ilmaan, jolloin sitä voidaan poistaa raakavedestä tehokkaasti ilmastamalla, ja poistotehokkuudessa voidaan päästä yli 90 %:iin, kun ilmastus on suunniteltu nimenomaan radonin poistoa varten. Radonin poisto on yleensä

myös riittävän tehokasta, jos poistotehokkuutta tarkastellaan ilmastusprosessissa, joka on suunniteltu esimerkiksi hiilidioksidin tai raudan ja mangaanin poistoon. [11.]

Radon on inertti kaasu, eikä se juurikaan liukene veteen. Radonin höyrynpaine on myös korkea, jolloin se poistuu helposti vedestä kaasufaasiin. Näiden ominaisuuksien takia radonia ei juurikaan esiinny ilman kanssa kosketuksissa olevissa pintavesissä. [11.]

Radonpitoisuus ilmoitetaan yksikössä Bq/l, eli bequerelia per litra. Bequerel on säteilyn voimakkuutta mittaava yksikkö ja yksi bequerel tarkoittaa yhden atomin ytimen virityksen purkautumista yhdessä sekunnissa [12].

Yksi bequerel vastaa n. 18:ta femtogrammaa ($1,8 \times 10^{-16}$ g), eli määrä on hyvin pieni [12].

3.3 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet

Haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, eli VOC-yhdisteitä, kulkeutuu pohjavesiin pilaantuneesta maaperästä. Maaperään voi joutua haitallisia aineita esimerkiksi teollisuusalueilta, huoltoasemilta, romuttamoilta tai torjunta-aineita käytettäessä. [13.]

VOC-yhdisteiksi määritellään yhdisteet, joiden höyrynpaine on vähintään 0,01 kPa 20 °C lämpötilassa ja niiden kiehumispiste on alle 250 °C normaalissa ilmanpaineessa [14].

Yleisimpiä pohjavesien saastumista aiheuttavia yhdisteitä ovat bensiini ja MTBE (benssiinissä käytettävä oktaanilukua nostattava apuaine). Vedenkäsittelyssä tehokkaimmiksi tavoiksi vähentää VOC-yhdisteitä on käyttää joko ilmastustornia tai aktiivihiihluodatus, tai näiden yhdistelmää, jolloin ilmastustornissa poistuu suurin osa haitallisista yhdisteistä ja aktiivihiihluodatus viimeistelee puhdistuksen. [15.]

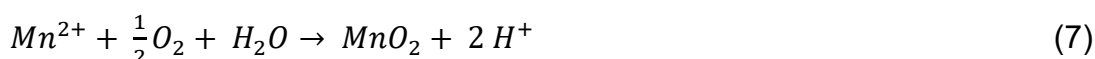
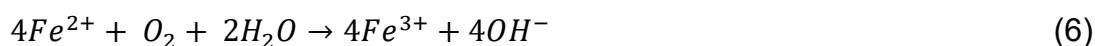
3.4 Raudan ja mangaanin haitat

Raudan ja mangaanin löytyminen pohjavedestä on erittäin yleistä koko Suomen alueella. Raudasta ei aiheudu ihmisille terveyshaittaa, mutta mangaanin on tutkittu olevan etenkin lapsille haitallinen aiheuttaen oppimis- ja käytöshäiriöitä [7].

Raudan ja mangaanin kuluttajille näkyvät haitat ovat lisäksi esteettisiä, kuten veden kanssa tekemisissä olevien kalusteiden ja pyykkien värjäytymistä. Saostumat aiheuttavat myös korroosiota vesijohtoverkostoissa, ja sameus saattaa heikentää desinfiointikykyä esimerkiksi UV-desinfioinnin yhteydessä. [1, s. 347.]

3.5 Raudan ja mangaanin poisto ilmastuksella

Ilmastuksella pyritään hapettamaan liuenneessa muodossa olevat rauta ja mangaani saostuvaan muotoon. Syntynyt sakka voidaan poistaa esimerkiksi hiekka-suodatuksella vedenkäsittelyn seuraavassa vaiheessa. Kemiaalliset hapettumisreaktiot vedessä on esitetty kaavoissa (6) ja (7)



Mangaanin saostus pelkällä ilmastuksella on huomattavasti vaikeampaa kuin raudan, sillä hapettuaikseen veden pH:n tulisi olla vähintään 9,5, joka harvoin saavutetaan pelkällä ilmastuksella. Tällöinkin veden viipymäaika on pitkä, sillä mangaani hapettuu pelkällä hapella hitaasti. Rauta hapettuu parhaiten pH:n ollessa 7,5-8 [16]. Mangaanin hapettumista voidaan tehostaa kemiallisesti nostamalla pH:ta esim. natriumhydroksidilla eli lipeällä tai käyttämällä lisäksi kemiallisia hapettimia. Tarvittavan ilmamäärän lasku on esitetty liitteessä 1.

4 Kaasun siirtyminen vedessä

Kaasufaasissa olevan komponentin siirtymistä nestefaasiin kutsutaan absorptioksi ja päinvastaista ilmiötä desorptioksi, jota kutsutaan myös strippaukseksi. Raudan ja mangaanin saostaminen perustuu absorptioon ja absorptiota hyödynnetään esimerkiksi vähähappisten pohjavesien hapetuksessa. Strippauksen avulla vedestä voidaan poistaa haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, hiilidioksidia, radonia, rikkivetyä, ammoniakkaa, hajuja ja makua. [1, s. 366-367.]

Absorptio ja desorptio perustuvat diffuusion, jossa ainepitoisuudet pyrkivät tasanapainoon faaseissa niin, että aine siirtyy suuremmasta konsentraatiosta pienemmän konsentraation suuntaan. Aineensiirtoa voidaan tehostaa sekoituksella, sillä diffuusio itsessään on hidasta. Diffuusiota voidaan selittää Fickin diffuusiolailla. [15.]

$$J = -D * \frac{dC}{dx} \quad (8)$$

jossa,

J = siirtyvä moolimäärä pinta-alaa kohden, (moolia / m² * s)

D = diffuusiokerroin, (m² / s)

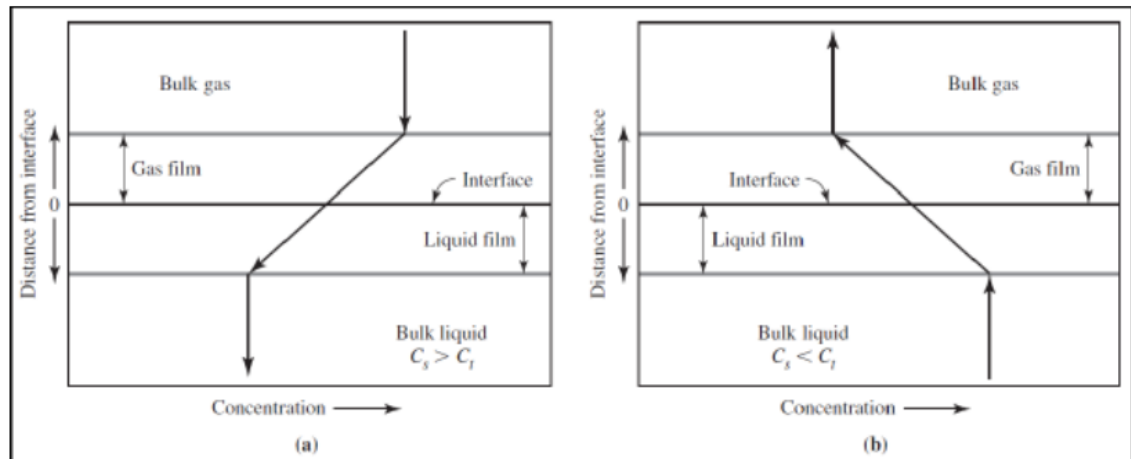
dC = konsentraatioero (moolia/m³)

dx = diffuusion suunta.

4.1 Kaksoisfilmitheoria

Kaasu- ja vesifaasien välistä aineensiirtoa on yleisimmin selitetty kaksoisfilmitheoriolla (Whitman, Lewis 1924). Kaksoisfilmitheoriassa kaasu- ja nestefaasin välissä on kaksi ohutta laminaarikerrosta joiden välissä on faasien rajapinta. Laminaarikerrokset, eli kaksoisfilmi, luovat aineensiirrolle vastuksen. Kaksoisfilmin ulkopuolella on niin sanotut bulkkifaasit, joissa tapahtuu aineenvirtausta. Virtaus filmien välissä on pelkästään laminaarista.

Absorptiossa kaasumolekyylin siirtyminen nestefaasiin kulkee siis reitin kaasufaasi – kaasufilmi – nestefilmi – nestefaasi ja desorptiossa toiseen suuntaan. Kaasua siirtyy nesteeseen, mikäli nesteen saturaatiokonsentraatiota kaasun suhteen ei ole vielä saavutettu. Siirtymisen katsotaan tapahtuvan rajapinnalla vain molekulaarisen diffuusion kautta. [17, s. 16-31.]



Kuva 4. Kaksoisfilmiteoriaa havainnollistava kuva [17, s. 16-31].

4.2 Henryn laki

Henryn lain mukaan nesteeseen liukenevan kaasun määrä on suoraan suhteessa kaasun osapaineeseen nesteen yläpuolella. Tätä suhdetta kuvaava termi on Henryn vakio. Henryn vakion lukuarvo vaihtelee riippuen sen ilmoitustavasta, ja näin ollen myös vakion yksikkö on esitystavasta riippuen eri. Henryn vakio vaihtelee myös lämpötilan mukaan, sillä kaasujen liukoisuus vähenee lämpötilan noustessa. Vakio ilmoitetaan yhdelle kaasu-nesteparille kerrallaan, kuten esimerkiksi hiilidioksidi-vesiliuokselle. [18.]

4.3 Henryn vakio

Henryn vakio kertoo kyseisen kaasun potentiaaloin poistua nesteestä kaasunsiirron avulla. Mitä korkeampi lukuarvo on, sitä helpommin kaasu on poistettavissa. Kaasu- ja nestefaasin tasapainotilaa voidaan kuvata yhtälöllä (9)

$$K_{eq} = \frac{a_{air}}{a_{aq}} \quad (9)$$

jossa,

K_{eq} = tasapainovakio

a_{air} = komponentti A:n aktiivisuus ilmafaasissa

a_{aq} = komponentti A:n aktiivisuus nestefaasissa

Normaalissa ilmanpaineessa kaasu käyttäytyy ideaalisesti, joten yhtälö (9) voidaan muuttaa muotoon:

$$H = K_{eq} = \frac{P_A}{\gamma_A \cdot A} \quad (10)$$

jossa,

H = komponentti A:n Henryn vakio (atm-L/mooli)

P_A = paine, jonka komponentti A aiheuttaa kaasufaasissa

γ_A = komponentti A:n aktiivisuuskertoimen vesifaasissa

A = A:n moolikonsentraatio vesifaasissa (mooli/L)

Henryn vakio voidaan ilmoittaa myös muissa yksiköissä [18, s. 6.3].

1. atm, kun A komponentin kaasufaasin konsentraatio on ilmoitettu atmosfääreissä ja nestefaasin konsentraatio mooliosuutena
2. L*atm/mooli, kun A komponentin kaasufaasin konsentraatio on esitetty atmosfääreissä ja nestefaasin pitoisuus moolia/L nestettä
3. yksikötön, kun sekä kaasu- että nestefaasin pitoisuudet on ilmoitettu samalla konsentraatioyksiköllä.

Henryn vakioiden yksikkömuunnoksia voidaan laskea kuvan 5 kaavojen avulla.

TABLE 6-1 Unit Conversions for Henry's Law Constants

$$H(L_{\text{H}_2\text{O}}/L_{\text{Air}}) = \frac{H\left(\frac{\text{L}\cdot\text{atm}}{\text{mol}}\right)}{RT}$$

$$H\left(\frac{\text{L}\cdot\text{atm}}{\text{mol}}\right) = H(L_{\text{H}_2\text{O}}/L_{\text{Air}}) \times RT$$

$$H(L_{\text{H}_2\text{O}}/L_{\text{Air}}) = \frac{H(\text{atm})}{RT \times 55.6 \frac{\text{molH}_2\text{O}}{\text{LH}_2\text{O}}}$$

$$H\left(\frac{\text{L}\cdot\text{atm}}{\text{mol}}\right) = \frac{H(\text{atm})}{55.6 \frac{\text{molH}_2\text{O}}{\text{LH}_2\text{O}}}$$

$$H(\text{atm}) = H\left(\frac{\text{L}\cdot\text{atm}}{\text{mol}}\right) \times 55.6 \frac{\text{molH}_2\text{O}}{\text{LH}_2\text{O}}$$

$$H(\text{atm}) = H(L_{\text{H}_2\text{O}}/L_{\text{Air}}) \times RT \times 55.6 \frac{\text{molH}_2\text{O}}{\text{LH}_2\text{O}}$$

$$R = 0.08205 \frac{\text{atm}\cdot\text{L}}{\text{mol}\cdot\text{K}} \quad T = \text{K}$$

Kuva 5. Henryn vakioiden yksikkömuunnosten kaavoja [18, s. 6.5].

Henryn vakioiden arvot vaihtelevat riippuen käytetyistä lähteistä ja metodeista, joilla ne arvioitu. Seuraavissa taulukossa 2. ja 3. on arvoja niin kirjallisuudesta kuin verkkolähteistä yksiköissä atm ja yksikötön eri lämpötiloissa. Osa arvoista on laskettu kuvassa 5 esitetyillä kaavoilla. Osalle aineista ei löytynyt Henryn vakioita tietyissä lämpötiloissa.

Taulukko 2. Pohjavedestä usein löytyvien yhdisteiden Henryn vakioita lämpötiloissa 0 ja 4 °C [17;18;19;20].

Yhdiste	0 °C		4 °C	
	atm	yksikötön	atm	yksikötön
CO ₂	793	0,58	875	0,68
Radon			2778	2,23
MTBE	12,46	0,01		

Taulukossa 3. esitetään lisäksi trikloorietyleenin Henryn vakioita korkeammissa lämpötiloissa.

Taulukko 3. Pohjavedestä usein löytyvien yhdisteiden Henryn vakioita lämpötiloissa 10 ja 20 °C [17;18;19;20].

Yhdiste	10 °C		20 °C	
	atm	yksikötön	atm	yksikötön
CO ₂	1072	0,81	1420	1,1
Radon			5084	4,08
MTBE	21,18	0,017	27,41	0,022
TCE (trikloorietyleeni)	295,33	0,237	550	0,35

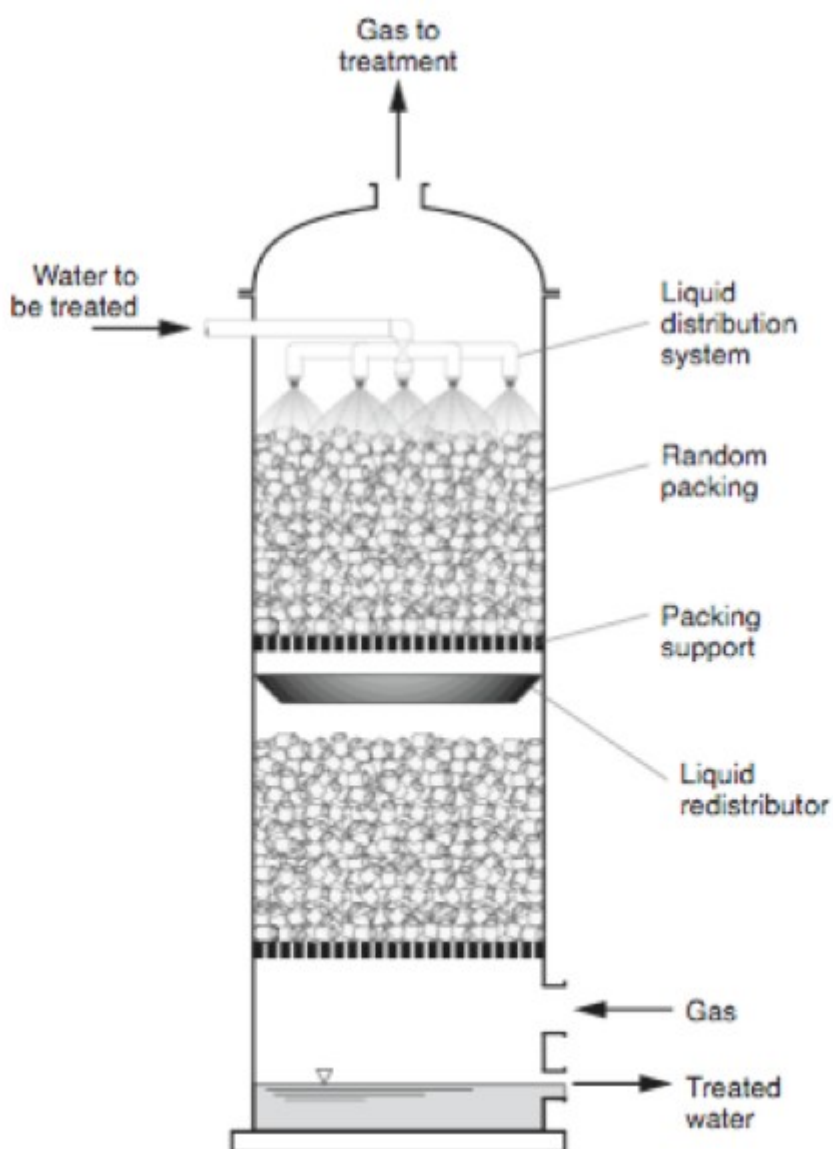
5 Ilmastustorni

Ilmastustorni valitaan useimmiten vedenkäsittelylaitoksen prosessiin silloin, kun käsiteltävästä vedestä halutaan poistaa muiden yhdisteiden lisäksi VOC-yhdisteitä, jotka vaativat poistukseen suuren ilma-vesisuhteen. Hiilidioksidin poisto ilmastuksella on kannattavampaa kalkkikäsittelyn sijaan, silloin kun hiilidioksidipitoisuus on vedessä yli 10–15 mg/l [17, s. 4-12].

5.1 Ilmastustornin toimintaperiaate

Vesi pumpataan tornin yläosaan, josta se jaotellaan esimerkiksi suihkutussuutinten tai kouruston avulla tasaisesti täytekappaleiden päälle. Nyrkkisääntönä voidaan sanoa, että tarvitaan 100 erillistä vesilinjaa/m². Torni on täytetty täytekappaleilla, jotka tarjoavat tarvittavan kontaktipinta-alan veden ja kaasun väliselle aineensiirrolle. Riippuen tornin korkeudesta (yli 10m), voidaan tarvita nesteenjakaja jakamaan uudelleen käsiteltävä vesi tasaisesti täytekappaleiden päälle, koska vesi voi kanavoitua kulkemaan täytekappaleiden seassa pitkällä matkalla epätasaisesti esimerkiksi tornin reunoja pitkin. [21, s. 1101.]

Täytekappaleita tukee taso, josta vesi pääsee virtaamaan tornin alaosaan ja alhaalta puhallettava ilma kulkeutumaan ylös. Puhdistettu vesi poistuu tornin alaosasta. Täytekappaleiden yläpuolelle voidaan myös asentaa taso, joka estää kappaleiden liikkumisen suuremmilla ilmavirtauksilla tai tornin tulviessa. Ilma ja sen sisältämät haitta-aineet poistuvat tornin yläosasta ulos. Tornin yläosaan voidaan sijoittaa lisäksi suodatin, joka estää höyrypisaroiden kulkeutumisen ilman mukana pois. Mikäli ilmastuksella poistetaan radonia tai muita haitallisia kaasuja, poistoilma tulee ohjata rakennuksesta ulkoilmaan.



Kuva 6. Ilmastustornin rakenteet pääpiirteittäin [22, s. 1164].

5.2 Täytekkappaleet

Täytekkappaleiden tarkoituksena on tuoda tornin sisälle paljon kontakti pinta-alaa kaasun ja nesteen väliselle aineensiirrolle. Täytekkappaleiden pinta-ala riippuu kappaleiden koosta ja muodosta. Mitä pienempiä kappaleita, sitä suurempi kosketuspinta-ala kokonaisuudessaan on, mutta samalla tornin painehäviö kasvaa, mikä voi johtaa kustannusten nousuun tornin operoinnissa ja aiheuttaa helpommin tornin tulvimista [18].

Täytekkappaleiden materiaaleina voidaan käyttää muovia, keraamia tai metallia. Keraamiset täytekkappaleet kestävät hyvin syövyttäviä aineita, mutta voimakkaasti alkaliset aineet vaurioittavat sitä. Muovi kestää suhteellisen hyvin syövyttäviä aineita, mutta vaurioituu korkeissa lämpötiloissa [23, s. 766]. Pohjaveden ollessa kuitenkin pääsääntöisesti Suomessa hyvinkin viileää on muovi materiaaleista käytetyin pohjavesien ilmastuksessa, sillä se on kevyttä ja edullista.

5.3 Täytekkappaleiden vaikuttavat tekijät mitoituksessa

Täytekkappaleiden koon valinta riippuu poistettavan yhdisteen ominaisuuksista, tornin halkaisijasta ja täytekkappaleille ominaisista parametreista, joita ovat pinta-ala suhteessa tilavuuteen m^2/m^3 ja pakkaustekijä [23, s. 768].

Pakkaustekijä vaikuttaa tornin kokoon ja painehäviöön. Pakkaustekijä on sitä suurempi mitä enemmän kappaleella on pinta-alaa. Tarkat lukuarvot saadaan yleensä täytekkappaleiden valmistajilta [23, s. 766].

Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että täytekkappaleet eivät saisi koon puolesta olla isompia kuin 1/12–20 osa tornin halkaisijasta, sillä muutoin vesi voi kanavoitua tornissa epätasaisesti ja puhdistustulos heikentyy [23, s. 768].



Kuva 7. Tyypillisesti käytettyjä täytekappaleita. [20]

Tässä insinööriyössä käytettiin referenssinä RVT Process Equipmentin valmistamia pakkausmateriaaleja, jotka ovat Suomen vesilaitoksilla olleet yleisesti käytössä. Sähköpostikonsultaation avulla selvisi halkaisijakohtaiset pakkaustekijät (suluissa) kyseisen yrityksen valmistamille Hiflow ring -täytekappaleille: 0,015m (200 m⁻¹), 0,025m (108 m⁻¹), 0,038m (80-100 m⁻¹) ja 0,05m (50 m⁻¹). [24.]

Hiflow[®] ring

type size	bulk density kg/m ³	surface area m ² /m ³	void fraction in %
Ceramics			
20-4	693	280	71
35-5	658	128	73
50-6	466	102	81
75-9	485	70	80

Weight data refer to porcelain

Plastics			
15-7	77	313	91
25-7	90	214	91
38-1	51	150	94
50-0	48	110	94
50-3	52	95	94
50-6	44	90	94
90-7	27	76	97

Weight data refer to polypropylene

Metals			
25-5	372	185	95
28-5	372	185	95
38-5	255	145	96
40-5	244	143	97
50-5	175	95	98
110-8	147	52	98

Weight data refer to stainless steel 1.4301 (AISI 304)
with 0.5 mm and 0.8 mm wall thickness

2

Kuva 8. RVT:n valmistamien Hiflow ring -pakkausmateriaalien suunnitteluparametreja [25].

6 Ilmastustornin mitoituksen pääperiaatteet

Ilmastustornia suunniteltaessa tarkoituksena on saada mitoiltaan ja tehontarpeeltaan optimaalinen ja käyttökustannuksiltaan taloudellinen kokonaisuus, jolla saadaan toivottu puhdistustulos aikaan.

Mitoituksessa määritellään ilma-vesisuhde, tornin halkaisija ja täytekappalekorkeus. Muita mitoitukseen vaikuttavia asioita ovat täytekappaleiden ja painehäviön valinta.

Seuraavissa kappaleissa mitoitetaan esimerkinomaisesti ilmastustorni hiilidioksidin poistoa varten. Mitoitus voidaan tehdä yhdelle poistettavalle aineelle kerrallaan. Jos poistettavia aineita on monia, voidaan karkeasti sanoa, että se yhdiste, jolla on matalin Henryn vakio, määrittää ilma-vesisuhteen ja yhdiste, jolla on korkein Henryn vakio, määrittää täytekappalekorkeuden [18, s. 6.29].

Mitoituksessa käytetään seuraavia taulukon 4. lähtötietoja. Hiilidioksidin tavoitepitoisuus perustuu puhdistusprosessin teoreettiseen seuraavaan vaiheeseen, jossa kalkkikivialkalointi kuluttaa hiilidioksidia.

Taulukko 4. Lähtötiedot

Veden lämpötila	10	°C
Käsiteltävän veden hiilidioksidipitoisuus (C_0)	32000	$\mu\text{g/l}$
Käsitellyn veden hiilidioksidipitoisuus (C_e)	8000	$\mu\text{g/l}$
Veden virtaama	0,023	m^3/s
Täytemateriaali:	Plastic Hiflow ring	
Halkaisija (d_p)	0,015	m
Pinta-ala (a_t)	313	m^2/m^3
Pintajännitys (muovi) (σ_c)	0,033	N/m
Pakkaustekijä (C_f)	200	m^{-1}
Painehäviö ($\Delta_{P/L}$)	100	$\text{N}/\text{m}^2/\text{m}$
Maan vetovoima (g)	9,81	m^2/s
Ilman moolimassa	28,97	g/mol
Ilma tiheys (ρ_g)	1,204	kg/m^3
Ilman viskositeetti (μ_g)	0,0000175	$\text{N}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$
Veden tiheys (ρ_l)	999,7	kg/m^3

Veden viskositeetti (μ_l)	0,0015	N/m ² *s
Veden pintajännitys (σ)	0,0735	N/m
Hiilidioksidin moolimassa	44,01	g/mol
Hiilidioksidin moolitilavuus kiehumispisteessä (V_b)	33,4	cm ³ /mol
Hiilidioksidin kiehumispiste	-78,4	°C
Henryn vakio (H, yksikötön)	0,81	

6.1 Ilmastustornin ainetaseet

Oletuksella, että ilmastustornissa saavutetaan Henryn vakion mukainen tasapaino, voidaan ainetase määrittellä seuraavasti [20].

$$LC_0 + Gy_0 = LC_e + Gy \quad (11)$$

jossa,

L = tulevan nesteen moolimäärä / aika

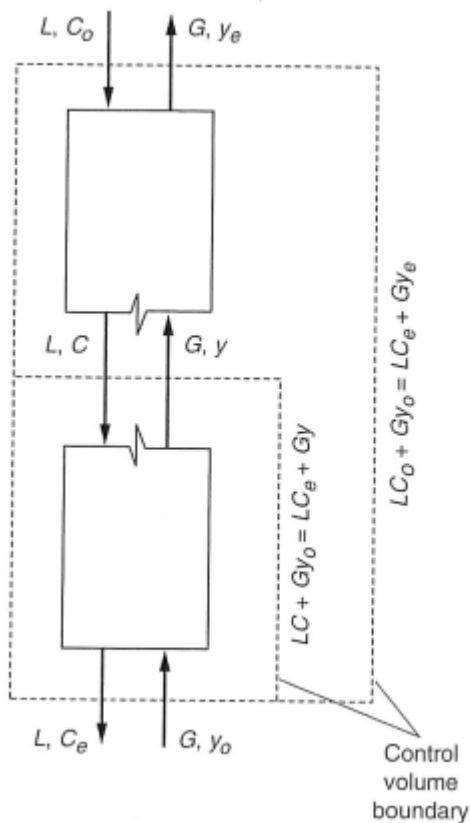
C_0 = yhdisteen konsentraatio nesteessä missä tahansa vaiheessa moolia yhdistettä/moolia nestettä

G = tulevan kaasun moolimäärä / aika

y_0 = yhdisteen konsentraatio tulevassa kaasussa, moolia yhdistettä / moolia puhdasta kaasua

C_e = yhdisteen konsentraatio lähtevässä vedessä, moolia yhdistettä / moolia vettä

y = yhdisteen konsentraatio kaasussa missä tahansa vaiheessa moolia yhdistettä/moolia kaasua



Kuva 9. Ilmastustornin ainetaseet [20].

6.2 Ilma-vesisuhde

Ilma-vesisuhde säätelee poistettavan yhdisteen poistoastetta. Mitä suurempi il-
mamäärä, sitä parempi poistoaste yleensä saavutetaan. Tarvittava ilmamäärä
lasketaan poistettavan yhdisteen lähtöpitoisuuden, tavoitepitoisuuden ja Henryn
vakion määrittelemän poistumispotentiaalilla avulla. Ilmamäärää voidaan kasvat-
taa aina siihen pisteeseen asti, kunnes ilman vastus aiheuttaa veden virtaa-
malle liian suuren esteen, ja vesi alkaa kerääntyä tornin yläosaan ja torni alkaa
tulvia. [26.]

Pohjavedet ovat Suomessa viileitä, n. 3–12 °C riippuen vuodenaikasta tai sijain-
nista [27]. Tällöin ilma-vesisuhteessa tulee varautua suurempiin määriin, kun

tornin koko pysyy samana, kuin mitä vaadittaisiin esimerkiksi lämpimimpien pintavesien käsittelyssä johtuen kaasun liukoisuuden ja lämpötilan riippuvuudesta ja muuttuneesta Henryn vakioista.

Voidaan sanoa, että yhdisteiden Henryn vakiot, jotka ovat yli 500 atm (0,37 yksikötön) ovat itsestään haihtuvia. Sen sijaan yhdisteet, joiden Henryn vakio on 0,1 atm ($7,5 \cdot 10^{-5}$ yksikötön), eivät ole strippauksella poistettavissa. [20.]

Hiilidioksidi kuuluu itsestään ajan kanssa haihtuviin yhdisteisiin, jolloin tarvittava ilma-vesisuhde ei ole yhtä suuri kuin joillakin VOC-yhdisteillä. Hiilidioksidin määrä ilmassa on n. 0,032 %, joten hiilidioksidin täydellistä poistoa vedestä ilman avulla ei voida saavuttaa. Veden ja ilman ollessa 10 °C on hiilidioksidipitoisuus tasapainotilassa vedessä 0,79 mg/l [28].

Ilma-vesisuhteessa määritellään ensin minimi ilma-vesisuhde kaavan 12 mukaan, jonka jälkeen käytetään korjauskerrointa vastaamaan käytännön tasoa [18, s. 6.20]. Korjauskerrointa kutsutaan myös strippauskerroimeksi.

$$(V/Q)_{min} = \frac{C_0 - C_e}{HC_0} = \frac{32000 \frac{\mu g}{L} - 8000 \frac{\mu g}{L}}{0,81 \times 32000 \frac{\mu g}{L}} = 0,93 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (12)$$

Missä,

$(V/Q)_{min}$ = Minimi ilma-vesisuhde (m^3/m^3)

C_0 = Käsiteltävän veden hiilidioksidipitoisuus ($\mu\text{g}/\text{l}$)

C_e = Käsitellyn veden hiilidioksidipitoisuus ($\mu\text{g}/\text{l}$)

H = Henryn vakio, yksikötön

Optimi ilma-vesisuhde saadaan strippauskerroimen avulla, joka on useimmiten 1,5–5. Käytetään tässä mitoituksessa kerrointa 3,5.

$$(V/Q)_{opt} = (V/Q)_{min} \times 3,5 = 3,25 \text{ m}^3 \text{ ilmaa} / \text{m}^3 \text{ vettä} \quad (13)$$

Tutkimuksissa on päädytty ilma-vesi -suhdelukuun 5–10, joka on osoittautunut optimaalisimmaksi hiilidioksidin poistossa [29]. Suhdeluku voi kuitenkin olla tätäkin suurempi, jopa 5–100 [28].

Tässä mitoituslaskussa saatu tulos on suositukseen nähden pieni, mutta se on linjassa poistoprosentin kanssa, joka on 25%. [28.]

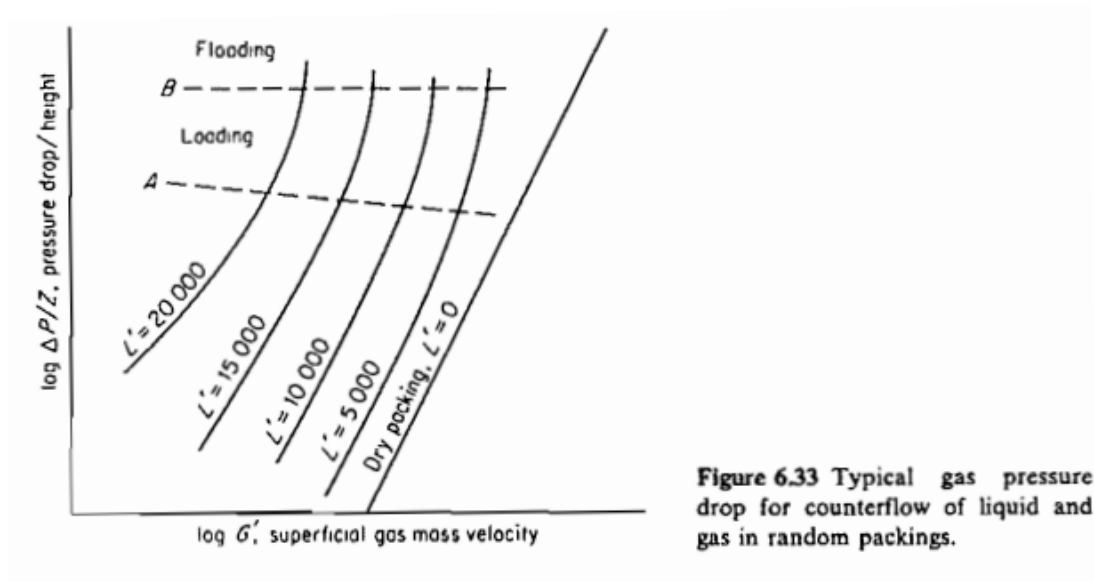
Vesilaitoksella tulisi paineilmakompressorin kanssa varautua säätömahdollisuu-
teen, jolloin paras puhdistustulos voidaan testata tarpeen mukaan.

Ilman tilavuusvirtaus V (m^3/s) lasketaan veden virtaaman ja ilma-vesisuhteen avulla [18, s. 6.30].

$$V = \frac{V}{Q} \times Q = 3,25 \text{ m}^3 \times 0,023 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0,08 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (14)$$

6.3 Painehäviö

Tornin painehäviö tarkoittaa ilmastustornissa ilma- ja vesimassojen kohtaamaa vastustusta, jota aiheuttavat täytekappaleet ja ilman ja veden vastavirta toisiinsa nähden. Painehäviön tulisi olla sellainen, että torni ei ala tulvia (flooding), jolloin veden tai ilman virtaus on niin suurta, että vesi alkaa kerääntyä tornin yläosaan, jolloin tornin toiminta ei ole enää tarkoituksenmukaista. Tehokkaimmillaan tornin operointi tapahtuu juuri ennen kuvassa 10. esitettyä A: loading -rajaa, jonka jälkeä painehäviö kasvaa nopeasti aiheuttaen tulvimisen. [30.]



Kuva 10. Veden- ja kaasuvirtauksen suhteellinen vaikutus tornin tulvimiseen vastavirtausta hyödyntävässä tornissa [30].

Mitoitus pyritään tekemään mahdollisimman pienellä painehäviöllä, yleensä 50–100 N/m²*m, jotta tornin käyttö olisi kustannustehokasta ja operointi tarvittaessa suuremmillakin ilmapvirtauksilla mahdollista, kun veden virtaama pysyy samana [18].

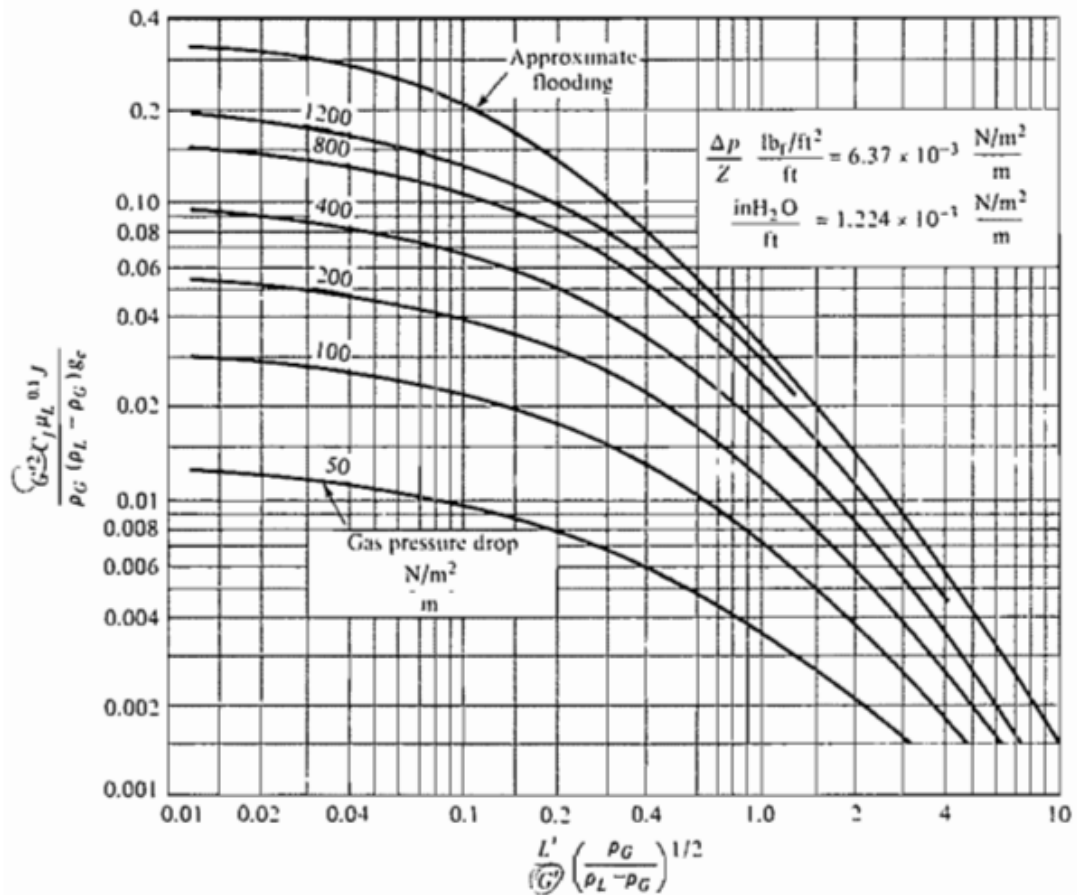


Figure 6.34 Flooding and pressure drop in random-packed towers. For SI units $g_c = 1$, C_f from Table 6.3, and use $J = 1$. For $G' = \text{lb}/\text{ft}^2 \cdot \text{h}$, $\rho = \text{lb}/\text{ft}^3$, $\mu_L = \text{cP}$, $g_c = 4.18 \times 10^8$, C_f from Table 6.3, and use $J = 1.502$. [Coordinates of Eckert [38], Chemical Process Products Division, Norton Co.]

Kuva 11. Painehäviön ja tulvimisen suhde esitettyä yleisellä painehäviökäyrästöllä [30].

6.4 Tornin poikkipinta-alan ja halkaisijan määrittäminen

Ilmastustornin poikkipinta-ala ja halkaisija voidaan määrittää useammalla tavalla. Mitat voidaan määrittää esimerkiksi laskennallisesti tai hyödyntämällä kuvan 11. painehäviökäyrästä. Tornin poikkipinta-alaan vaikuttaa veden virtaaman määrä ja valittu painehäviö.

Laskennallisessa määrittelyssä tulee valita pakkausmateriaali, sen koko ja laskussa käytettävä painehäviö. Valintojen jälkeen voidaan laskea poikkipinta-ala

ja halkaisija yhtälöiden avulla, jotka on johdettu kuvan 11. painehäviökäyrästä. [18.] Esimerkkilasku laskennallisesta määrittelystä on esitetty liitteessä 2.

Veden ja ilman massavirtaukset ja poikkipinta-ala voidaan myös arvioida yleisen painehäviökäyrästä avulla silloin, kun Henryn vakio on 2–500 atm tai 0.002–0,4. Hiilidioksidin Henryn vakio vaihtelee 0–20 °C 793–1429 atm, joten hiilidioksidin poistoon käyrästä ei sovellu. [20.]

Painehäviökuvaajaa hyödynnettäessä lähtötietoja ovat virtaama, yhdisteen alku- ja tavoiteltava loppupitoisuus käsiteltävässä nesteessä, pakkausmateriaali ja strippauskerroin. Menetelmässä lasketaan ensin x-akselin arvo, jonka avulla voidaan halutulta paineenaleneman käyrältä katsoa y:n arvo, jonka avulla lasketaan kaasun massavirta. Esimerkkilasku on esitetty liitteessä 3.

6.5 Volumetrinen aineensiirtokerroin k_{La}

Tornin täytekappalekorkeus voidaan laskea useammalla tavalla. Monesti korkeuden mitoitusta varten kuitenkin tarvitaan volumetrisen aineensiirtokertoimen parametria (k_{La}), joka määrittelee nopeuden, jolla kaasuyhdiste voi siirtyä kaasu- ja nestefaasien välillä.

6.6 Aineensiirtokertoimien määrittäminen Ondan korrelaation avulla

Volumetrinen aineensiirtokerroin on suositeltavaa arvioida empiirisin keinoin, mutta laskennallinenkin arvio on mahdollinen. Yleisin menetelmä arvioida kyseistä parametria on käyttää Ondan aineensiirto korrelaatiota, jossa määritellään pinta-ala, jolla kaasunsiirto tapahtuu, sekä nestefaasin- k_l ja kaasufaasin k_g , aineensiirtokertoimet. K_{La} -arvo koostuu näistä edellä mainituista arvoista. [31.]

Yhtälöllä (15) lasketaan a_w (m^2/m^3), joka on aineensiirron pinta-ala [18, s. 6.25].

$$a_w = a_t \left\{ 1 - \exp \left[-1,45 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma} \right)^{0,75} \left(\frac{L_m}{a_t \mu_l} \right)^{0,1} \left(\frac{L_m^2 a_t}{\rho_l^2 g} \right)^{-0,05} \left(\frac{L_m^2}{\rho_l a_t \sigma} \right)^{0,2} \right] \right\} \quad (15)$$

jossa,

a_t = täytemateriaalin pinta-ala (m^2/m^3)

σ_c = täytemateriaalin pintajännitys (muovi) (N/m)

σ = veden pintajännitys (N/m)

L_m = veden massavirtaus ($kg/m^2/s$)

μ_l = veden viskositeetti ($N/m^2 \cdot s$)

ρ_l = veden tiheys (kg/m^3)

g = maan vetovoima (m^2/s)

Yhtälöllä 16 lasketaan nestefaasin aineensiirtokerroin k_l (m/s).

$$k_l = 0,0051 \left(\frac{L_m}{a_w \mu_l} \right)^{2/3} \left(\frac{\mu_l}{\rho_l D_l} \right)^{-0,5} (a_t d_p)^{0,4} \left(\frac{\rho_l}{\mu_l g} \right)^{-1/3} \quad (16)$$

jossa,

L_m = veden massavirtaus ($kg/m^2/s$)

a_w = aineensiirron pinta-ala (m^2/m^3)

μ_l = veden viskositeetti ($N/m^2 \cdot s$)

ρ_l = veden tiheys (kg/m^3)

D_l = aineen diffuusiokerroin vedessä (m^2/s)

a_t = täytemateriaalin pinta-ala (m^2/m^3)

d_p = täytekappaleen halkaisija (m)

g = maan vetovoima (m^2/s)

Nestefaasin aineensiirtokertoimen laskua varten tulee laskea hiilidioksidin diffuusiokerroin vedessä D_l . Kirjallisuudessa diffuusiokertoimen laskukaavoja on esitelty useampia esim. Wilke & Chang 1955 ja Hayduk & Laudie 1974.

Tässä mitoituksessa lasketaan kerroin Hayduk & Laudien metodilla [18, s. 6.33].

$$D_l = \frac{13,26 \times 10^{-5}}{\mu_w^{1,14} V_b^{0,589} \frac{(100 \text{ cm})^2}{1 \text{ m}^2}} \quad (17)$$

jossa,

μ_w = veden viskositeetti (1,15 senttipoisea)

V_b = aineen moolitilavuus kiehumispisteessä (cm³/mol)

Aineen moolitilavuutta kiehumispisteessä V_b voidaan arvioida esimerkiksi Le Basin, Schroederin ja Tyn & Calusin metodeilla. Tyn & Calusin metodi on tutkimusten mukaan useammin osoittautunut paikkansa pitävimmäksi. [32.]

$$V_b = 0,285 \times V_c^{1,048} \quad (18)$$

jossa,

V_c = kriittinen tilavuus (CO₂= 94,12 cm³/mol)

Kaasufaasin diffuusiokerroimen D_g (m²/s) määrittämiseksi käytetään seuraavaa korrelaatiota Hirschfeld, Bird ja Spatz (1949). Ensin lasketaan yhdisteen molekyylin säde r_A (nm), voimavakio ϵ_A , molekyylien erottuminen törmäyksessä hiilidioksidille ilmassa r_{ab} (nm), energia hiilidioksidi- ja ilmamolekyylien vetovoiman välillä ϵ_{AB}/K ja viimeiseksi törmäysfunktio molekyylin diffuusiolle ilmassa ($EE \rightarrow NN \rightarrow f(KT/\epsilon_{AB})$) (Treybal 1980 ja Cummins & Westrick 1983). [18, s. 6.33.]

Yhdisteen, tässä tapauksessa hiilidioksidin, molekyylin säde r_A (nm) lasketaan seuraavalla kaavalla (19).

$$r_A = 1,18(V_b)^{1/3} \quad (19)$$

jossa,

V_b = yhdisteen moolitilavuus kiehumispisteessä (cm^3/mol)

Energia hiilidioksidi- ja ilmamolekyylien vetovoiman välillä ε_{AB}/K saadaan seuraavan kaavan (20) avulla.

$$\frac{\varepsilon_A}{K} = 1,12 \times (T_b)_A \quad (20)$$

jossa,

ε_A = molekyylin voimavakio

K = Boltzmannin vakio (joule/K)

$(T_b)_A$ = aineen kiehumispiste (K)

Molekyylien erottuminen törmäyksessä r_{AB} (nm) hiilidioksidille ilmassa lasketaan seuraavalla yhtälöllä (21).

$$r_{AB} = (r_a + r_B)/2 \quad (21)$$

jossa,

r_B = kaasuväliaineen molekyylin säde (nm) (Ilmalle 0,371nm)

r_A = hiilidioksidi molekyylin säde (nm)

Energia hiilidioksidi- ja ilmamolekyylien vetovoiman välillä $\frac{\varepsilon_{AB}}{K}$ määritellään yhtälöllä (22).

$$\frac{\varepsilon_{AB}}{K} = \sqrt{\frac{\varepsilon_A}{K} \times \frac{\varepsilon_B}{K}} \quad (22)$$

jossa,

$\frac{\varepsilon_B}{K}$ = ilman voimavakio (78,6)

ε_A = molekyylin voimavakio

K = Boltzmannin vakio (joule/K)

Seuraavaksi lasketaan molekyylin törmäysfunktio molekyylin diffuusiolle ilmassa $f(KT/\varepsilon_{AB})$ dimensiottomien parametrien EE ja NN avulla.

$$EE = \log_{10} \left(\frac{KT}{\varepsilon_{AB}} \right) = \log_{10} \left(\frac{T}{\varepsilon_{AB}/K} \right) \quad (23)$$

jossa,

T = veden lämpötila (K)

$\frac{\varepsilon_{AB}}{K}$ = energia hiilidioksidi- ja ilmamolekyylien vetovoiman välillä

$$NN = (-0,14329 - 0,48343(EE) + 0,1939(EE)^2 + 0,13612(EE)^3 - 0,20578(EE)^4 + 0,083899(EE)^5 - 0,011491(EE)^6) \quad (24)$$

$$f(KT/\varepsilon_{AB}) = 10^{NN} \quad (25)$$

Edellä mainittujen parametrien määrittämisen jälkeen voidaan kaasufaasin diffuusiokerroin D_g (m^2/s) laskea seuraavasti kaavalla (26).

$$D_g = \left\{ \frac{10^{-4} \left(1,084 - 0,249 \sqrt{\frac{1}{M_{CO_2}} + \frac{1}{M_{ilma}}} \right) (T^{1,5}) \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}{P_t (r_{AB})^2 f(KT/\varepsilon_{AB})} \right\} \quad (26)$$

jossa,

M_{CO_2} = hiilidioksidin moolimassa (g/mol)

M_{ilma} = ilman moolimassa (g/mol)

T = veden lämpötila (K)

P_t = normaali ilman paine (N/m^2)

r_{AB} = molekyylien erottuminen törmäyksessä hiilidioksidille ilmassa (nm)

$f(KT/\varepsilon_{AB})$ = molekyylin törmäysfunktio molekyylin diffuusiolle ilmassa

Seuraavaksi voidaan määrittää kaasufaasin aineensiirtokerroin k_g (m/s) kaavalla (27).

$$k_g = 5,23(a_t D_g) \left(\frac{G_m}{a_t \mu_g} \right)^{0,7} \left(\frac{\mu_g}{\rho_g D_g} \right)^{\frac{1}{3}} (a_t d_p)^{-2} \quad (27)$$

jossa,

a_t = täytemateriaalin pinta-ala (m^2/m^3)

D_g = kaasufaasin diffuusiokerroin (m^2/s)

G_m = ilman massavirtaus ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$)

μ_g = ilman viskositeetti ($\text{N}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

ρ_g = ilman tiheys (kg/m^3)

d_p = täytekappaleen halkaisija (m)

Viimeiseksi ratkaistaan volumetrisen aineensiirtokerroimen arvo K_{LA} [18, s. 6.35].

$$\frac{1}{K_{LA}} = \frac{1}{k_l a_w} + \frac{1}{k_g a_w H} \quad (28)$$

jossa,

k_l = nestefaasin aineensiirtokerroin (m/s)

a_w = aineensiirtopinta-ala (m^2/m^3)

k_g = kaasufaasin aineensiirtokerroin (m/s)

H = Henryn vakio

K_{LA} arvo kerrotaan kertoimella 0,75, jotta arvoa saadaan vastaamaan paremmin käytännön tasoa [18, s. 6.35]. Volumetrisen aineensiirtokerroimen esimerkilasku on esitetty liitteessä 4.

6.7 Tornin korkeuden määrittäminen

Tornin korkeus vaikuttaa ilma-vesisuhteen kanssa poistettavan yhdisteen poistoasteeseen. Suunnittelun ja tehontarpeen kannalta optimaalisin suhde tornin korkeudelle ja ilma-vesisuhteelle on se, joka tuottaa tarvittavan poistoasteen ja alhaisimman energiantarpeen ja käyttökustannukset. [26.]

Tornin täytekappalekorkeuden määrittämiseksi lasketaan poistettavan yhdisteen nestekonsentraation tasapainotila poistuvan ilman kanssa.

$$C_0^* = \left(\frac{1}{\frac{v}{Q} * H} \right) (C_0 - C_e) = \left(\frac{1}{3,25 \frac{m^3}{m^3} * 0,81} \right) \left(32000 \frac{\mu g}{l} - 8000 \frac{\mu g}{l} \right) = 9116 \frac{\mu g}{l} \quad (29)$$

Tornin täytekappalekorkeus lasketaan seuraavan kaavan mukaan.

$$L = \frac{Q}{AK_L a} \left[\frac{C_0 - C_e}{C_0 - C_e - C_0^*} \right] \ln \left[\frac{C_0 - C_0^*}{C_e} \right] = \frac{0,023 \frac{m^3}{s}}{0,984 m^2 * 0,01807 s^{-1}} * \left[\frac{32000 \frac{\mu g}{l} - 8000 \frac{\mu g}{l}}{32000 \frac{\mu g}{l} - 8000 \frac{\mu g}{l} - 9116 \frac{\mu g}{l}} \right] \ln \left[\frac{32000 \frac{\mu g}{l} - 9116 \frac{\mu g}{l}}{8000 \frac{\mu g}{l}} \right] = 2,21 m \quad (30)$$

Tornin korkeuden määrittämisessä on hyvä käyttää myös esimerkiksi 1,5 kerrointa [26].

$$L \times 1,5 = 2,21 m \times 1,5 = 3,3 m \quad (31)$$

7 Laskentamallin kehitys

Työn lopputuloksena syntynyt Excel-pohjainen laskentamalli on yhdistelmä eri lähteistä kerättyjä laskentakaavoja ja poistettavien yhdisteiden ja täytekappaleiden ominaisia parametreja, joita mitoitustapojen laskuissa tarvitaan. Työ suoritettiin kirjallisuuskatsauksena ja mitoitustapoja löytyi kirjallisuus- ja verkkolähteistä useita, joista tähän insinööriyöhön valikoitui selkein kokonaisuus. Teoriapohja on kaikissa mitoitustavoissa kuitenkin samankaltainen.

Työn tavoitteena oli kehittää helppokäyttöinen työkalu AFRY Finland Oy:n vesi-huollon prosessisuunnittelijoille ilmastustorneja suunniteltaessa ja koota yhteen mitoitukseen liittyvää teoretietoa helposti saatavilla olevaan muotoon.

Laskentamallia käytettäessä syötetään, tai valitaan vetovalikosta, lähtötiedoiksi käsiteltävän veden virtaama m^3/pv , poistettavan yhdisteen alku- ja tavoiteltava loppukonsentraatio $\mu g/l$, käsiteltävän veden lämpötila $^{\circ}C$, käytettävän täytekappaleen halkaisija m , ja mitoituksessa käytettävä tornin painehäviö $N/m^2/m$ ja Exceliin valmiiksi syötetyt kaava tuottavat lopputulokseksi tornille tarvittavat mitat.

Syötä alkutiedot tähän:		Ilmastustornin mitoitustulokset:	
Lämpötila	10 $^{\circ}C$	Tornin halkaisija	0,96 m
Käsiteltävän veden hiilidioksidipitoisuus	32000 $\mu g/l$	Tornin täytekappalekorkeus	3,75 m
Käsiteltävän veden hiilidioksidipitoisuus (tavoite)	8000 $\mu g/l$	Tornin tilavuus	2,71 m^3
Virtaama	2000 m^3/d	Ilma-vesisuhde	3,24 m^3/m^3
Täytemateriaali:	Plastic HiFlow ring	Ilman virtaama	0,08 m^3/s
Halkaisija	0,025 m	Veden virtaama	0,023 m^3/s
Painehäviö	100 $N/m^2/m$	Pintakuorma	115,1886915 mfh
		Teoriassa voidaan $20^{\circ}C$ asteeissa vähentää $0,5mg/l$	
		Korkeintaan 1/12-20 osa tornin halkaisijasta	
		Käytetään 50,75,100,200 - jotta tornin operointi on mahdollista suuremmilla ilmamäärillä	
Minimi ilma-vesi suhde	0,93 m^3/m^3	Käytetään 3,5-5 kerrointa, koska antaa todennäköisemmän tuloksen (Strippaustekijä)	
Ilma-vesisuhde	3,241 m^3/m^3	Poistettava aine: CO_2 ($20^{\circ}C$)	10 283,15 l
Ilman virtaus	0,08 m^3/s	Moolimassa	44,01 g/mol
F	2,00	Henryn vakio (yksikötön)	0,81
α_0	-2,17	Tulevan veden CO_2 pitoisuus	32000 $\mu g/l$
α_1	-0,78	Lähtevän veden CO_2 pitoisuus	8000 $\mu g/l$
α_2	-0,25	Moolitilavuus kiehumispisteessä	33,4 $cm^3/mooli$
E	0,95	Kiehumispiste	-78,4 $^{\circ}C$
log 10 M	-3,14	Veden tiheys	999,7 kg/m^3
M	0,000731	Veden viskositeetti	0,0015 $N/m^2 \cdot s$
Ilman massavirtaus	0,12 $kg/m^2/s$	Ilman tiheys	1,204 kg/m^3
Veden massavirtaus	31,99 $kg/m^2/s$	Ilman viskositeetti	0,000175 $N/m^2 \cdot s$
Tornin pinta-ala	0,723 m^2	Veden pintajännitys	0,0735 N/m
Tornin halkaisija	0,96 m	Virtaama	2000 m^3/d
CO_2 konsentraatio tasapainotila (ilma ja vesifaasin välillä)	9142,86 $\mu g/l$	Virtaama m^3/s	0,023148148 m^3/s
	0,55	Täytekappalemateriaali: HiFlow ring (RVT)	
	1,58	Halkaisija	0,025 m
	1,21	Pinta-ala	214 m^2/m^3
	0,58	Pintajännitys (muovi)	0,033 N/m
Pinta-ala aineiden massasiirtoa varten	125,44 m^2/m^3	Pakkaustekijä	108
Aineen diffuusio vedessä	0,0000000143 m^2/s	Vakiot	
	30,69	Maan vetovoima	9,81 m^2/s
	0,03	Puhaltimen tehokkuus	%
	1,96	Pumpun tehokkuus	%
	0,02	Ilman moolimassa	28,97 g/mol
Nestefaasin massasiirto vakio kl	0,000232 m/s	Painehäviö DeltaP	100 $N/m^2/m$
ra	0,38 nm		
sa/K	218,12 $Kelviniä$		
rab	0,07 nm		
saB/K	130,94		
EE	0,33		
NN	-0,28		
$f(KT_e ab) = 10^{-NN}$	0,52		
Kaasufaasin diffuusioikyky Dg	0,000443 m^2/s		
Kaasufaasin massasiirto vakio kg	0,06 m/s		
Kla	0,02171 s^{-1}	0,75 varmuuskertoimella	
Tornin korkeus L	2,50 m		
Tornin korkeus L opt.	3,74866809 m	1,5 kertoimella	

Kuva 12. Kuvakaappaus kehitetystä laskentatyökalusta

8 Yhteenveto

Ilmastustorneja käytetään yleisesti käsiteltävän juomaveden laadun parantamiseen. Tässä työssä mitoitus tehtiin hiilidioksidin poistoa varten. Hiilidioksidi aiheuttaa vedelle liiallista happamuutta. Mitoituksessa laskettiin ilma-vesisuhde, tornin poikkipinta-ala ja halkaisija, täytekappalekorkeus ja erilaisia aineensiirtokertoimia käyttäen Ondan korrelaatiota. Ilmastustornin mitoiksi saatiin lähtötietotaulukon 4. arvojen ja esimerkkilaskujen mukaan taulukon 5. mukaiset tulokset.

Taulukko 5. Ilmastustornin mitoituksen tulokset

Ilma-vesisuhde	3,25	m ³ /m ³
Poikkipinta-ala	0,98	m ²
Halkaisija	1,1	m
Täytekappalekorkeus	3,3	m

Ilma-vesisuhde on laskun mukaan hieman alhaisempi, kuin mitä aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet optimaaliseksi hiilidioksidin poistossa, joka on määritetty kirjallisuudessa olevan noin 5–10 m³ ilmaa/m³ vettä. Tulos lienee olevan linjassa hiilidioksidin poistoprosentin kanssa, joka on 25 %, eikä kaikkea hiilidioksidia yritetä poistaa. Suunnittelutyössä tulisi varautua kompressorin osalta säätövaraan, jolloin tarvittava ilmamäärä voidaan tornin käyttöönoton yhteydessä mitoittaa sopivaksi.

Laskentamalli ja kirjallinen työ tarjoavat tietopohjan ilmastustornien suunnittelutyölle vesihuoltoalalla. Työn teoriaosuus ja laskukaavat antavat myös lähtökohdat toteuttaa vanhojen ilmastustornien saneerauksia, kun ymmärretään miten eri mitoitusosa-alueet vaikuttavat lopputulokseen. Mitoitusarvoja voidaan tarpeen mukaan joutua soveltamaan lisäämällä esimerkiksi torniin pumpattavan ilman määrää tai pienentämällä täytekappaleiden halkaisijakokoa, jos tornin korkeutta joudutaan mitoituksen osalta madaltamaan jne.

Laskentamallia voidaan jatkossa kehittää ja laajentaa lisäämällä siihen poistettavien yhdisteiden määrää, ja niiden parametreja sitä mukaa, kun niitä suunnittelukohteissa tulee vastaan. Koska työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena voidaan jatkossa teoreettisia laskentatuloksia vertailla vesilaitoksilla olemassa oleviin ilmastustorneihin ja niiden tuottamiin puhdistustuloksiin ja kehittää työkalua vastaamaan paremmin käytännön tasoa.

Lähteet

- 1 Karttunen, Erkki.; Tuhkanen, Tuula.; Kiuru Heikki. 2004. RIL 124-2 Vesihuolto II. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Vammala. Vammalan kirjapaino Oy.
- 2 Kokila, K.; R. Divya. 2015. Verkkoaineisto. Analysis and Design of Cascade Aerator Construction for Mettur Water Treatment Plant. National Conference on Research Advances in Communication, Computation, Electrical Science and Structures (NCRACCESS-2015) <<https://pdfcoffee.com/analysis-and-design-of-cascade-aerator-construction-for-mettur-water-treatment-plant-pdf-free.html>> Luettu 14.3.2022
- 3 Components of the aeration system. 2017. Verkkoaineisto. Aeration systems Ltd. <<https://aerasyst.com/en/products/elements>> Päivitetty 2017. Luettu 14.3.2022
- 4 Pohjaveden esiintyminen ja muodostuminen. 2019. Verkkoaineisto. Suomen ympäristökeskus SYKE. <https://www.ymparisto.fi/fi-fi/vesi/Pohjavesien_tila/Pohjaveden_esiintyminen> Luettu 14.3.2022
- 5 Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista 1352/2015. Annettu Helsingissä 17.11.2015.
- 6 Kaivovedestä tutkittavat aineet ja ominaisuudet. Verkkoaineisto. Ympäristöhallinto. <<https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwib1u2ZtcX2AhX-ktYsKHfpkDLkQFnoECAs-QAw&url=https%3A%2F%2Fwww.ymparisto.fi%2Fdownload%2Fnoname%2F%257B6292832A-F38A-4833-99C3-76D8435FBE4B%257D%2F119241&usg=AOv-Vaw2N2sUrnGpXEwwNcAKM5bDP>> Luettu 14.3.2022
- 7 Talousvesiasetuksen soveltamisohje, Osa 3, Enimmäisarvojen perusteet. 2020. Verkkoaineisto. Sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto. <https://www.valvira.fi/documents/14444/6739502/Talousvesiasetuksen_soveltamisohje_osa_3.pdf/b9faedd0-cd83-fd94-09e2-452e7e7ee123> Luettu 28.6.2022

- 8 Vinci, B; Summerfelt, S; Piedrahita, R; Watten, B; Timmons, M. 2020. Verkkoaineisto. Carbon Dioxide Stripping, Fundamentals, Computer Design Model. Verkkoaineisto. <<https://www.presentica.com/doc/10743980/carbon-dioxide-stripping-fundamentals-computer-design-model-document>> Päivitetty 2020. Luettu 16.3.2022
- 9 Karttunen, Erkki.; Tuhkanen, Tuula. 2009. RIL 124-1 Vesihuolto I. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Vammala. Vammalan kirjapaino Oy.
- 10 Suez – Water Technologies & Solutions. 2022. Verkkoaineisto. Handbook of industrial water treatment. Yrityksen verkkojulkaisu. <<https://www.suezwatertechnologies.com/handbook/chapter-04-aeration>> Luettu 2.6.2022
- 11 Salonen, L; Turunen, H; Mehtonen, J; Mjönes, L; Hagberg, N; Wilken, R-D; Raff, O. 2002. Verkkoaineisto. Removal of radon by aeration: Testing of various aeration techniques for small water works. STUK Säteilyturvakeskus. Vantaa. Dark Oy. <<https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/124580/stuka193.pdf?sequence=1>> Luettu 21.3.2022
- 12 Turtiainen Turtiainen. 2017. Verkkoaineisto. Radon suomalaisissa asunnoissa: enimmäisarvot, määräykset uudisrakentamisessa, radonlähteet. Radonkorjauskoulutuksen power point esitys. Säteilyturvakeskus. < https://www.stuk.fi/documents/12547/2645402/2_Esiintyminen_2017.pdf/346fb710-ae98-fa22-d093-e62ef5607ed6?t=1486984464512> Luettu 28.6.2022
- 13 Ylönen, Kirsi. 2005. Verkkoaineisto. Eräät orgaaniset ja epäorgaaniset haitta-aineet Etelä-Savon tärkeimpien vedenottamoiden raaka- ja pohjavesissä. Etelä-Savon Ympäristökeskus. Mikkelä. Oswald Interkopio Oy. <<https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/134557/ESAmo65.pdf?sequence=23>> Luettu 22.3.2022
- 14 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2004/42/EY. Annettu 21.4.2004. Orgaanisten liuottimien käytöstä tietyissä maaleissa ja lakoissa sekä ajoneuvojen korjausmaalaustuotteissa aiheutuvien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöjen rajoittamisesta ja direktiivin 1999/13/EY muuttamisesta.

- 15 Berenjian, Aydin. Chan, Natalie. Malmiri, Hoda. 2012. Verkkoaineisto. Volatile Organic Compounds Removal Methods: A Review. University of Sydney. Australia, Sahand University of Technology, Iran. American Journal of Biochemistry and Biotechnology. <<https://thescipub.com/pdf/ajbbbsp.2012.220.229.pdf>> Luettu 28.6
- 16 Crittenden, J.C. Trussell, R.R. Hand, D.W. Howe, K.J. Tchobanoglous, G. 2012. Verkkoaineisto. Water Treatment. Principles and Design – third edition. Wiley. New Jersey. <https://books.google.fi/books?id=3azV6lu4h04C&printsec=front-cover&dq=Water+Treatment.+Principles+and+Design+%E2%80%93+third+edition&hl=fi&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Water%20Treatment.%20Principles%20and%20Design%20%E2%80%93%20third%20edition&f=false> Luettu 1.6.2022
- 17 Mackenzie L. Davis. 2011. Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice, International Edition. McGraw-Hill.
- 18 Edzwald, James K. 2011. Water Quality & Treatment – A Handbook on Drinking Water, Sixth Edition. American Water Works Association. McGraw-Hill.
- 19 Callender, T; Davis, L.C. 2001. Verkkoaineisto. Environmental Behaviour of Methyl Tert-Butyl Ether: A Study of Henry's Law Constant and the Dispersion of MTBE Through River Bottom Sand and Soil. Kansas State University; Department of Biochemistry. <<https://engg.k-state.edu/HSRC/01Proceed/docs/137.pdf>> Luettu 17.5.2022
- 20 Drago, Joseph A. 1998. Verkkoaineisto. Critical Assessment of Radon Removal Systems for Drinking Water Supplies. American Water Works Association Research Foundation. USA. <https://books.google.fi/books?id=0tXm8GePdQ0C&pg=PA35&pg=PA35&dq=henry%27s+law+constant+for+radon+dimensionless&source=bl&ots=Hfyy01TUwG&sig=ACfU3U0bMbm-8rsqXzc-OvaQYIZQb5b31w&hl=fi&sa=X&ved=2ahUKEwj8l6rQ_OX3AhXnS_EDHZTLChIQ6AF6BAgsEAM#v=onepage&q&f=false> Luettu 17.5.2022
- 21 Albright, Lyle F. 2009. Albright's Chemical Engineering Handbook. CRC press Taylor & Francis Group.

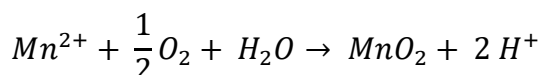
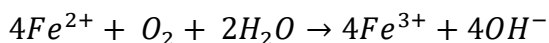
- 22 Tchobanoglous, George. Burton, Franklin L. Stensel, David H. 2004. Wastewater Engineering, Treatment and Reuse – International Edition. Singapore. McGraw-Hill.
- 23 Sinnott, Ray. Towler, Gavin. 2009. Chemical Engineering Design – Fifth Edition. Elsevier. UK.
- 24 Elomaa. Tuomas. 2022. Myyntipäällikkö. Oy Brynolf Grönmark AB. Sähköposti 11.5.2022.
- 25 Tower packings for mass and heat transfer processes. Verkkoaineisto. RVT Process equipment. <https://www.rvtpe.com/fileadmin/documents/print_and_publications/RVT_Tower_packings_150319.pdf> Luettu 15.6.2022
- 26 Huang, J. Shang, C. 2013. Verkkoaineisto. Air Stripping. The Hong Kong University of Science and Technology. <https://www.researchgate.net/publication/227135665_Air_Stripping/link/02e7e52afca4034074000000/download> Luettu. 6.6.2022
- 27 Buss, Mia. 2014. Kaupunkialueiden pohjaveden lämpöenergian hyödyntämispotentiaali Suomessa – Esimerkkeinä Lohja ja Turku. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopiston Geotieteiden ja maantieteen laitos.
- 28 Aeration and gas stripping. Verkkoaineisto. Tudelft OpenCourseWare. <<https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Aeration-and-gas-stripping-1.pdf>> Luettu 6.6.2022
- 29 Summerfelt, Steven. Davidson, John. Waldrop, Thomas. 2003. Verkkoaineisto. Evaluation of full-scale carbon dioxide stripping columns in a coldwater recirculating system. Elsevier Science B.V. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144860903000268>> Luettu 6.6.2022
- 30 Treybal, Robert E. 1981. Verkkoaineisto. Mass-Transfer Operations – Third edition. McGraw-Hill Book Company. <<https://docs.google.com/file/d/0BzCmwoVStdgOYzZkMIVI-ZUICckE/edit?pli=1&resourcekey=0-hFJCvNcHOzQYfv-hbN7aqQ>> Luettu. 24.5.2022
- 31 Düppe, Lea. 2020. Verkkoaineisto. What the K_{La} tells you about the oxygen transfer in your bioreactor. Infors HT.

<<https://www.infors-ht.com/en/blog/what-the-kla-tells-you-about-the-oxygen-transfer-in-your-bioreactor/>> Luettu. 27.5.2022

- 32 Poling B. Prausnitz, J. O'Connell P. 2000. Verkkoaineisto. The Properties of Gases and Liquids – Fifth Edition. McGraw-Hill. <[https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/ChEThermoBeaucage/Books/Bruce%20E.%20Poling,%20John%20M.%20Prausnitz,%20John%20P.%20O'Connell%20-%20The%20properties%20of%20gases%20and%20liquids-McGraw-Hill%20Professional%20\(2000\).pdf](https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/ChEThermoBeaucage/Books/Bruce%20E.%20Poling,%20John%20M.%20Prausnitz,%20John%20P.%20O'Connell%20-%20The%20properties%20of%20gases%20and%20liquids-McGraw-Hill%20Professional%20(2000).pdf)> Luettu. 30.5.2022
- Treybal, Robert E. 1981. Verkkoaineisto. Mass-Transfer Operations – Third edition. McGraw-Hill Book Company. <<https://docs.google.com/file/d/0BzCmwoVStdgO-YzZkMIVIZUICckE/edit?pli=1&resourcekey=0-hFJCvNcHOz-QYfv-hbN7aqQ>> Luettu. 24.5.2022

Teoreettinen ilmantarve raudan ja mangaanin hapetuksessa

Raudan ja mangaanin hapetusreaktioyhtälöiden mukaan yksi mooli happea hapettaa neljä moolia kahden arvoista rautaa ja 1/2 moolia happea yhden moolin kahden arvoista mangaania.



Voidaan laskea tarvittava happimäärä, joka tarvitaan hapettamaan rauta ja mangaani. Hapen moolimassa on 31,998 g/mol, raudan 55,845 g/mol ja mangaanin 54,983 g/mol

$$\frac{M_{O_2} \text{ g/mol}}{4M_{Fe^{2+}} \text{ g/mol}} = \frac{31,998 \text{ g/mol}}{4 \cdot 55,845 \text{ g/mol}} = 0,14 \quad (1)$$

$$\frac{\frac{M_{O_2}}{4}}{M_{Mn^{2+}}} = \frac{\frac{31,998 \frac{g}{mol}}{2}}{54,983 \text{ g/mol}} = 0,29 \quad (2)$$

Tarvitaan 0,14 g happea per 1 g kahden arvoisen raudan hapetukseen (19) ja 0,29 g per 1 g kahden arvoisen mangaanin hapetukseen.

Ilmassa on happea n. 21%. STP olosuhteissa yhden kaasumoolin tilavuus on 22,4l. Hapen moolimäärä litrassa on 0,21/22,4= 0,009375 moolia. Hapen moolimassa on 31,98 g/mol. Yhdessä litrassa ilmaa on happea 31,98g/mol x 0,009375mol = 0,3 grammaa.

Tarvitaan siis stoikiometrisesti noin 0,5 litraa ilmaa hapettamaan 1g kahden arvoista rautaa ja noin 1 litra happea hapettamaan 1g kahden arvoista mangaania. Hapen määrä on teoreettinen, sillä riippuu ilmastustornin hyötysuhteesta, kuinka tehokkaasti hapetus tapahtuu.

Laskennallisesti määritelty ilmastustornin poikkipinta-ala ja halkaisija

$$G_m = \sqrt{\frac{M\rho_g(\rho_l - \rho_g)}{C_f(\mu_l)^{0,1}}} \quad (1)$$

Missä,

G_m = Ilman massavirtaus (kg/m²/s)

ρ_g = Ilman tiheys (kg/m³)

ρ_l = Veden tiheys (kg/m³)

C_f = Pakkaustekijä (m⁻¹)

μ_l = Veden viskositeetti (N/m²*s)

M = Empiirinen parametri, joka määritetään seuraavalla yhtälöllä. [18, s. 6.26]

$$\log_{10}(M) = a_0 + a_1E + a_2E^2 \quad (2)$$

Missä a_0 , a_1 , a_2 ja E ovat empiirisiä parametreja.

Parametrin M laskukaavassa esiintyvän parametri E :n laskukaava [18, s. 6.27]

$$E = -\log_{10} \left[\left(\frac{V}{Q} \right) \sqrt{(\rho_g/\rho_l) - (\rho_g/\rho_l)^2} \right] \quad (3)$$

M parametrin laskukaavan parametrit a_0 , a_1 , a_2 ratkaistaan seuraavasti. [18, s. 6.27]

$$a_0 = -6,6599 + 4,3077F - 1,3503F^2 + 0,15931F^3 \quad (4)$$

$$a_1 = 3,0945 - 4,3512F + 1,6240F^2 - 0,20855F^3 \quad (5)$$

$$a_2 = 1,7611 - 2,3394F + 0,89914F^2 - 0,11597F^3 \quad (6)$$

yhtälöissä 4, 5 ja 6 esiintyvä parametri F määritellään valitun painehäviön ($\Delta P/L$) avulla. [18, s. 6.27]

$$F = \log_{10}(\Delta P/L) \quad (7)$$

F parametria ratkaistaessa tulos on validi vain käytettäessä painehäviöarvoja välillä 50–1200 N/m²*m. Käytännössä mitoitus tehdään alhaisilla arvoilla, joten suositus on lähinnä huomautus. [18, s. 6.27]

$$F = \log_{10}(\Delta P/L) = \log_{10}\left(100 \frac{N}{m^2 \cdot m}\right) = 2,0 \quad (8)$$

Ratkaistaan seuraavaksi parametrit a_0 , a_1 , a_2

$$a_0 = -6,6599 + (4,3077 * 2) - (1,3503 * 2^2) + (0,15931 * 2^3) = -2,17 \quad (9)$$

$$a_1 = 3,0945 - (4,3512 * 2) + (1,6240 * 2^2) - (0,20855 * 2^3) = -0,78 \quad (10)$$

$$a_2 = 1,7611 - (2,3394 * 2) + (0,89914 * 2^2) - (0,11597 * 2^3) = -0,25 \quad (11)$$

Ratkaistaan seuraavaksi parametri E yhtälön (3) mukaan:

$$E = -\log_{10} \left[\left(3,25 \frac{m^3}{m^3} \right) \sqrt{\left(\frac{1,204 \frac{kg}{m^3}}{999,7 \frac{kg}{m^3}} \right) - \left(\frac{1,204 \frac{kg}{m^3}}{999,7 \frac{kg}{m^3}} \right)^2} \right] = 0,95 \quad (12)$$

Ratkaistaan parametri M yhtälön (2) mukaisesti:

$$\log_{10}(M) = -2,17 - 0,78 * 0,95 - 0,25 * 0,95^2 = -3,14 \quad (13)$$

$$M = 10^{-3,14} = 0,00073 \quad (14)$$

Lasketaan ilman massavirtaus G_m (kg/m²/s) yhtälöllä (1):

$$G_m = \sqrt{\frac{0,00073 * 1,204 \frac{kg}{m^3} (999,7 \frac{kg}{m^3} - 1,204 \frac{kg}{m^3})}{200(0,0000175 \frac{N}{m^2 * s})^{0,1}}} = 0,09 \frac{kg}{m^2 s} \quad (15)$$

Veden massavirtaus L_m (kg/m²/s) voidaan laskea nyt ilman massavirtauksen G_m avulla. [18, s. 6.31]

$$L_m = \frac{G_m}{\left(\frac{V}{Q}\right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)} = \frac{0,09 \frac{kg}{m^2 s}}{3,25 \frac{m^3}{m^3} \frac{1,204 kg/m^3}{999,7 kg/m^3}} = 23,5 \frac{kg}{m^2 s} \quad (16)$$

Tornin poikkipinta-ala A ja halkaisija D riippuvat käsiteltävän veden määrästä ja ne ratkaistaan seuraavilla yhtälöillä. [18, s. 6.32]

$$A = \frac{Q \rho_l}{L_m} = \frac{0,023 \frac{m^3}{s} * 999,7 kg/m^3}{23,5 \frac{kg}{m^2 s}} = 0,98 m^2 \quad (17)$$

Missä,

Q = Veden virtaama (m³/s)

ρ_l = Veden tiheys (kg/m³)

L_m = Veden massavirtaus (kg/m²/s)

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 0,98 m^2}{3,14}} = 1,1 m \quad (18)$$

Painehäviökuvaajan avulla määritelty tornin poikkipinta-ala ja halkaisija

Esimerkkilasku suoritetaan MTBE:n poistolle pohjavedestä. MTBE:n alkupitoisuus vedessä on 100 µg/l ja tavoitepitoisuus 5 µg/l. Henryn vakio 10 °C:ssa on 21,18 atm taulukosta 2. katsottuna. Strippauskerroin on 3,5. Veden virtaama on 0,023 m³/s. Käytetty pakkausmateriaali on Hiflow ring 0,038m halkaisijalla ja pakkaustekijällä 90. Käytetään painehäviötä 50 N/m²/m.

Neste-kaasu massavirran suhde määritellään seuraavalla yhtälöllä (1)

$$S = \frac{G'}{L'} * \frac{H}{P_T} \quad (1)$$

Missä,

S = Strippauskerroin

$\frac{G'}{L'}$ = Ilma-vesi massavirran suhde

H = Henryn vakio (atm)

P_T = Ilman paine

$$S = \frac{G'}{L'} * \frac{H}{P_T} = \frac{G'}{L'} * \frac{1}{1 \text{ atm}} * \left(\frac{21,18 \text{ atm} * (18 \text{ g/moolia } H_2O)}{29 \text{ g/moolia ilmaa}} \right)$$

$$= \frac{G'}{L'} * 13,15$$

$$\frac{L'}{G'} = \frac{13,15}{3,5} = 3,8 \quad (2)$$

Ratkaistaan x-akselin arvo yleisestä painehäviökuvaajasta (kuva 2.) saatavalla yhtälöllä (3):

$$\frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$3,8 * \left(\frac{1,204 \text{ kg/m}^3}{999,7 \text{ kg/m}^3 - 1,204 \text{ kg/m}^3} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,13 \quad (4)$$

Kuvasta 2. katsottaessa x-akselin arvon kohdalta painehäviökäyrän 50 N/m²/m vastaava y-akselin arvo saadaan vastaukseksi 0.008.

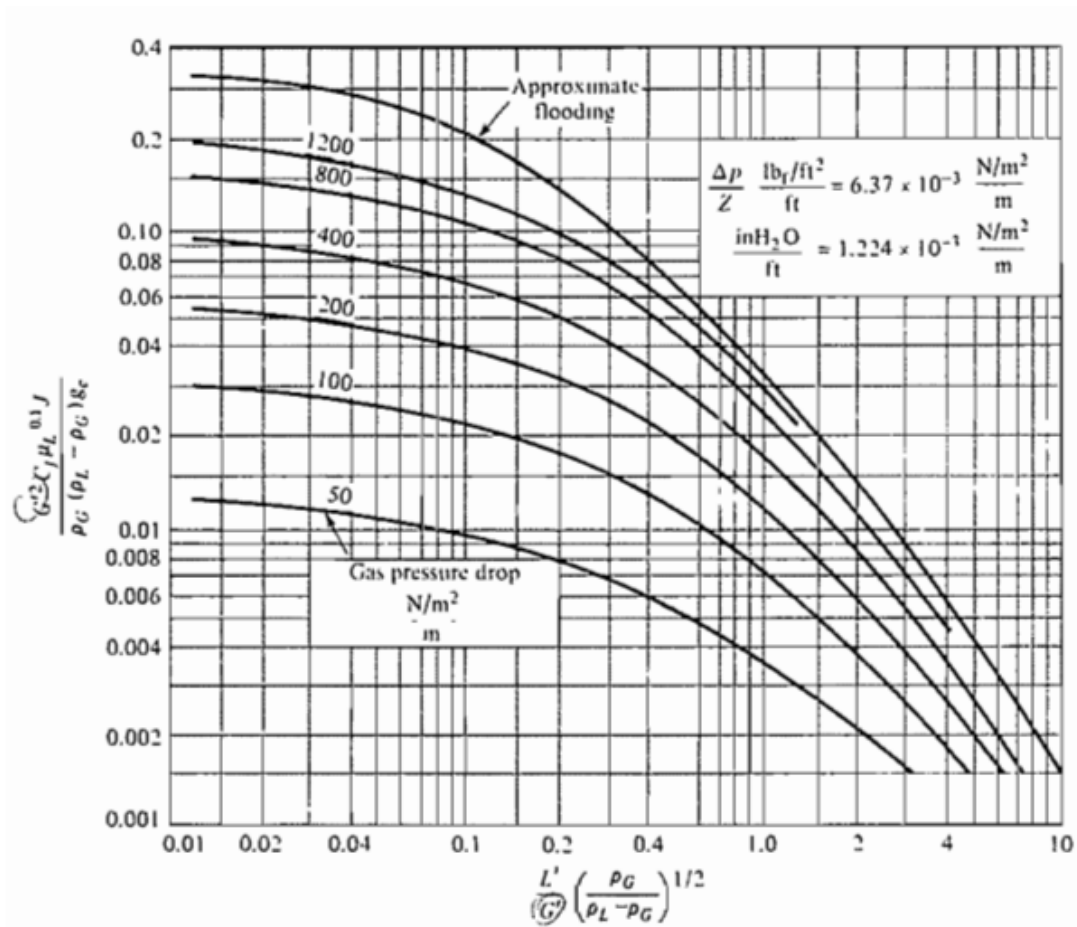


Figure 6.34 Flooding and pressure drop in random-packed towers. For SI units $g_c = 1$, C_f from Table 6.3, and use $J = 1$. For $G' = \text{lb/ft}^2 \cdot \text{h}$, $\rho = \text{lb/ft}^3$, $\mu_L = \text{cP}$, $g_c = 4.18 \times 10^8$, C_f from Table 6.3, and use $J = 1.502$. [Coordinates of Eckert [38], Chemical Process Products Division, Norton Co.]

Kuva 2. Yleinen painehäviökäyrästä [22, s.1176]

Y-akselin kaava on seuraava [22, s.1174]

$$y = \frac{G^2 * C_f * \mu_L^{0,1} * \rho_g * (\rho_L - \rho_g)}{\rho_g (\rho_L - \rho_g)} \quad (5)$$

Ilman massavirtaus voidaan esittää seuraavan yhtälön avulla [22, s.1177]

$$G^{\cdot} = \left(\frac{y\text{-akselin arvo} * \rho_g * (\rho_l - \rho_g)}{C_f * \mu_l^{0,1}} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$G^{\cdot} = \left(\frac{0,13 * 1,204 \text{ kg/m}^3 * (999,7 \text{ kg/m}^3 - 1,204 \text{ kg/m}^3)}{90 * 0,0015^{0,1}} \right)^{1/2} = 1,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2/\text{s}} \quad (7)$$

Veden massavirtaus voidaan laskea neste-kaasu massavirran suhteen avulla

$$L^{\cdot} = \frac{L}{G^{\cdot}} * G^{\cdot} = 3,8 * 1,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2/\text{s}} = 6,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2/\text{s}} \quad (8)$$

Poikkipinta-ala ja halkaisija voidaan laskea nesteen massavirran avulla [22, s.1177]

$$A = \frac{L \rho_l}{L^{\cdot}} = \frac{0,023 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 999,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{6,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2/\text{s}}} = 3,4 \text{ m}^2 \quad (9)$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 3,4 \text{ m}^2}{3,14}} = 2,1 \text{ m} \quad (10)$$

Volumetrinen aineensiirtokerroin K_L esimerkkilasku

Lasketaan aineensiirtokerroin kappaleen 6.5.1 yhtälöiden avulla. Laskuissa käytetään lähtötietotaulukon 4. arvoja:

$$a_w = 313 \frac{m^2}{m^3} \left[1 - \exp \left[-1,45 \left(\frac{0,033 \frac{N}{m}}{0,0735 \frac{N}{m}} \right)^{0,75} \left(\frac{23,51 \frac{kg}{m^2}}{313 \frac{m^2}{m^3} * 0,015 \frac{N}{m^2 * s}} \right)^{0,1} \left(\frac{\left(23,51 \frac{kg}{m^2} \right)^2 * 313 \frac{m^2}{m^3}}{999,7 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m^2}{s}} \right)^{-0,05} \right] \left(\frac{\left(23,51 \frac{kg}{m^2} \right)^2}{999,7 \frac{kg}{m^3} * 313 \frac{m^2}{m^3} * 0,0735 \frac{N}{m}} \right)^{0,2} \right] = 154,87 \frac{m^2}{m^3} \quad (1)$$

$$V_b = 0,285 \times \frac{94,12 cm^3}{mol^{1,408}} = 33,4 cm^3/mol \quad (2)$$

$$D_l = \frac{13,26 \times 10^{-5}}{1,15^{1,14} * 33,4 \frac{cm^3}{mol}^{0,589} * \frac{(100 cm)^2}{1 m^2}} = 1,43 \times 10^{-9} \frac{m^2}{s} \quad (3)$$

$$k_l = 0,0051 \left(\frac{23,51 \frac{kg}{m^2}}{154,87 \frac{m^2}{m^3} * 0,0015 \frac{N}{m^2 * s}} \right)^{2/3} \left(\frac{0,0015 \frac{N}{m^2 * s}}{999,7 \frac{kg}{m^3} * 1,43 \times 10^{-9} \frac{m^2}{s}} \right)^{-0,5} \left(313 \frac{m^2}{m^3} * 0,015 m \right)^{0,4} \left(\frac{999,7 \frac{kg}{m^3}}{0,0015 \frac{N}{m^2 * s} * 9,81 \frac{m^2}{s}} \right)^{-1/3} = 1,56 \times 10^{-4} m/s \quad (4)$$

$$r_A = 1,18 (33,4 cm^3/mol)^{1/3} = 0,38 nm \quad (5)$$

$$\frac{\varepsilon_A}{K} = 1,12 \times (-78,4 + 273,15) = 218,12 K \quad (6)$$

$$r_{AB} = \frac{0,38nm+0,371nm}{2} = 0,07nm \quad (7)$$

$$\frac{\varepsilon_{AB}}{K} = \sqrt{218,12 K \times 78,6} = 130,94 \quad (8)$$

$$EE = \log_{10} \left(\frac{(10+273,15)}{130,94} \right) = 0,33 \quad (9)$$

$$NN = (-0,14329 - 0,48343(0,33) + 0,1939(0,33)^2 + 0,13612(0,33)^3 - 0,20578(0,33)^4 + 0,083899(0,33)^5 - 0,011491(0,33)^6) = -0,28 \quad (10)$$

$$f(KT/\varepsilon_{AB}) = 10^{-0,28} = 0,52 \quad (11)$$

$$D_g = \left\{ \frac{10^{-4} \left(1,084 - 0,249 \sqrt{\frac{1}{44,01 \frac{g}{mol}} + \frac{1}{28,97 \frac{g}{mol}}} \right) (10+273,15)^{1,5} \sqrt{\frac{1}{44,01} + \frac{1}{28,97 \frac{g}{mol}}}}{101325 \frac{N}{m^2} * 0,07nm^2 * 0,52} \right\} = 4,43 \times 10^{-4} m^2/s \quad (12)$$

$$k_g = 5,23 \left(313 \frac{m^2}{m^3} * 0,015m \right) \left(\frac{0,09 \frac{kg}{m^2/s}}{313 \frac{m^2}{m^3} * (1,75 \times 10^{-5}) \frac{N}{m^2 * s}} \right)^{0,7} \left(\frac{1,75 \times 10^{-5} \frac{N}{m^2 * s}}{1,204 \frac{kg}{m^3} * (4,43 \times 10^{-4}) m^2/s} \right)^{\frac{1}{3}} \left(313 \frac{m^2}{m^3} * 0,015m \right)^{-2} = 0,08 \frac{m}{s} \quad (13)$$

$$\frac{1}{K_L a} = \frac{1}{(1,56 \times 10^{-4}) \frac{m}{s} * 154,87 \frac{m^2}{m^3}} + \frac{1}{0,08 \frac{m}{s} * 154,87 \frac{m^2}{m^3} * 0,81} = 41,49 \quad (14)$$

$$K_L a = \frac{1}{41,49} = 0,024s^{-1} \quad (15)$$

$$0,024s^{-1} * 0,75 = 0,01807 s^{-1}$$

(16)