



Teemu Salminen

Rebuild-hankkeen vaikutus jätevedenpuhdistamon energiatehokkuuteen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

17.11.2024

Tiivistelmä

Tekijä:	Teemu Salminen
Otsikko:	Rebuild-hankkeen vaikutus jätevedenpuhdistamon energiatehokkuuteen
Sivumäärä:	34 sivua
Aika:	17.11.2024
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine:	Ympäristötekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Juha Juselius Tuotantoinsinööri Jukka Oksanen

Insinööriyön tarkoitus oli selvittää teollisuuspuiston jätevedenpuhdistamolla toteutetun rebuild-hankkeen muutostöiden vaikutus lämpöhäviöihin ja arvioitiin niiden vaikutusta energiankulutukseen.

Tavoitteena oli saada Suomen Teollisuuden Energiapalvelut Oy:lle konkreettisia arvoja syntyvistä lämpöhäviöistä, jotta muutostöiden vaikutuksista saatiin yksityiskohtaisempi kuva.

Insinööriyössä laskettiin kolmen sekoitetun reaktorin ja putken aiheuttamat lämpöhäviöt ennen ja jälkeen eristystöiden. Saatuja tuloksia verrattiin ennen ja jälkeen muutostöiden. Laskennassa käytettiin tarkasteltaviin kohteisiin mahdollisimman hyvin soveltuvia kaavoja ja tehtiin tarvittavia oletuksia, jotta laskentaa saatiin yksinkertaistettua ja suoritettua käytettävissä olleilla lähtötiedoilla. Tehtyjen oletusten takia saadut tulokset ovat suuntaa antavia eivätkä absoluuttisen tarkkoja.

Virtausolosuhteilla oli merkittävä vaikutus syntyviin lämpöhäviöihin niin reaktoreissa kuin putkessakin. Reaktoreissa merkitys korostui ja sekoittimen vaikutus piti huomioida tarkemmin.

Insinööriyön lopputuloksena saatiin aiempaa yksityiskohtaisempi käsitys muutostöiden vaikutuksesta syntyvien lämpöhäviöiden määrään tarkasteltavissa kohteissa. Muutostyöt vähentävät merkittävästi syntyviä lämpöhäviöitä. Reaktoreiden eristäminen osoittautui laskennan pohjalta olevan 98,5 % parempi ratkaisu aiempaan verrattuna ja putken muutostöiden jopa 99,9 % parempi ratkaisu. Näiden tulosten pohjalta pystyttiin myös arvioimaan muutostöiden vähentävän tarvittavan lämmityshöyryn kulutusta.

Avainsanat: jätevedenpuhdistamo, lämpöhäviö, energiatehokkuus, reaktori, putki, eristys

Abstract

Author: Teemu Salminen
Title: Impact of the Rebuild Project on the Energy Efficiency of the Wastewater Treatment Plant
Number of Pages: 34 pages
Date: 17 November 2024

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Energy and Environmental Technology
Professional Major: Environmental Technology
Instructors: Juha Juselius, Senior Lecturer
Jukka Oksanen, Production Engineer

The aim of this thesis was to explore how the modifications made during the Rebuild project affected heat losses at the wastewater treatment plant in the industrial park, and to evaluate their impact on energy consumption.

The goal was to provide Suomen Teollisuuden Energiapalvelut Oy with concrete data on heat losses, offering a more detailed understanding of how the changes influenced efficiency.

The study involved calculating heat losses from three mixed reactors and a pipeline, both before and after the modifications, and comparing the results. Relevant equations were used for the components being analyzed, and assumptions were made to simplify the calculations based on the available data. As a result of these assumptions, the findings are indicative rather than fully precise.

Flow conditions had a significant impact on heat losses in both the reactors and the pipeline. Specifically, the reactors required a closer look at the effects of mixing.

As a result, this thesis offers a clearer, though still approximate, understanding of the modifications' effect on heat losses. The results showed that the changes led to a significant reduction in heat losses: reactor insulation improved efficiency by 98.5 % compared to the previous setup, while pipeline modifications improved efficiency by up to 99.9 %. On the basis of these findings, it was also estimated that the modifications would reduce the consumption of heating steam.

Keywords: wastewater treatment plant, heat loss, energy efficiency, reactor, pipe, insulation

Sisällys

Symboliluettelo

1	Johdanto	1
2	Jätevedenpuhdistamon prosessi ja menetelmät	2
2.1	Neutralointi	4
2.2	Hapettumis-pelkistymisreaktio	5
2.3	Selkeytys	6
2.4	Kemikaalit	7
2.4.1	Kalkkikivi	8
2.4.2	Polymeeri	9
3	Rebuild-hankkeen tuomat muutokset	10
4	Lämmönsiirto ja virtaustekniikka	12
4.1	Lämmönsiirron ja virtaustekniikan yleiset periaatteet	12
4.2	Lämpöhäviöihin vaikuttavat keskeiset tekijät reaktoreissa ja putkissa	13
4.2.1	Virtausominaisuudet ja dimensiottomat luvut	13
4.2.2	Geometriset ominaisuudet	16
5	Lämpöhäviöiden laskenta	17
5.1	Laskennan oletukset ja rajaukset	18
5.2	Lähtötiedot	19
5.3	Lämpöhäviöt	22
5.3.1	Laskuissa käytetyt kaavat	22
5.3.2	Lämpöhäviölaskut	25
6	Tulosten arviointi	28
6.1	Lämpöhäviöiden vertailu	28
6.2	Laskuissa käytettyjen oletusten vaikutus laskutuloksiin	30
7	Yhteenveto	32
	Lähteet	33

Symboliluettelo

A_p = reaktorin pohjan pinta-ala (m^2)

A_t = reaktorin kokonaispinta-ala (m^2)

A_v = reaktorin vaipan pinta-ala (m^2)

A_{vk} = reaktorin katon ja vaipan yhteenlaskettu pinta-ala (m^2)

a = lämpödiffuusiokerroin ($m^2 \cdot s$)

α_b = betonin lämmönsiirtokerroin ($W/m^2 \cdot K$)

α_s = sisäpinnan lämmönsiirtokerroin ($W/m^2 \cdot K$)

α_u = ulkopinnan lämmönsiirtokerroin ($W/m^2 \cdot K$)

d = putken sisähalkaisija (m)

d_e = eristeen vahvuus (m)

d_r = sekoittimen potkurin halkaisija (m)

d_s = seinämän vahvuus (m)

η = dynaaminen viskositeetti nesteen keskilämpötilassa ($Pa \cdot s$)

η_w = dynaaminen viskositeetti seinämän keskilämpötilassa ($Pa \cdot s$)

ε = emissiivisyys (-)

γ = potkurin siiven kulma ($^\circ$)

λ = veden lämmönjohtavuus ($W/m \cdot K$)

λ_e = eristeen lämmönjohtavuus (W/m·K)

λ_w = teräksen lämmönjohtavuus (W/m·K)

L = putken pituus (m)

n = sekoittimen pyörimisnopeus (rps)

Q = lämpöhäviö (W)

Q_p = reaktorin pohjan lämpöhäviö (W)

r_1 = säde putken sisäpintaan (m)

r_2 = säde putken ulkopintaan (m)

r_3 = säde eristeen ulkopintaan (m)

R_t = kokonaislämpövastus (K/W)

ρ = nesteen tiheys nesteen keskilämpötilassa (kg/m³)

σ = Stefan-Boltzmannin vakio (W/m²·K⁴)

T_e = uloimman materiaalipinnan lämpötila (K)

T_o = ulkolämpötila (K)

T_s = nesteen lämpötila (K)

v = virtausnopeus (m/s) ja kinemaattinen viskositeetti (m²·s)

Z = potkurin siipien lukumäärä (-)

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä tutkitaan Kaanaan teollisuuspuiston jätevedenpuhdistamolle toteutetun rebuild-hankkeen vaikutuksia muutostöiden alaisten kohteiden energiankulutukseen. Kyseessä on neutralointilaitos, jonka omistaa Suomen Teollisuuden Energiapalvelut – STEP Oy. STEP Oy on vuonna 2008 perustettu yhteisyritys, jonka omistavat Veolia (51 %) ja Porin Energia (49 %) [1].

Työn tavoitteena on selvittää, miten rebuild-hanke on vaikuttanut muutostöiden alaisten prosessikohteiden energiankulutukseen lämpöhäviöiden kautta. Työssä analysoidaan ja vertaillaan näiden kohteiden energiankulutusta ennen ja jälkeen hankkeen. Saatavilla tuloksilla voidaan arvioida, kuinka onnistuneesti toteutetut muutokset vähentävät energiankulutusta.

Neutralointilaitokset ovat oleellinen osa ympäristönsuojelua, ja ne sijaitsevat usein teollisuuden läheisyydessä. Veden neutraloinnin avulla säädetään Kaanaan teollisuuspuiston poisteviesien happamuus sopivaksi ennen, kuin poisteviedet voidaan päästää takaisin vesistöihin. Jätevedenpuhdistamo auttaa vähentämään teollisuuden aiheuttamia ympäristökuormituksia alueella ja suojelemaan alueen vesiekosysteemejä.

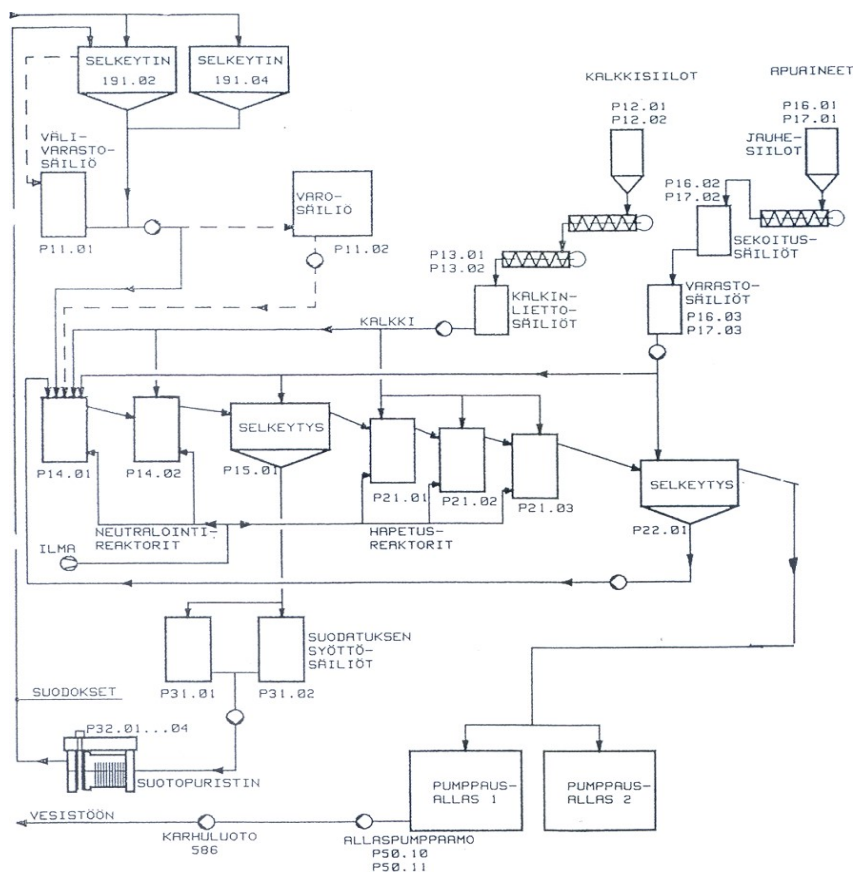
Kaanaan teollisuuspuisto sijaitsee Meri-Porissa. Teollisuuspuistossa tapahtui tammikuussa 2017 onnettomuus, jolloin alueella toiminut pigmenttitehdas syttyi tuleen. Palosta johtuneiden vaurioiden takia tehtaan toiminta jouduttiin lopettamaan. Tämä on vaikuttanut myös neutralointilaitoksella käsiteltävien jätevesien määrään merkittävästi.

Tämä insinööriyö sisältää muutostöiden kohteena olleen neutralointilaitoksen toimintakuvauksen, laitoksella käytettävien menetelmien tarkastelun, rebuild-hankkeen tuomien muutoksien esittelyn, lämpöhäviöihin vaikuttavat tekijät, lämpöhäviölaskut sekä arvioinnin laskennassa käytettyjen oletusten vaikutuksista saatuihin tuloksiin. Lopuksi arvioidaan muutostöiden vaikutus lämpöhäviöihin.

2 Jätevedenpuhdistamon prosessi ja menetelmät

Luvussa käsitellään Kaanaan teollisuuspuiston jätevedenpuhdistamon toimintaa ja sen prosessivaiheita. Kuvassa 1 esitetään jätevedenpuhdistamon prosessikaavio ennen muutostöiden alkua, ja prosessiin tehtyjä muutoksia käsitellään myöhemmin kappaleessa 3.

Kaanaan teollisuuspuiston jätevedenpuhdistamo on jatkuvasti virtaava neutralointijärjestelmä, ja se on suunniteltu maksimikapasiteetiltaan jätevesimäärille 10 000 m³/d, rikkihappomäärälle 100 t/d ja rautamäärälle 25 t/d [2]. Muutostöiden seurauksena nykyinen kapasiteetti on kuitenkin pienempi. Kun laitos toimii normaalisti, jäteveden neutralointi tapahtuu eri vaiheiden aikana, jotka näkyvät kuvan 1 prosessikaaviosta.



Kuva 1. Jätevedenpuhdistamon yksinkertaistettu PI-kaavio ennen muutostöitä.

Prosessoitava jätevesi kerätään keruuselkeyttimeen (191.04), josta se pumpataan neutralointireaktoreille. Keruuselkeyttimeen kerättävät jätevedet syntyvät tehdasalueen toimijoiden prosesseista, valumavesistä, lattiakaivojen vesistä, salaojista, piha-alueilta, kattosateista, lieteautojen tyhjennyksistä ja eri säiliöiden mahdollisista ylivuodoista. Poikkeustilanteissa jätevedenpuhdistamolle saapuvat poisteviedet voidaan ohjata varosäiliöön (P11.02), josta ne voidaan pumpata takaisin prosessiin. [3.]

Kalkkikiven lietto on prosessin toiminnan edellytys. Liettämisessä hienoksi jauhattu kalkkikivi otetaan kalkkisiiloista (P12.01 ja P12.02) ja sekoitetaan veden kanssa liettosäiliöissä (P13.01 ja P13.02). [4.]

Prosessin seuraavana vaiheena on neutralointi, jossa syöttöveden pH-arvo nostetaan emäksisen kalkkikivilietteen avulla arvoon 4–5 kahdessa sekoitusreaktorissa (P14.01 ja P14.02). Neutraloinnissa hapot neutraloituvat ja osa hivenaineista alkaa saostua. Riittävän pitkällä viipymällä esimerkiksi titaani, vanadiini ja kromi saostuvat lähes täydellisesti. Myös prosessin syötössä ollut kolmiarvoinen rauta saostuu jo tässä vaiheessa. [5.]

Ensimmäisen selkeyttimen (P15.01) pohjaan vajoava sakka pumpataan suodatukseen syöttösäiliöiden (P31.01 ja P31.02) kautta. Suodatuksessa sakka johdetaan suotimeen syöttölinjaa pitkin, jolloin suotimien lehtien väliset kammiot täyttyvät kiintoaineesta. Kammioiden täytön jälkeen suodatussekvenssi jatkuu kakun (suodatuksessa syntyvä kiintoaine) kuivattamisella. Kuivaus tapahtuu osittain puristamalla syntynyttä kipsiä membraanipuristuksella ja osittain syrjäyttämällä vesi kiintoaineesta ilman avulla. Suodatettua sakkamateriaalia kutsutaan kipsiksi, joka voidaan läjittää tai kuivata. [5.]

Ensimmäisen selkeyttimen ylitte, eli käsiteltävä vesi, kulkee ylivaluntana hapetukseen. Hapetuksessa ylitteen pH-arvo nostetaan arvoon 6,5–7. Hapetusprosessi tapahtui kolmen sarjassa olleen hapetusreaktorin (P21.01, P21.02 ja P21.03) avulla. Kuhunkin käytössä olevaan reaktoriin puhalletaan ilmaa noin 1 500 Nm³/h. Tässä vaiheessa kaksiarvoinen rauta hapettuu kolmiarvoiseksi ja

saostuu rautahydroksideina. Samalla pääosa niukkaliukoisista hivenaineista saadaan saostettua. [5.]

Toisessa selkeyttimessä (P22.01) selkeytysapuaineen, eli flokkulantin, avulla erotetaan hapetuksessa syntynyt rauta- ja kipsisakka mahdollisimman tehokkaasti. Flokkulanttina käytetään polymeeriä, jota pumpataan pumppaussäiliöistä (P16.03 ja P17.03) erillisiä linjoja pitkin valittuihin selkeyttimiin. Apuaineen tilavuusvirtaus selkeyttimiin on riippuvainen neutraloitavan veden tilavuusvirtauksesta. [2.] Toisen selkeyttimen vajonnut sakka pumpataan takaisin ensimmäiseen neutralointireaktoriin, jossa hapetuksessa liukenematta jäänyt kalkkikivi reagoi happamassa jätevedessä [5].

Toiselta selkeyttimeltä vesi kulkee ylivaluntana kahdelle maa-altaalle, josta se pumpataan mereen Karhuluotoon. Karhuluodon pumppausasemalla on yksi paineenkorotuspumppu sekä jokaiselle poistevesiputkelle automaattiset ilmanpoistosäiliöt.

2.1 Neutralointi

Neutraloinnissa muodostuu neutraloitumisreaktio, jossa hydroksidi-ioni ja vetyioni reagoivat keskenään. Samalla syntyy vettä ja suolaa. Neutraloinnissa pyritään saavuttamaan täysin neutraali happamuus, jolloin liuoksen pH-arvo olisi 7,00, mutta suolan happo-emäsominaisuuksien vuoksi pH ei aina saavuta arvoa 7,00. [6, s. 129.]

Teollisuudessa jätevesien neutraloinnista vastaa siihen erikseen suunniteltu laitos, jonka päätarkoituksena on kemikaalien avulla neutraloida poisteviedet sellaisiksi, että ne voidaan turvallisesti päästää vesistöön tai viemäriverkostoon. [7.]

Kaanaan teollisuuspuistossa sijaitseva jätevedenpuhdistamo neutraloi alueen happamia poistevesiä. Neutralointiprosessissa käytetään hienoksi jauhettua kalkkikiveä, joka on vahvasti emäksinen. Järjestelmä syöttää veden ja kalkkikiven sekoitusta automaattisesti prosessiin seuraamalla asetettua pH-arvoa.

Neutralointisäiliöön ohjataan myös toisen selkeyttimen pohjalle vajonnut sakka, joka sisältää kipsiä, rauta- ja metallihydroksideja sekä reagoimatonta kalkkikiveä. [2.]

Kuvassa 2 nähdään Kaanaan teollisuuspuiston eristämätön neutralointireaktori ennen muutostöitä.



Kuva 2. Kaanaan jätevedenpuhdistamon eristämätön neutralointireaktori.

2.2 Hapettumis-pelkistymisreaktio

Hapettumis-pelkistymisreaktiossa kahden aineen välillä tapahtuu hapetusluku-
jen muutos. Hapetusluku muuttuu, kun elektroni siirtyy aineelta toiselle. Elektro-
nin menettävän aineen hapetusluku kasvaa, mikä johtaa hapettumiseen, kun
taas elektronin vastaanottavan aineen hapetusluku laskee, jolloin aine pelkistyy.
[6, s. 104.]

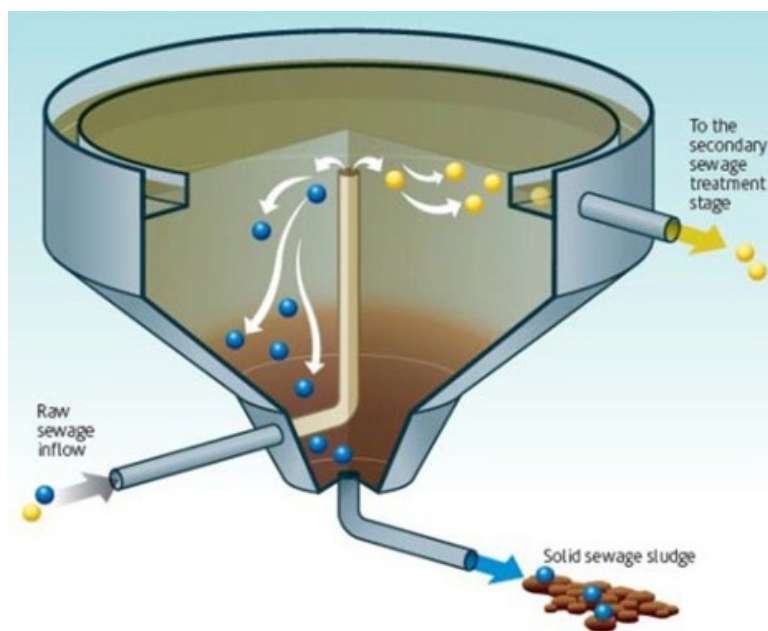
Kaanaan teollisuuspuistossa jätevesien liukoinen kaksiarvoinen rauta hapetetaan kolmiarvoiseksi reaktioyhtälön 1 mukaisesti.



Raudanpoisto tapahtuu hapetusreaktoreissa, jotka ovat identtisiä neutralointireaktorin kanssa. Raudanpoiston edellyttämä happi saadaan reaktoreihin puhallettavasta ilmasta. Ilma tuotetaan turbokompressoreilla. Ensimmäiseen reaktoriin johdetaan kalkkikiviliettä, ja sen annostelua ohjataan pH-mittausten avulla. On tärkeää, että pH-arvot pysyvät asetetuilla alueilla, sillä rauta ei hapetu eikä saostu, jos pH-arvo on liian alhainen. [2.]

2.3 Selkeytys

Selkeytyksessä hyödynnetään painovoimaa, ja tavoitteena on saada neste ja siinä oleva kiintoaine eroteltua toisistaan. Selkeytyksessä laskeutuva kiintoaine, jota kutsutaan sakaksi, laskeutuu altaan pohjalle. Kuvassa 3 on havainnollistava kuva selkeytysprosessista, jossa keltaiset pallot kuvastavat puhdistettua nestettä ja siniset pallot puolestaan vajoavaa sakkaa.



Kuva 3. Selkeytysprosessi [8].

Kaanaan jätevedenpuhdistamolla neutralointivaiheen jälkeinen ensimmäinen selkeytin (kuva 4) toimii normaalitilanteessa pääasiassa sakeuttimena. Selkeytimeen lisätään selkeytysapuainetta (Superfloc), jolloin kiintoaine painuu pohjalle. Tämä sakka pumpataan suodatukseen. Raudanpoiston jälkeinen neutraloidun jäteveden selkeytys tapahtuu toisessa selkeyttimessä, johon myös lisätään Superfloc-apuainetta. Molempien selkeyttimien pohjassa on laahain, joka pyörii jatkuvasti ohjaten vajonnutta sakkaa selkeyttimen keskiöön, nostamalla välillä pyörimiskorkeutta. [2.]



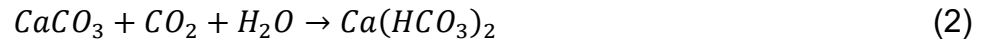
Kuva 4. Kaanaan neutralointilaitoksen ensimmäinen selkeytin (P15.01).

2.4 Kemikaalit

Kaanaan neutralointilaitoksella käytetään kahta kemikaalia, kalkkikiveä ja polymeeriä. Kalkkikivi toimii neutralointiaineena sen emäksisyyden ansiosta, ja selkeytysapuaineena polymeeri tehostaa selkeytysprosessin toimintaa.

2.4.1 Kalkkikivi

Kalkkikivi, eli kalsiumkarbonaatti, on luonnollinen mineraali, joka ei liukene veteen ilman hiilidioksidin läsnäoloa. Liuetessaan veteen hiilidioksidin kanssa se muodostaa vetykarbonaattia reaktioyhtälön 2 mukaisesti. [2.]



Kalkkikivi on emäksinen, ja sen ionien reagoidessa veden kanssa pH-arvo nousee. Kalkkikiven ja jäteveden eri komponenttien väliset reaktiot ovat monimutkaisia ja tapahtuvat asteittain. Kaikkia reaktioissa tapahtuvia mekanismeja ei myöskään tarkkaan tunneta. [5.]

Kaanaaseen toimitettava jauhettu kalkkikivi puhalletaan kalkkisiiloihin, jonka jälkeen kalkkiviliete valmistetaan kahdessa liettosäiliössä (kuva 5). Liettosäiliöihin annostellaan automaattisesti vettä ja kalkkivilijauhetta määrättyssä suhteessa.

Järjestelmä on suunniteltu siten, että normaalitilanteessa käytössä on kaksi eri kalkkivilietteen valmistuslinjaa, jotka molemmat pystyvät huolehtimaan tarvittaessa koko prosessin kalkkivilitarpeesta. [5.]



Kuva 5. Kalkkisiilot ja niiden alapuolella liettosäiliöt.

2.4.2 Polymeeri

Selkeytysapuainevalmistuslinjoja on kaksi, ja molemmissa on samanlainen laitteisto (kuva 6). Selkeytysapuaineliuos valmistetaan sekoittamalla jauhemaista selkeytysapuainetta, Superfloc C-491 VP:tä, ja vettä. Normaalitylanteessa molemmat linjat ovat käytössä, mutta häiriötilanteessa pystytään täyttämään prosessin apuainetarve ajamalla vain yhtä linjaa. [2.]



Kuva 6. Apuaineen sekoitussäiliö (P16.02).

3 Rebuild-hankkeen tuomat muutokset

Vuoden 2017 tulipalon jälkeen alueen toiminta on pienentynyt huomattavasti, mikä on näkynyt myös käsiteltävien jätevesien määrässä. Pienentyneet jätevesien määrät ovat aiheuttaneet sen, että jätevedenpuhdistamo on ollut ylimitoitettu alueen tarpeisiin.

Rebuild-hanke aloitettiin jo kesällä 2024, jolloin prosessin kaksi reaktoria ohitettiin ja ne jätettiin pois käytöstä. Ohitetut reaktorit ovat yksi neutralointireaktori (P14.02) ja yksi hapetusreaktori (P21.02). Käyttöön jätettiin yksi neutralointireaktori (P14.01) ja kaksi hapetusreaktoria (P21.01 ja P21.03).

Käyttöön jääneet reaktorit eristetään, kuten kuvan 7 reaktori. Eristystöillä pyritään vähentämään prosessiin syötettävän veden lämmittämiseen tarvittavan lämmityshöyryn kulutusta. Lämmityshöyry saadaan teollisuuspuistossa toimivalta yhteistuotantolaitokselta, jonka Porin Prosessivoima Oy omistaa.



Kuva 7. Polyuretaanilla eristetty reaktori.

Myös viimeisen selkeyttimen (P22.01) ja maa-altaiden välille tehtiin uusi lyhyempi putki, joka eristetään (kuva 8). Ennen muutostöitä putken pituus oli 120 m ja rebuild-hankkeen yhteydessä rakennettu uusi putki on pituudeltaan vain 50 m. Myös putkiluokka vaihtui DN300-putkesta DN200-putkeksi.



Kuva 8. Selkeyttimestä (P22.01) maa-aitaille johtavan uuden putken loppuosa.

Eistemateriaalina reaktoreissa sekä putkessa käytetään polyuretaania. Eristekerroksen paksuus reaktoreissa ja putkessa on 50 mm. Polyuretaani on yleisesti teollisuudessa käytetty eristysratkaisu. Polyuretaani on umpisoluista kerta-
muovia, ja jo ohut kerros toimii tehokkaana eristeenä [9].

Näillä toimenpiteillä pyritään vähentämään lämpöhäviöitä, ja toiminnasta saadaan energiatehokkaampaa. Muutoksilla odotetaan olevan positiivisia vaikutuksia myös taloudellisesti energiankulutuksen pienentyessä. Prosessin toiminta-periaate pysyy kuitenkin täysin samana, kuin aiemmin.

4 Lämmönsiirto ja virtaustekniikka

4.1 Lämmönsiirron ja virtaustekniikan yleiset periaatteet

Lämmönsiirto on seurausta lämpötilaeroista ja niiden aiheuttamista lämpöenergiavirroista. Lämpöenergia siirtyy termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan, kunnes saavutetaan lämpötilojen tasapaino kahden pisteen välillä. Lämmönsiirtoprosessi voi

tapahtua kolmea eri mekanismia pitkin: konvektion, johtumisen ja säteilyn avulla. Virtaustekniikka kattaa nesteiden ja kaasujen liikkumisen ja niiden yhteyden lämmönsiirron kanssa. [10.]

4.2 Lämpöhäviöihin vaikuttavat keskeiset tekijät reaktoreissa ja putkissa

Lämpöhäviöitä tarkasteltaessa on syytä huomioida virtauksen ja geometrian vaikutus lämmönsiirron tehokkuuteen. Virtaus tehostaa lämmönsiirtoa ja geometria vaikuttaa virtauksen ominaisuuksiin.

4.2.1 Virtausominaisuudet ja dimensiottomat luvut

Virtausominaisuuksien huomioiminen on erittäin tärkeää lämpöhäviöiden laskennassa, kun tarkasteltava aine on liikkeessä. Reaktoreiden ja putkien lämpöhäviöiden tarkasteluun käytetään kolmea dimensiotonta lukua, jotka ovat Reynoldsin luku, Prandtin luku ja Nusseltin luku.

Etenkin reaktoreiden tarkastelussa Nusseltin luvulle on useita korrelaatioita. Nusseltin luku kuvaa fluidin pinnalla esiintyvää dimensiotonta lämpötilagradienttia, eli se ilmaisee konvektiolla tapahtuvan lämmönsiirron ja johtumisen välistä suhdetta [11]. Nusseltin luvun avulla voidaan määrittää sisäpinnan konvektion lämmönsiirtokerroin, ja tilanteeseen sopivan korrelaation valinta on tärkeä osa lämpöhäviöiden laskentaa. Jokaista edellä mainittua dimensiotonta lukua tarvitaan, jotta konvektion lämmönsiirtokerroin saadaan laskettua Nusseltin luvun avulla.

Reynoldsin luvulla kuvataan tarkasteltavan aineen virtauslajia, joka huomioi virtaukseen vaikuttavien hitausvoimien ja viskoosien voimien suhteen. Virtaus määritetään joko laminaariseksi tai turbulenttiseksi lasketun Reynoldsin luvun perusteella. Laminaarisessa virtauksessa nestehiukkaset liikkuvat virtaviivoja pitkin samaan suuntaan säteen ja tangentialisen nopeuskomponentin ollessa nolla. Täysin turbulenttisessa virtauksessa nestehiukkaset eivät kulje samaan

suuntaan, vaan liikkuvat jopa välillä virtaussuuntaa vastaan. Tämä aiheuttaa virtauksen jatkuvan sekoittumisen. [11.]

Määrittämiä Reynoldsin luvun suuruudelle, jolloin virtaus on laminaarista tai turbulentista on lukuisia, koska virtauksen siirtymävyöhykkeen rajaa ei pystytä tarkasti määrittämään. Raja-arvot virtaustyypeille reaktoreissa ja putkissa eroavat toisistaan. Putkivirtaukselle voidaan käyttää määrittämiseen seuraavia raja-arvoja: $2\,300 \leq Re \leq 4\,000$. [12.] Virtauksen voidaan yleisesti olettaa olevan laminaarista, kun Reynoldsin luku on alle 2 300 ja täysin turbulentista luvun ollessa yli 4 000. Reynoldsin luvun ollessa näiden välillä, kuvataan virtauksen olevan siirtymäalueella. Sekoitetuissa reaktoreissa voidaan käyttää Reynoldsin luvulle raja-arvoja $10 \leq Re \leq 10^4$ [13].

Sekoitetun reaktorin lämpöhäviölaskuissa on tärkeää huomioida virtauksen voimakkuus, koska sekoitus tehostaa lämmönsiirtoa. Myöhemmin esitettävissä lämpöhäviölaskuissa on käytetty Reynoldsin luvun määrittämiseen reaktoreissa kaavaa 3 [14, s. 1452] ja putken lämpöhäviölaskuissa kaavaa 4 [12]. Reaktoreiden virtaukseen vaikuttaa vahvasti sekoittimen geometria, joten se on huomioitu Reynoldsin luvun kaavassa 3.

$$Re = \frac{\rho \cdot d_r \cdot n}{\eta} \quad (3)$$

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\eta} \quad (4)$$

Re on Reynoldsin luku (-)

ρ on nesteen tiheys nesteen keskilämpötilassa (kg/m^3)

d_r on potkurin halkaisija (m)

n on sekoittimen pyörimisnopeus (rps)

v on veden virtausnopeus putkessa (m/s)

d on putken sisähalkaisija (m)

η on dynaaminen viskositeetti (Pa·s)

Prandtin luvun avulla voidaan yhdistää aineen ominaisuudet ja virtausolosuhteet, mikä on tärkeää lämmönsiirron arvioinnissa. Nusseltin ja Reynoldsin luvusta poiketen Prandtin luku ei ole riippuvainen geometriasta, vaan se tarkastelee ainoastaan tietyn aineen ominaisuuksia tietyssä lämpötilassa. [15.]

Prandtin luku voidaan laskea kaavalla 5.

$$Pr = \frac{v}{a} \quad (5)$$

Pr on Prandtin luku (-)

v on kinemaattinen viskositeetti ($m^2 \cdot s$)

a on lämpödiffuusio ($m^2 \cdot s$)

Nusseltin lukua käytetään usein määrittämään konvektiivinen lämmönsiirtokerroin. Vapaassa ja pakotetussa konvektiossa Nusseltin luku määritetään eri korrelaatioilla. Käytettävä kaava riippuu vahvasti myös tarkasteltavasta kohteesta. Tässä insinööriyössä tarkasteltavien reaktoreiden ja putken lämpöhäviöiden määrittämiseen käytettävät Nusseltin luvun kaavat eroavat huomattavasti toisistaan. Reaktoreita tarkasteltaessa potkurimaisille sekoittimille Nusseltin luku voidaan määrittää VDI Heat Atlaksesta [14, s. 1454] saadulla kaavalla 6.

$$Nu = 0,505 \cdot \Psi_p \cdot Re^{2/3} \cdot Pr^{1/3} \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0,14} \quad (6)$$

jossa Nu on Nusseltin luku (-), η_w on nesteen dynaaminen viskositeetti seinämän keskilämpötilassa ($Pa \cdot s$) ja Ψ_p ottaa huomioon sekoittimen geometrian.

Työssä tarkasteltavien reaktoreiden tapauksessa Ψ_p lasketaan kaavalla 7:

$$\Psi_p = \exp(0,3 \cdot \ln Z - 0,0144 \cdot Z) \left\{ \frac{0,278 \cdot \exp[0,0469 \exp(0,923 \cdot \ln Z)]}{\frac{\pi \cdot d_r \cdot \tan(\gamma)}{d_r}} + 1 \right\}^{-1} \quad (7)$$

Z on potkurin siipien lukumäärä (-)

γ on potkurin siiven kulma ($^\circ$)

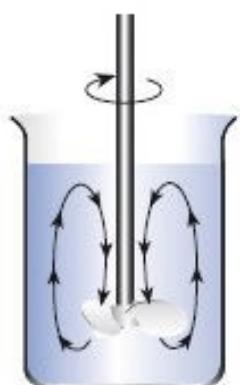
Turbulenttisessa putkivirtauksessa voidaan käyttää kaavaa 8 Nusseltin luvun määrittämiseksi [15].

$$Nu = 0,037(Re^{0,75} - 180)Pr^{0,42} \quad (8)$$

4.2.2 Geometriset ominaisuudet

Lämmönsiirtoon reaktoreissa ja putkissa vaikuttavat merkittävästi geometriset ominaisuudet. Erilaiset sekoittimet tuottavat erilaisia virtausprofiileja reaktoreiden sisällä. Reaktoreiden ja putken geometria vaikuttaa merkittävästi virtausolosuhteisiin. Näiden yhteisvaikutus lämpöhäviöiden kannalta on merkittävä, joten niiden huomioiminen laskennassa on välttämätöntä.

Yleisimmin käytettyjä sekoittimia ovat erilaiset turbiinit, siipipyörät ja potkurit [14, s. 1453]. Erityyillisillä sekoittimilla saadaan aikaan erilaisia virtauskenttiä. Työssä tarkasteltavissa reaktoreissa on kolme 2-lapaista potkuria kiinnitettynä samaan runkoon. Potkurimaiset sekoittimet luovat voimakkaita pyörteitä, jotka tehostavat lämmönsiirtoa. Kuvan 9 virtausprofiilista nähdään, kuinka potkurisekoitin ohjaa nesteen kohti pohjaa ja seinämiä.

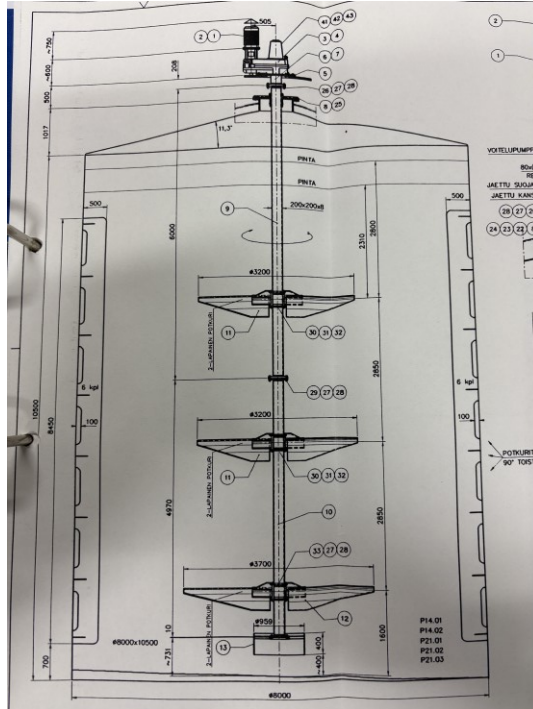


Kuva 9. Potkurimaiselle sekoittimelle ominainen virtausprofiili [16].

Erilaiset geometriset muodot saavat aikaan erilaiset virtausprofiilit, ja putken halkaisija on tärkeä tekijä putken lämmönsiirtoa tarkasteltaessa. Näiden

tekijöiden tarkastelu on tärkeää, jotta lämpöhäviöt voidaan selvittää mahdollisimman tarkasti.

Kuvassa 10 esitetään työssä tarkasteltavan reaktorin kokoonpano, josta ilmenee reaktoreiden geometria sekä reaktoreiden potkurisekoittimet ja niiden mitat.



Kuva 10. Reaktoreiden kokoonpano.

5 Lämpöhäviöiden laskenta

Kappaleessa esitetään kaikki laskentaan olennaiset lähtötiedot, oletukset ja kaavat. Kappaleessa esitetään myös lämpöhäviölaskujen tulokset ennen eristystöitä ja niiden jälkeen. Laskennassa käytetyt lähtötiedot perustuvat pitkälti kokemukseen, yleisiin arvoihin ja oletuksiin, sillä prosessin ohjausjärjestelmä on vanha eikä oleellisia tietoja, kuten lämpötiloja ja virtausmääriä, ole tallentunut tarkkojen arvojen käyttämiseksi. Käytettyjen oletusten takia saatuihin tuloksiin liittyy merkittäviä epävarmuustekijöitä, joita on käsitelty tarkemmin luvussa 6.2.

Tarkasteltavat reaktorit ovat tasapohjaisia ja ympyrälieriön muotoisia, ja niiden katot ovat kartion muotoisia. Jokainen reaktori on sijoitettu betonialustan päälle. Reaktoreiden ja putken sisällä olevan nesteen ja ympäristön välillä lämmönsiirto tapahtuu siis seuraavasti: pakotetulla konvektiolla nesteestä reaktoreiden seinämän pintaan, johtumalla seinämän ja eristeen läpi reaktoreiden ulkopintaan ja lopuksi konvektion sekä säteilyn yhteisvaikutuksesta ympäröivään ulkoilmaan. Pohjan kautta ei tapahdu konvektiota ja säteilyä ulkoilmaan, vaan pohjassa lämpö siirtyy johtumalla reaktorin pohjan ulkopinnasta betonialustaan.

5.1 Laskennan oletukset ja rajaukset

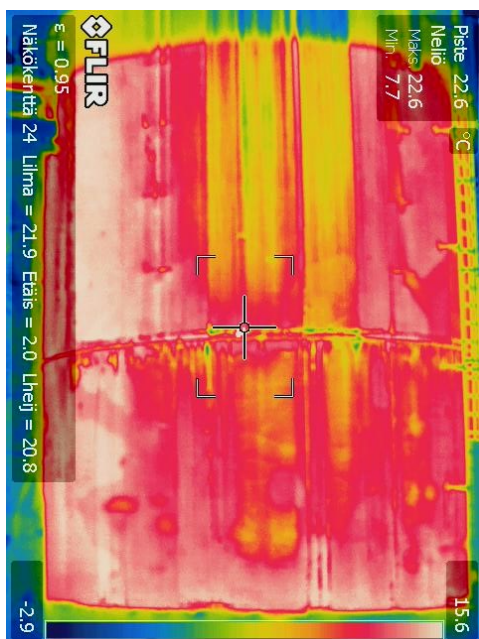
Laskuissa oletetaan lämmönsiirron olevan stationääristä ja reaktoreiden sisällön olevan täysin sekoittunutta ja yhtä lämmintä joka paikassa, jolloin lämpöhäviö on yhtä suurta joka puolelta reaktoreita. Laskenta on rajattu tutkimaan ainoastaan muutostöiden kohteena olleita kolmea reaktoria sekä yhtä putkea.

Laskuissa on käytetty normaalin veden ominaisuuksia 1 baarin paineessa, vaikka todellisuudessa reaktoreiden sisällön ominaisuudet eroavat hieman tavallisen veden ominaisuuksista. Tarkempien nesteen ominaisuuksien selvittäminen kyseisessä prosessissa vaatisi poisteveden kattavia analyysejä, joihin ei ole ollut mahdollisuutta tämän työn puitteissa.

Laskuissa oletetaan myös, että reaktorit ovat täynnä nestettä, vaikka todellisuudessa tilavuudeltaan 500 m³:n reaktoreista vain 400 m³ on nestettä. Laskuissa ei oteta huomioon esimerkiksi liitoskohdista tai suuaukoista aiheutuvia vaikutuksia lämpöhäviöiden määrään. Nesteen lämpötilan muutoksia prosessin eri vaiheissa ei ole huomioitu, koska lämpötilojen muutos on hyvin pientä eikä näin ollen aiheuta merkittäviä muutoksia tuloksiin. Reaktoreiden sisäseinään ajan kuluessa kertyvän lian vaikutusta ei ole huomioitu kokonaislämpövastuksessa.

Reaktorin pinta lähettää lämpösäteilyä, joka voidaan havaita lämpökameran avulla. Lämpökameralla otetusta kuvasta 11 voidaan todeta, että reaktorin vaippa on lämpötilaltaan sama joka puolelta reaktoria. Kuvassa reaktorin pinta

näkyä punertavana ja reaktorin ympäristö sinertävänä. Punaisten ja keltaisten alueiden lämpötilaero on hyvin pieni, joten tätä ei ole huomioitu laskennassa. Kuvassa 11 esiintyvät lämpötilat eivät ole todenmukaisia, koska reaktorin suuren koon takia kuva on jouduttu ottamaan etäältä reaktorin pinnasta. Pintojen lämpötilojen selvittämiseksi on toteutettu tarkemmat mittaukset läheltä reaktorin pintaa.



Kuva 11. Lämpökamerakuva eristämättömästä reaktorista. Värit kuvaavat tarkasteltavan pinnan eri lämpötiloja.

Lämpökuva on otettu eristämättömästä reaktorista, mutta voidaan olettaa, että myös eristetyssä reaktorissa neste on yhtä lämmintä joka puolella reaktoria. Myöhemmin esitettävä Reynoldsin luvun suuruus tukee oletusta reaktoreiden sisällön homogeenisuudesta ja vahvistaa reaktoreiden sisällön olevan täysin sekoittunutta.

5.2 Lähtötiedot

Toimeksiantajan kanssa on sovittu, että laskuissa reaktoreiden ja putken sisällön lämpötilana käytetään arvoa $+10\text{ °C}$ ja ulkolämpötilana vuoden sisällä Porin kylmimpien kuukausien keskilämpötiloista (vuoden 2023 joulukuun, vuoden

2024 tammikuun ja vuoden 2024 helmikuun) saatua keskiarvoa $-5,3\text{ °C}$. Toimeksiantajan pyynnöstä esitetään myös maksimilämpöhäviöt ulkolämpötilassa -20 °C . Työssä tarkemman selvityksen kohteena on lämpöhäviöt keskilämpötilassa $-5,3\text{ °C}$.

Laskuissa ulkopinnan lämmönsiirtokertoimen määrittämiseen käytetään toimeksiantajan kanssa sovittua tuulen nopeutta 5 m/s , koska laitos sijaitsee tuulisella paikalla merenrannalla.

Taulukoissa 1–4 on esitetty laskennassa käytetyt lähtöarvot reaktoreille ja putkelle sekä veden ominaisuudet.

Taulukko 1. Reaktorin lähtöarvot.

Reaktori	Arvo	Yksikkö
Pohjan pinta-ala	50,3	m ²
Vaipan pinta-ala	263,9	m ²
Katon pinta-ala (kartio)	37,7	m ²
Seinämän paksuus	0,003	m
Eristeen paksuus	0,05	m

Taulukko 2. Eristämättömän putken lähtöarvot.

Putki DN300	Arvo	Yksikkö
Pituus	120	m
Ulkohalkaisija	0,32	m
Seinämän paksuus	0,0025	m
Eristeen paksuus	0,05	m

Taulukko 3. Eristetyn putken lähtöarvot.

Putki DN200	Arvo	Yksikkö
Pituus	50	m
Ulkohalkaisija	0,219	m
Seinämän paksuus	0,002	m
Eristeen paksuus	0,05	m

Taulukossa 4 listatut veden ominaisuuksien arvot toteutuvat vain +10 °C:n lämpötilassa 1 baarin paineessa. Prandtlin luku on laskettu aiemmin esitettyä Prandtlin luvun kaavaa 7 käyttäen.

Taulukko 4. Veden ominaisuuksia +10 °C:n lämpötilassa [14, s. 154].

Vesi	Arvo	Yksikkö
Tiheys	999,7	kg/m ³
Dynaaminen viskositeetti	0,00131	Pa·s
Kinemaattinen viskositeetti	1,306·10 ⁻⁶	m ² /s
Lämmönjohtavuus	0,582	W/m·K
Lämpödiffuusio	0,1388·10 ⁻⁶	m ² /s
Prandtlin luku	9,41	-

Reaktoreiden ja putken seinämän materiaali on SS2343 haponkestävää terästä. Laskuissa seinämän lämmönjohtavuutena on käytetty arvoa 24 W/m·K [17] ja emissiivisyyden arvoa 0,4 [18]. Betonin lämmönjohtavuutena on käytetty lämmönjohtavuuden arvoa 1,2 W/m·K [19] ja lämmönsiirtokertoimenä arvoa 14 W/m²·K [20]. Polyuretaanin lämmönjohtavuutena laskuissa on käytetty arvoa 0,023 W/m·K [21] ja emissiivisyytenä arvoa 0,87 [22].

Laskuissa on käytetty sekoittimen lapojen halkaisijana keskiarvoa 3,4 m ja kierosnopeutena 0,4 rps. Veden virtausnopeudeksi tarkasteltavassa putkessa on laskettu 0,45 m/s kolmen viikon mittausjakson aikana syksyllä 2024. Lisäksi reaktoreiden ja putken pintojen lämpötilat mitattiin, kun ympäristön lämpötila oli +6 °C. Näissä mittauksissa havaittiin, että eristämättömän reaktorin ulkopinta oli nesteen lämpötilassa, ja eristetyissä reaktoreissa eristeen ulkopinnan lämpötila oli +2 °C korkeampi, kuin ympäristön lämpötila. Laskelmissa oletetaan, että eristämättömät ulkopinnat ovat samassa lämpötilassa nesteen kanssa ja että eristettyjen ulkopintojen lämpötila on +2 °C ympäristön lämpötilaa korkeampi. Todellisuudessa ympäristön lämpötilojen vaihtelun vaikutus pintojen lämpötilaan voi poiketa mittaustuloksista.

5.3 Lämpöhäviöt

Jokainen tarkastelun kohteena olevista reaktoreista ovat yhtä suuria, joten jokaiselle reaktorille pätee sama laskentamenetelmä. Kappaleessa listataan käytetyt kaavat lukuun ottamatta dimensiottomien lukujen kaavoja, jotka on esitelty jo aiemmin luvussa 4.2.1. Varsinaiset lämpöhäviölaskujen tulokset yhdelle reaktorille ja putkelle esitetään taulukkomuodossa luvussa 5.3.2 ja myöhemmin luvussa 6.1 on laskettu jokaisen tarkasteltavan reaktorin lämpöhäviöt yhteen.

5.3.1 Laskuissa käytetyt kaavat

Reaktoreiden ja putken sisäpinnan konvektiolämmönsiirtokerroin saadaan laskettua Nusseltin lukua hyödyntäen reaktorille kaavaa 9 käyttäen ja putkelle kaavalla 10.

$$\alpha_s = Nu \cdot \frac{\lambda}{a_r} \quad (9)$$

$$\alpha_s = Nu \cdot \frac{\lambda}{a} \quad (10)$$

Nu on Nusseltin luku (-)

λ on veden lämmönjohtavuus (W/m·K)

Reaktoriden ja putken ulkopinnan lämmönsiirtokerroin on laskettu käyttäen standardista PSK 3704 [23, s. 23] löytyviä kaavoja. Ilma on reaktoreiden ja putken ympärillä selvästi havaittavassa liikkeessä, joten ulkopuolinen lämmönsiirtokerroin saadaan laskettua reaktorille kaavalla 11 ja putkelle kaavalla 12. Kaavoissa on huomioitu ulkopinnasta tapahtuva säteily ja konvektio.

$$\alpha_u = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_e^4 - T_o^4}{T_e - T_o} + 6,2 + 4,2 \cdot v \quad (11)$$

$$\alpha_u = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_e^4 - T_o^4}{T_e - T_o} + 4,13 \cdot v^{0,8} \cdot d^{-0,2} \quad (12)$$

ε on emissiivisyys (-)

σ on Stefan-Boltzmanin vakio (W/m²·K⁴)

T_e on uloimman materiaalipinnan lämpötila (K)

T_o on ulkolämpötila (K)

v on tuulen nopeus (m/s)

d_e on eristeen vahvuus (m)

Lämpöhäviön selvittämiseksi tulee ratkaista kokonaislämpövastus tarkasteltavalle systeemille. Jokaiselle lämmönsiirtymistavalle on oma kaava, jolla lämpövastus saadaan laskettua.

Reaktoreille ja putkelle kokonaislämpövastukset saadaan selvitettyä laskemalla yhteen konvektion, johtumisen ja säteilyn lämpövastukset. Eristämättömien reaktoreiden kokonaislämpövastukset on laskettu kaavalla 13 ja eristämättömälle putkelle kaavalla 14.

$$R_t = \frac{1}{\alpha_s \cdot A_t} + \frac{d_w}{\lambda_w \cdot A_{vk}} + \frac{1}{\alpha_u \cdot A_{vk}} \quad (13)$$

$$R_t = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L) \alpha_s} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_w} + \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot L) \alpha_u} \quad (14)$$

R_t on kokonaislämpövastus (K/W)

- α_s on sisäpuolen lämmönsiirtokerroin (W/m²·K)
 α_u on ulkopinnan lämmönsiirtokerroin (W/m²·K)
 A_t on kokonaispinta-ala (m²)
 d_w on seinämän vahvuus (m)
 λ_w on seinämän lämmönjohtavuus (W/m·K)
 A_{vk} on katon ja vaipan yhteenlaskettu pinta-ala (m²)
 r_1 on säde putken sisäpintaan (m)
 r_2 on säde putken ulkopintaan (m)
 L on putken pituus (m)

Eristetyissä reaktoreissa ja putkissa aiempiin kaavoihin 13 ja 14 lisätään tilanteen mukaisesti johtumista vastustava tekijä. Eristettyjen reaktoreiden kokonaislämpövastus on laskettu kaavaa 15 käyttäen ja eristetyn putken kaavaa 16 käyttäen.

$$R_t = \frac{1}{\alpha_s \cdot A_t} + \frac{d_w}{\lambda_w \cdot A_{vk}} + \frac{d_e}{\lambda_e \cdot A_v} + \frac{1}{\alpha_u \cdot A_{vk}} \quad (15)$$

$$R_t = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L) \cdot \alpha_s} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_w} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_e} + \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot L) \cdot \alpha_u} \quad (16)$$

- λ_e on eristeen lämmönjohtavuus (W/m·K)
 A_v on reaktorin vaipan pinta-ala (m²)
 r_3 on säde putken eristeen ulkopintaan (m)

Reaktoreissa vaipan ja katon kautta tapahtuva lämpöhäviö sekä putkessa kokonaislämpöhäviö voidaan määrittää kaavalla 17.

$$Q = \frac{T_s - T_o}{R_t} \quad (17)$$

- Q on lämpöhäviö (W)
 T_s on nesteen lämpötila (K)

Reaktorin pohjan kautta tapahtuva lämpöhäviö on laskettu erillisenä tapauksena vaipan ja katon lämpöhäviöistä. Pohjan kautta tapahtuva lämpöhäviö voidaan laskea kaavaa 18 käyttäen.

$$Q_p = \alpha_b \cdot A_p \cdot (T_s - T_o) \quad (18)$$

Q_p on pohjan lämpöhäviö (W)

α_b on betonin lämmönsiirtokerroin (W/m²·K)

A_p on reaktorin pohjan pinta-ala (m²)

Kokonaislämpöhäviö voidaan siis laskea reaktoreille kaavalla 19, jossa on huomioitu myös pohjan kautta syntyvät lämpöhäviöt.

$$Q_t = Q + Q_p \quad (19)$$

Q_t on reaktorin kokonaislämpöhäviö (W)

5.3.2 Lämpöhäviölaskut

Taulukot 5–8 kuvaavat yhden reaktorin ja putken lämpöhäviöiden määrää toimeksiantajan pyytämässä ulkolämpötiloissa. Taulukoista ilmenee myös lasketut dimensiottomien lukujen arvot, sisä- ja ulkopinnan lämmönsiirtokerroimet, kokonaislämpövastukset, lämpöhäviöt sekä lämpöhäviöt kuukaudessa. Taulukoista nähdään, kuinka kokonaislämpövastus kasvaa eristetyille kohteille. Tämän takia myös lämpöhäviöt pienentyvät. Laskuissa käytetyt kaavat on esitetty aiemmissa luvuissa 4.2.1 ja 5.3.1. Taulukoiden lämpöhäviössä tarkastellaan vain yhtä reaktoria. Reaktoreiden yhteenlaskettua lämpöhäviöiden määrää arvioidaan myöhemmin luvussa 6.1.

Taulukko 5. Reaktorin lämpöhäviöt ulkolämpötilassa $-5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Reaktori	Eristämätön reaktori	Eristetty reaktori
<i>Nusseltin luku</i>	26704,5	26704,5
<i>Reynoldsin luku</i>	$34,7 \cdot 10^5$	$34,7 \cdot 10^5$
<i>Sisäpinnan lämmönsiirtokerroin</i>	4616,4 W/m ² ·K	4616,4 W/m ² ·K
<i>Ulkopinnan lämmönsiirtokerroin</i>	29,1 W/m ² ·K	31,0 W/m ² ·K
<i>Kokonaislämpövastus</i>	0,0001 K/W	0,0083 K/W
<i>Lämpöhäviö</i>	133,1 kW	1,9 kW
<i>Lämpöhäviö kuukaudessa</i>	95,8 MWh	1,4 MWh

Taulukko 6. Reaktorin lämpöhäviöt ulkolämpötilassa $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Reaktori	Eristämätön reaktori	Eristetty reaktori
<i>Nusseltin luku</i>	26704,5	26704,5
<i>Reynoldsin luku</i>	$34,7 \cdot 10^5$	$34,7 \cdot 10^5$
<i>Sisäpinnan lämmönsiirtokerroin</i>	4616,4 W/m ² ·K	4616,4 W/m ² ·K
<i>Ulkopinnan lämmönsiirtokerroin</i>	29,0 W/m ² ·K	30,4 W/m ² ·K
<i>Kokonaislämpövastus</i>	0,0001 K/W	0,0083 K/W
<i>Lämpöhäviö</i>	259,7 kW	3,7 kW
<i>Lämpöhäviö kuukaudessa</i>	187,0 MWh	2,7 MWh

Taulukko 7. Putken lämpöhäviöt ulkolämpötilassa $-5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Putki	Eristämätön putki	Eristetty putki
<i>Nusseltin luku</i>	557,4	410,5
<i>Reynoldsin luku</i>	$1,1 \cdot 10^5$	$0,7 \cdot 10^5$
<i>Sisäpinnan lämmönsiirtokerroin</i>	1017,2 W/m ² ·K	1110,6 W/m ² ·K
<i>Ulkopinnan lämmönsiirtokerroin</i>	29,1 W/m ² ·K	31,1 W/m ² ·K
<i>Kokonaislämpövastus</i>	0,0003 K/W	0,6413 K/W
<i>Lämpöhäviö</i>	52,8 kW	0,02 kW
<i>Lämpöhäviö kuukaudessa</i>	38,1 MWh	0,02 MWh

Taulukko 8. Putken lämpöhäviöt ulkolämpötilassa $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Putki	Eristämätön putki	Eristetty putki
<i>Nusseltin luku</i>	557,4	410,5
<i>Reynoldsin luku</i>	$1,1 \cdot 10^5$	$0,7 \cdot 10^5$
<i>Sisäpinnan lämmönsiirtokerroin</i>	1017,2 W/m ² ·K	1110,6 W/m ² ·K
<i>Ulkopinnan lämmönsiirtokerroin</i>	29,0 W/m ² ·K	30,5 W/m ² ·K
<i>Kokonaislämpövastus</i>	0,0003 K/W	0,6413 K/W
<i>Lämpöhäviö</i>	103,1 kW	0,05 kW
<i>Lämpöhäviö kuukaudessa</i>	74,3 MWh	0,03 MWh

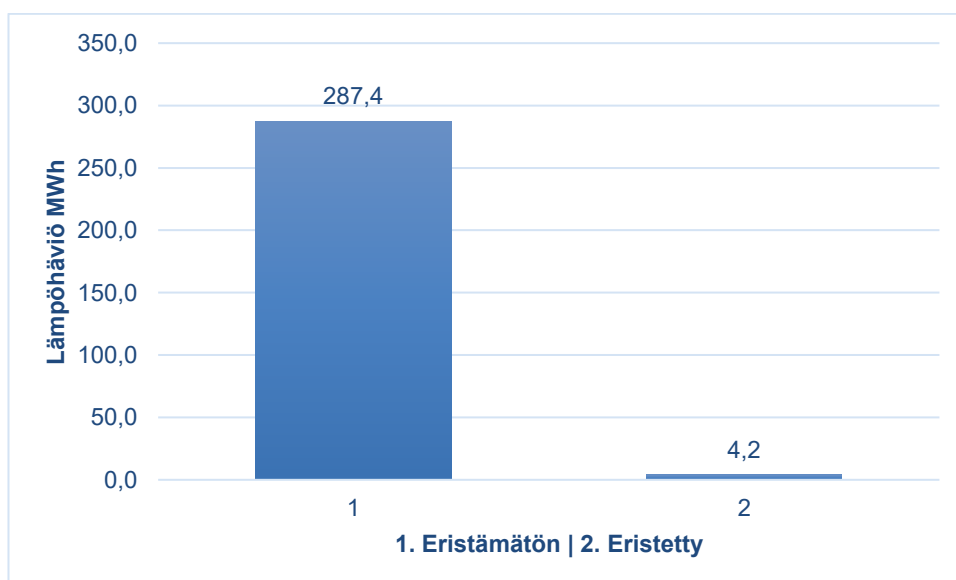
6 Tulosten arviointi

Tässä kappaleessa esitetään reaktoreiden ja putken lämpöhäviöt ennen ja jälkeen rebuild-hanketta sekä tarkastellaan höyrynkulutusta ennen muutostöitä ja arvioidaan, miten muutostyöt vaikuttavat tulevaan höyrynkulutukseen. Kappaleen tarkoituksena on esittää selkeästi muutostöiden konkreettiset vaikutukset lämpöhäviöihin, jotta voidaan hahmottaa, millaisia energiansäästöjä reaktoreiden ja putken eristämällä voidaan odottaa.

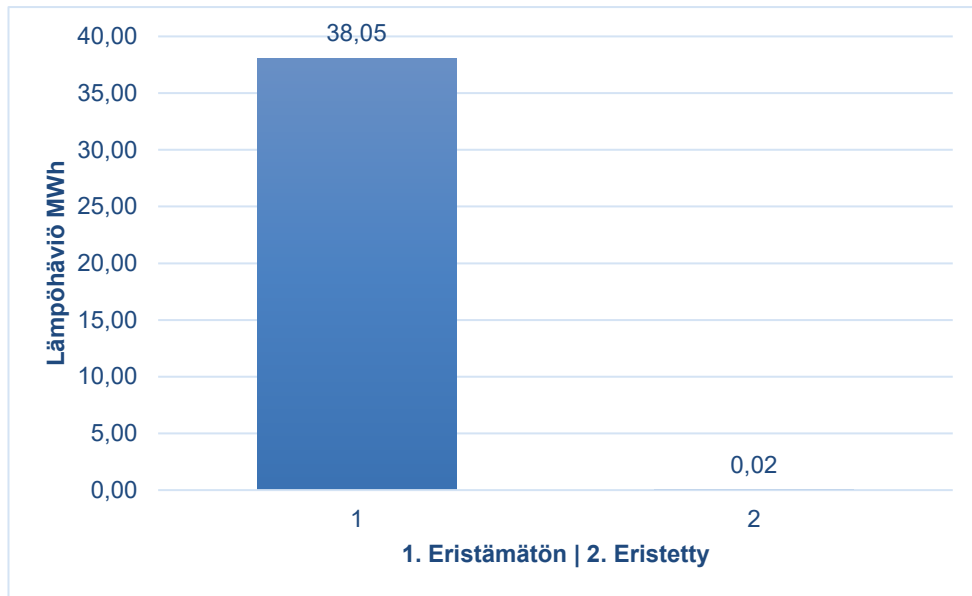
6.1 Lämpöhäviöiden vertailu

Tässä luvussa tarkastellaan lämpöhäviöitä tarkemmin ulkolämpötilan ollessa $-5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, koska $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$:n pakkasjaksot ovat epätodennäköisiä ja lyhytkestoisia. Aiemman luvun taulukoissa 5 ja 7 esitetään lämpöhäviöiden määrä yhtä reaktoria kohden ulkolämpötilassa $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Kuvissa 12 ja 13 on havainnollistettu eristämättömien ja eristettyjen reaktoreiden sekä putken lämpöhäviöt kuukaudessa, mikä mahdollistaa yksinkertaisen vertailun reaktorin ja putken lämpöhäviöistä ennen ja jälkeen eristystöiden.



Kuva 12. Kolmen eristämättömän ja eristetyn reaktorin yhteenlasketut lämpöhäviöt kuukaudessa ulkolämpötilassa $-5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Kuva 13. Eristämättömän ja eristetyn putken lämpöhäviöt kuukaudessa ulkolämpötilassa $-5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Kuvassa 12 on esitetty kolmen tarkasteltavan, identtisen reaktorin lämpöhäviöt. Kuvien 12 ja 13 perusteella voidaan selvästi havaita, kuinka merkittävästi eristystöiden odotetaan vähentävän lämpöhäviöitä. Laskujen pohjalta reaktoreiden eristyksen odotetaan olevan 98,5 % parempi ratkaisu aiempaan verrattuna ulkolämpötilan ollessa $-5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Samoin putkeen kohdistuneiden muutostöiden odotetaan olevan jopa 99,9 % parempi ratkaisu aiempaan verrattuna. Tähän vaikuttaa vahvasti se, että uusi putki on putkiluokaltaan pienempi ja 70 m lyhyempi aiempaan verrattuna.

Ennen muutostöitä prosessiin tulevan veden lämmityksessä käytetyn höyryn kuukausittaiseksi kulutukseksi on arvioitu olevan noin 2 100 MWh tarkasteltuina kuukausina. Laskennalliset lämpöhäviöt osoittavat, että lämpöhäviöiden odotetaan vähenevän huomattavasti, mikä näkyy suoraan myös höyrynkulutuksen pienenemisenä. Tässä insinööriyössä keskitytään kuitenkin vain muutostöiden aikaansaamaan lämpöhäviöiden vähenemiseen. Koko neutralointilaitoksen höyrynkulutuksen kokonaisvähenemistä ei voida arvioida tarkasti ilman, että tiedetään koko prosessin aikana syntyvien lämpöhäviöiden määrä.

6.2 Laskuissa käytettyjen oletusten vaikutus laskutuloksiin

Laskelmissa käytettiin oletuksia, joiden avulla laskentaa voitiin yksinkertaistaa. Lähtötiedot olivat rajalliset, joten käytetyt arvot eivät ole täysin tarkkoja. Tämä tuo saatuihin tuloksiin epävarmuutta. Käytettävissä olleiden lähtötietojen ja mahdollisuuksien vuoksi oletukset olivat välttämättömiä.

Ulkopinnan lämmönsiirtokertoimen laskennassa käytettiin tuulen nopeutta, jonka vaikutus lämpöhäviöihin on merkittävä. Laskelmissa ei kuitenkaan ole otettu huomioon sitä, että reaktoreiden ja putkien pinta-alat eivät ole jatkuvasti saman tuulen voimakkuuden vaikutuksen alaisena. Todellisuudessa osa pinta-aloista altistuu voimakkaammalle tuulelle, kun taas toinen osa on suojassa ja altistuu heikommalle tuulelle. Tarkempien arvojen saamiseksi tulisi tarkastella eri komponentteja yksilöllisemmin ja määrittää lämpöhäviöt ottaen huomioon olosuhteiden vaihtelut.

Reaktoreissa ja putkissa on myös erilaisia osia, kuten liitoksia, kannakkeita sekä luokkuja, jotka vaikuttavat lämmönsiirtoon. Näitä ei ole otettu laskelmissa huomioon. Tarkkojen tulosten saamiseksi tulisi jokainen poikkeama ottaa huomioon, ja niiden lämpöhäviöt tulisi arvioida erikseen. Mikäli tämän työn laskelmissa olisi huomioitu näiden vaikutukset, lämpöhäviöiden määrä olisi kasvanut.

Laskuissa oletettiin myös, että reaktorit ovat täynnä nestettä koko tilavuudeltaan laskennan yksinkertaistamiseksi. Todellisuudessa noin 20 % reaktorien tilavuudesta on ilmatilaa. Tämä ilmatila vaikuttaa lämmönsiirtoon, ja sen huomioiminen laskelmissa parantaisi tulosten tarkkuutta. Mikäli laskennassa huomioitaisiin ilmatilojen vaikutus, reaktorien lämpöhäviöt pienenisivät.

Laskelmissa käytettiin veden ominaisuuksia 1 baarin paineessa ja +10 °C:n lämpötilassa, mutta prosessiin syötettävä vesi eroaa tavallisen veden ominaisuuksista. Esimerkiksi yhteen reaktoreista syötetään kalkkipohjaista neutralointiliuosta, jonka tiheys on suurempi kuin veden. Myös jätevedessä olevien kiintoaineiden vaikutus nesteen ominaisuuksiin on suuri, mikä aiheuttaa lisää eroja tavalliseen veteen verrattaessa.

Lämpöhäviöitä tapahtuu myös prosessin vaiheissa, jotka ovat tämän työn rajauksen ulkopuolella. Prosessin edetessä nesteen lämpötilan laskee. Laskelmissa oletettiin, että nesteen lämpötila on sama kaikissa tarkastelun kohteissa. Myös hapetusilman vaikutus nesteen lämpötilaan jätettiin huomioimatta, sillä niiden vaikutus on hyvin minimaalinen suuren nestetilavuuden ja veden kohtuullisen korkean ominaislämpökapasiteetin takia. Tarkkojen tulosten saamiseksi olisi tärkeää arvioida, kuinka paljon lämpötila muuttuu prosessin eri vaiheissa. Tämä lämpötilan muutos olisi kuitenkin arvioitava laskennallisesti, koska prosessissa ei ole tällä hetkellä tallentavaa lämpötilamittausta sen eri vaiheista. Tarkkojen tulosten saamiseksi lämpötilamittaukset pidemmältä ajanjaksolta olisivat välttämättömiä.

Reaktoreihin ja putkiin kertyy likaa ajan myötä. Likakerros hidastaa lämmönsiirtoa, koska sen läpi tapahtuu johtumista. Likakerroksen paksuus ja lämmönjohtavuus vaikuttavat merkittävästi lämpöhäviöihin, joten niiden tarkka määrittäminen olisi tarpeen saadakseen laskelmista tarkkoja. Lisäksi likakerroksen paksuus muuttuu ajan kuluessa eli myös sen vaikutus lämpöhäviöihin vaihtelee ajan myötä. Muutostöiden yhteydessä reaktorit pestiin ja uusi putki on puhdas, joten tämä vaikutus on tässä työssä jätetty huomioimatta. Voidaan siis olettaa, että likakerroksen muodostuessa lämpöhäviöt pienentyvät hieman verrattuna tämän työn laskelmiin.

Ulkopintojen lämpötiloihin tehtiin oletuksia, ja tarkempiin laskelmiin pitäisi selvittää eristämättömien ja eristettyjen pintojen tarkat lämpötilat halutussa ulkolämpötilassa.

Useita laskennassa käytettyjä arvoja, kuten lämmönjohtavuuksia, on haettu eri lähteistä. Tämän vuoksi käytetyt arvot voivat vaihdella lähteiden mukaan.

7 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä selvitettiin Kaanaan teollisuuspuiston jätevedenpuhdistamolla toteutetussa rebuild-hankkeessa tehtyjen muutostöiden vaikutusta lämpöhäviöihin. Muutostöiden yhteydessä kaksi reaktoria ohitettiin ja jätettiin pois käytöstä. Myös puhtaan veden virtausputki tehtiin uudelleen. Uusi putki on putkiluokaltaan pienempi ja pituudeltaan huomattavasti lyhyempi, kuin aiempi. Käyttöön jääneet kolme reaktoria ja uusi putki eristettiin polyuretaanilla.

Työn tavoitteena oli tarjota toimeksiantajalle konkreettisia lukuarvoja lämpöhäviöistä ennen ja jälkeen muutostöiden. Saatujen tulosten avulla pyrittiin arvioimaan muutostöiden vaikutukset myös lämmityshöyryn kulutukseen.

Tämän työn laskenta pohjautui moniin oletuksiin, koska kaikkia lämpöhäviöihin vaikuttavia tekijöitä ei pystytty huomioimaan. Työssä saatiin suuntaa antavia tuloksia, koska täysin tarkkojen arvojen saamiseksi tulisi lämpöhäviöt määrittää asianmukaisilla tietokoneavusteisilla simulaatioilla ja mallinuksilla sekä tarkoilla mittaustuloksilla. Muutostöiden vaikutuksista saatiin kuitenkin odotusten mukaisesti riittävän hyvä kuva, jotta voitiin todeta niiden pienentävän laitoksen energiankulutusta ja siten myös käyttökustannuksia.

Ennen tätä työtä toimeksiantajalla ei ollut numeerista tietoa muutostöiden vaikutuksesta lämpöhäviöiden määrään. Tässä työssä esitettyjen laskelmien avulla toimeksiantaja saa nyt yksityiskohtaisemman vertailukohtan lämpöhäviöiden määristä ennen ja jälkeen muutostöiden.

Selvitystyötä voisi jatkaa ja laajentaa koskemaan koko jätevedenpuhdistamon lämpöhäviöitä. Näin saataisiin parempi kokonaiskuva laitoksen energiankulutuksesta ja löydettäisiin mahdollisesti uusia parannuskohteita. Tässä työssä saadut tulokset tarjoavat kuitenkin hyvän pohjan mahdollisille jatkoselvityksille.

Lähteet

- 1 Suomen Teollisuuden Energiapalvelut – STEP Oy. Verkkoaineisto. Veolia. <<https://www.stepenergy.veolia.fi/>>. Luettu 1.11.2024.
- 2 Uusi prosessikuvaus. 2018. Yrityksen sisäinen aineisto. STEP Oy.
- 3 Jätevesien keräily ja pumppaus neutralointiin. 2018. Yrityksen sisäinen aineisto. STEP Oy.
- 4 Kalkkiviljetteen valmistus ja kierto. 2018. Yrityksen sisäinen aineisto. STEP Oy.
- 5 Vanha prosessikuvaus. Yrityksen sisäinen aineisto. STEP Oy.
- 6 Hänninen, Hanna; Karppinen, Maarit; Leskelä, Markku & Pohjakallio, Maija. 2019. Tekniikan kemia. Edita Publishing Oy.
- 7 Zengin, Santeri. 2021. Neutralointilaitoksen kehittäminen. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 8 Jackson, Jonas. Wastewater and Water Supply Treatment in Kampala. Verkkoaineisto. <<https://slideplayer.com/slide/10267626/>>. Luettu 25.9.2024.
- 9 Mitä polyuretaani on. Verkkoaineisto. PU-Nordic. <<https://www.pu-nordic.fi/mita-polyuretaani-on/>>. Luettu 20.10.2024.
- 10 Lämmönsiirto. Opintomateriaali. Aalto-yliopisto. <https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1653745/mod_resource/content/4/termis_lammonsiiirto.pdf>. Luettu 3.10.2024.
- 11 Riikonen, Lauri. 2017. Neulalämmönsiirrinputkien lämmönsiirtokertoimen ja painehäviön määrittäminen. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUTPub-tietokanta.
- 12 Mononen, Kalle. 2015. Massaputkistojen virtaussuunnittelu. Insinööriyö. Seinäjoen Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 13 Doran, Pauline M. 2013. Bioprocess Engineering Principles. 2., uudistettu painos. Academic Press.
- 14 VDI Heat Atlas. 2010. E-kirja. Springer.
- 15 Lampinen, Markku & Kotiaho, Voitto. 2015. Johdatusta lämmönsiirto-oppiin. Verkkoaineisto. Aalto-yliopisto. <https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1386307/mod_resource/content/1/LAMMONSIIRTO4.pdf>. Luettu 2.10.2024.

- 16 How to choose the correct Impeller for your Overhead Stirrer. Verkkoaineisto. Apex Scientific. <<https://www.apexscientific.co.za/resources/impeller-overhead-stirrer/>>. Luettu 20.10.2024.
- 17 Mechanical properties of grade SS2343. Verkkoaineisto. Superalloys. <https://superalloys.net/grades/Special-Alloy/45/4287/SS_2343.html>. Luettu 10.10.2024.
- 18 Oksanen, Tuuli; Kevarinmäki, Ari, Yli-Koski Rainer & Kaitila, Olli. 2005. Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen puurakenteiden liitosten palonkestävyys. VTT.
- 19 Ympäristöministeriön asetus lämmöneristyksestä. 2003. SUOMEN RAKENTAMISMÄÄRÄYSKOKOELMA. Ympäristöministeriö.
- 20 Lee, Yun; Choi, Myoung-Sung; Yi, Seong-Tae & Kim, Jin-Keun. 2007. Experimental study on the convective heat transfer coefficient of early-age concrete. Sciencedirect.
- 21 Polyuretaanieristys. Verkkoaineisto. Keski-Suomen Uretaanieristys Ky. <<https://www.uretaanieristys.fi/palvelut/uretaanieristys/>>. Luettu 10.10.2024.
- 22 Azemati, Ali Akbar; Rahimian Koloor, Seyed Saeid; Khorasanizadeh, Hossain; Petrů, Michal; Sheikhzadeh, Ghanbar Ali; Safi, Mahdi & Shirkevand Hadavand, Behzad. 2021. Heat insulation effect in solar radiation of polyurethane powder coating nanocomposite. Verkkoaineisto. Scientific Reports. <<https://www.nature.com/articles/s41598-021-00181-1>>. Luettu 11.10.2024.
- 23 PSK 3704. 2021. Putki-, säiliö- ja laite-eristykset. Mitoitus. PSK Standardisointi.