

Etna Tuomala

Raskasmetallipitoisten jätevesien käsittelyvaihtoehtojen vertailu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kemiantekniikka

Insinöörityö

19.10.2018

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Etna Tuomala Raskasmetallipitoisten jätevesien käsittelyvaihtoehtojen vertailu 30 sivua + 4 liitettä 19.10.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Kemiantekniikka
Ohjaajat	QHSE Manager Miia Arkiomaa Tutkintovastaava Arto Yli-Pentti
<p>Opinnäytetyössä kartoitettiin mahdollista korvaajaa nykyiselle Gemalto Oy:n pintakäsittelylaitoksen jätevedenpuhdistusprosessille. Tällä hetkellä käytössä on perinteinen kemiallis-fysikaalinen menetelmä. Vaihtoehtoisia menetelmiä, joita tässä työssä käytiin läpi, olivat Heavy Regulator -saostus ja haihdutus. Näiden lisäksi siirtymistä nykyisestä jatkuvatoimisesta käsittelytavasta panostamiseen käsittelyyn arvioitiin.</p> <p>Kriteerit joiden perusteella menetelmien soveltuvuutta arvioitiin, olivat yrityksen puolelta kustannukset, prosessin helppohoitoisuus ja varmatoimisuus, sekä sen vaatima tila. Lisäksi arvioitiin menetelmien ympäristövaikutuksia ja sitä kuinka eri menetelmät saavuttavat viranomaisen asettamat kriteerit viemäriin laskettavalle jätevedelle.</p> <p>Nykyinen jätevesienkäsittelymenetelmä perustuu raskasmetallien saostamiseen hydroksideina, minkä jälkeen ne flokkauksessa yhdistetään isommiksi partikkeleiksi. Vesi ja kiintoainekas erotetaan lamelliselkeyttimessä, josta vesi kulkeutuu hiekkasuodattimelle ja lopuksi ioninvaihtimen kautta viemäriin. Kiintoainekas kuivatetaan vielä kammiosuotopuristimessa, jonka jälkeen se kuljetetaan ongelmajätelaitokselle.</p> <p>Heavy Regulator -menetelmässä erona nykyiseen on erilainen saostuskemikaali, joka tehostaa hydroksidisaostusta ja poistaa myös komplekseihin sitoutuneet raskasmetallit. Tällöin myös sakkaa syntyy vähemmän, eikä prosessissa ole tarvetta viimeistelykäsittelyille eli hiekkasuodatukselle ja ioninvaihtimelle. Sekä Heavy Regulator menetelmä, että nykyinen menetelmä soveltuivat hyvin myös panoskäsittelyyn.</p> <p>Haihdutus eroaa kahdesta muusta esitellystä menetelmästä suuresti. Siinä jätevesi kuumennetaan höyryksi, jonka jälkeen vesihöyry ja haihtumattomat komponentit kuten raskasmetallit erotetaan. Työssä selvitettiin erään valmistajan haihduttimen ominaisuuksia ja kustannuksia. Kyseinen laite oli alipainehaihdutin.</p> <p>Puhdistustehokkuudeltaan kaksi vaihtoehtoista menetelmää olivat parempia kuin nykyinen. Molempien kustannukset olivat kuitenkin suuremmat.</p>	
Avainsanat	jätevedenkäsittely, pintakäsittely, raskasmetallit, hydroksidisaostus, Heavy Regulator -saostus, haihdutus

Author Title	Etna Tuomala Evaluation of methods for treating heavy metal containing wastewaters
Number of Pages Date	30 pages + 4 appendices 19 October 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Chemical Engineering
Instructors	Miia Arkiomaa, QHSE Manager Arto Yli-Pentti, Senior Lecturer
<p>In this thesis the possible replacement for present wastewater treatment system for Gemalto Oy's surface treatment process' wastewaters was found out. The process used now is traditional chemical-physical treatment method. Possible options were Heavy Regulator precipitation and evaporation. Transfer from continuous to batch system was also considered.</p> <p>The criteria for evaluation of different methods given by the customer company were process' manageability and reliability, expenses, and the space needed for the system. Effects on environment and how well these different systems could meet the requirements given to the quality of wastewater were also evaluated.</p> <p>The present system for treating wastewaters is based on precipitation of heavy metals as hydroxides. These metal hydroxides are then flocculated into larger particles and separated from clean water in lamella clarifier. As finishing treatment ion-exchange and sand filtration is added before sewerage. Sludge is dried in a chamber filter press and taken to a problem waste treatment plant.</p> <p>One option for the present system was so called Heavy Regulator precipitation. It is based on the same hydroxide precipitation principles, but the chemical used is different and the precipitation process is more efficient as it needs less chemical to precipitate same amount of heavy metals. It also improves removal of heavy metals bonded with complex-ions. In Heavy Regulator precipitation no final treatments are needed in the process, but they can be kept if so wished. Both the Heavy Regulator and the present system are also suitable for batch treatment.</p> <p>The third process presented is evaporation, which differs considerably from two other systems as it is based on heat exchange and not on chemical or physical processes. There wastewater is heated to steam and non-volatile compounds, such as heavy metals, are separated. In this thesis, the features and costs for an evaporator from only one manufacturer was dealt with.</p> <p>The efficiency of water treatment in the two alternative methods was better than that of the present system. However alternative methods are also more expensive.</p>	
Keywords	wastewater treatment, surface treatment, heavy metals, hydroxide precipitation, heavy regulator, evaporation

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Valintakriteerit ja vaatimukset prosessille	2
2.1	Viranomaisvaatimukset	2
2.2	Yrityksen vaatimukset	4
3	Nykyinen prosessi	5
3.1	Prosessin kuvaus	5
3.2	Prosessin ongelmat	10
3.3	Panoskäsittely	13
3.4	Kustannukset	15
3.4.1	Nykyinen menetelmä	15
3.4.2	Panoskäsittely	15
4	Heavy Regulator -saostus	16
4.1	Toimintaperiaate	17
4.2	Prosessin vaatimat muutokset	18
4.3	Kustannukset	18
4.3.1	Investointikustannukset	18
4.3.2	Käyttökustannukset	18
4.4	Hyvät ja huonot puolet	19
5	Haihdutin	20
5.1	Toimintaperiaate	21
5.2	Prosessin vaatimat muutokset	23
5.3	Kustannukset	23
5.3.1	Investointikustannukset	23
5.3.2	Käyttökustannukset	24
5.4	Hyvät ja huonot puolet	25
6	Yhteenveto ja loppupäätelmät	26
	Lähteet	28

Liitteet

Liite 1. Nykyisen prosessin virtauskaavio

Liite 2. Heavy Regulator -prosessin virtauskaavio

Liite 3. Haihdutusprosessin virtauskaavio

Liite 4. Haihdutinlaitteiston kuva ja layout-piirustus

Lyhenteet

REACH	<i>Registration, evaluation, authorisation and restriction of chemicals.</i> Euroopan unionin kemikaaliasetus
HSY	<i>Helsingin seudun ympäristöpalvelut</i> -kuntayhtymä. Helsingin seudun ympäristöpalveluista vastaava taho.
EDTA	<i>Etyleenidiamiinitetraetikkahappo.</i>
NTA	<i>Nitriilotrietikkahappo.</i>
VOC	<i>Volatile organic compound.</i> Helposti haihtuvat orgaaniset yhdisteet
kWh	<i>Kilowattitunti.</i> Energiankulutuksen yksikkö
pH	<i>Potential of hydrogen.</i> Vedyn potentiaali, joka kuvaa liuoksen happamuutta tai emäksisyyttä, siinä olevien vetyionien määrän kymmenkantaisen logaritmin vastalukuna

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tilaaja Gemalto Oy on kansainvälinen yritys, jonka toimialaa ovat digitaalisen turvallisuuden ratkaisut. Yrityksellä on toimintaa 47 maassa ja n. 15 000 työntekijää maailmanlaajuisesti. Vantaalla valmistetaan viranomaistuotteita kuten passeja ja pc-tietosivuja. Tämä työ tehdään Vantaan toimipisteen vedenpuhdistuslaitokselle. Haitallisia aineita sisältäviä jätevesiä syntyy pintakäsittelyprosessissa, jolla tuotetaan tuotteen valmistusprosessissa tarvittavia tuotantolevyjä. (1.)

Pintakäsittelyllä tarkoitetaan kappaleiden pinnan työstämistä halutunlaiseksi erilaisia sähkökemiallisia prosesseja, maalausta, syövytystä ja muita menetelmiä käyttämällä. Suurimman osan pintakäsittelyn jätevesistä muodostavat prosessien huuhteluvedet, joiden lisäksi jätevesiin kuuluvat käytetyt prosessikylvyt, joiden käsittely tosin tapahtuu useimmiten ulkopuolisessa laitoksessa. Pintakäsittelyprosesseissa syntyvät jätevedet sisältävät usein suurehkoja määriä raskasmetalleja, jonka lisäksi ne voivat olla happamia tai emäksisiä ja sisältää kromia, syanidia ja orgaanisia yhdisteitä. Pintakäsittelyteollisuudessa jätevesien käsittely on yksi olennainen osa, sillä kaikki edellä mainitut aineet voivat olla haitallisia tai vaarallisia sekä ihmiselle, että ympäristölle. (2, s.11–12; 3 s.21.)

Työn tarkoituksena on kartoittaa pintakäsittelyprosessin jätevesien käsittelyvaihtoehtoja ja niiden kustannuksia. Nykyinen menetelmä ei ole välttämättä enää kaikkein optimaalisin, sillä prosessi on muuttunut ja markkinoille on tullut uusia kemikaaleja jätevesien käsittelyyn. Suurin prosessissa tapahtunut muutos on kuudenarvoisen kromin käytöstä luopuminen sen muututtua luvanvaraiseksi EU:n REACH-lainsäädännön mukana. Prosessissa kuudenarvoinen kromi on korvattu kolmenarvoisella kromilla, joka ei ole yhtä vaarallista.

Työssä vertaillaan kahta vaihtoehtoista menetelmää nykyiseen hydroksidisaostusmenetelmään. Lisäksi on syytä arvioida panos- ja jatkuvatoimisen käsittelyn edut ja haitat, sillä vuotuiset käsiteltävät vesimäärät ovat melko pieniä. Tämän työn päämääränä on antaa lopuksi ehdotus varteenotettavimmasta vaihtoehdosta jätevesien käsittelylle ottaen huomioon tekniset, taloudelliset ja ympäristönäkökohdat.

2 Valintakriteerit ja vaatimukset prosessille

2.1 Viranomaisvaatimukset

Tällä jätevedenpuhdistuslaitoksella käsiteltävät vedet johdetaan käsittelyn jälkeen viemäriin yhdessä kiinteistön talousvesien kanssa. Kaikki kiinteistön jätevedet yhdessä kulkeutuvat lopulta Suomenojan jätevedenpuhdistamolle Espooseen. Koska kunnallisten jätevedenpuhdistamojen prosessissa suuret raskasmetallipitoisuudet tuhoavat biologisessa puhdistuksessa käytettyjä mikrobeja ja vesistöihin päästessään aiheuttavat haittaa ekosysteemille ja sen eliöille, sekä kertyvät ravintoketjussa, on tärkeää saada niiden pitoisuudet pidettyä mahdollisimman pieninä. Lisäksi kunnallisille vedenpuhdistamoille kulkeutuneet raskasmetallit vaikeuttavat lietteen hyötykäyttöä. Happamat ja emäksiset jätevedet puolestaan aiheuttavat haittaa viemäriverkostolle. (3;4.)

Näistä syistä lainsäädännössä on määritetty raja-arvoja eri aineiden pitoisuuksille jätevedessä. Lisäksi HSY on määrittänyt raja-arvot sen jätevedenpuhdistamoille tuleville teollisuusjätevesille. Gemaltolla on jätevesisopimus HSY:n kanssa. Sopimuksessa määritetään tapauskohtaiset arvot joillekin aineille, ja siitä käy ilmi esimerkiksi vuosittain laitoksella käsiteltävät vesimäärät. Oheisessa taulukossa 1 näkyvät raja-arvot yleisimmille jätevedenpuhdistamoille kulkeutuville metalleille sekä kiintoaineelle ja kloorivapaille VOC-yhdisteille.

Taulukko 1. Jätevesien raja-arvot viemäriin johdettaville haitallisille aineille (3)

Aine	suurin sallittu pitoisuus mg/l
kiintoaine	500
kokonaiskromi	1,0
kromi 6+	0,1
kupari	2,0
nikkeli	0,5
arseeni	0,1
elohopea	0,1
hopea	0,2
kadmium	0,01
lyijy	0,5
sinkki	3,0
tina	2,0
kloorivapaat VOC-yhdisteet	3,0

Lisäksi jätevesien osalta on määritetty, että viemäriin johdettavien jätevesien pH:n on oltava välillä 6,0–11,0 ja lämpötilan alle 40 °C. (3.)

Näiden raja-arvojen toteutumista valvotaan neljä kertaa vuodessa ulkopuolisen laboratorion toimesta. Nykyiselläänkin prosessi puhdistaa jätevedet riittävän hyvin, eikä ylitksiä ole tullut kuin kerran nikkelin osalta. (5.)

Galvanoprosessin vesien osuus koko kiinteistön vedenkulutuksesta on noin 4,5 % (4).

Gemalton pintakäsittelylinjalta tulevissa jätevesistä on taulukossa 1 mainituista haitallisista aineista kromia, kuparia, nikkeliä ja kloorivapaita VOC-yhdisteitä sekä kiintoainesta. Hapetusluvulla kuusi esiintyvä kromi on luokiteltu syöpää aiheuttavaksi ja muta-geeniseksi aineeksi, ja siksi sen käyttöä on rajoitettu EU:n alueella REACH asetuksen myötä. Tämä tarkoittaa, että maahantuojien ja valmistajien on haettava lupaa EU:n kemikaaliviraston kautta. Tällä laitoksella päätettiin kuitenkin luopua kuudenarvoisesta kromista, jolloin se korvattiin kolmenarvoisella kromilla. (6;7.)

Kolmenarvoinen kromi ei ole läheskään yhtä vaarallista kuin kuudenarvoinen. Hapetusluvulla kolme esiintyvä kromi onkin pieninä pitoisuuksina ihmiselle välttämätön hivenaine. Vesieläöille myös kolmenarvoinen kromi on erittäin myrkyllistä, mutta se ei kerry ravintoketjussa ja sen sitouttaminen lietteeseen kunnallisella jätevedenpuhdistamolla on suhteellisen tehokasta. Kaiken kaikkiaan kolmenarvoisen kromin käyttö on turvallisempaa kuin kuudenarvoisen ja kuten taulukosta 1 nähdään, myös sen pitoisuus vedessä saa olla huomattavasti suurempi kuin kuudenarvoisen kromin. (3;8.)

Kuten kolmenarvoinen kromikin, kupari on pieninä pitoisuuksina ihmiselle ja muille eliöille tarpeellinen, mutta pitoisuuksien kasvaessa myrkyllinen aine, erityisesti vesiekosysteemeissä. Lisäksi se kertyy ravintoketjussa. Sallitut määrät jätevesissä ovat kuitenkin korkeammat kuin kromilla ja nikkelillä. (9.)

Nikkeli on prosessissa esiintyvistä aineista vaikein puhdistettava, johtuen sen taipumuksesta muodostaa komplekseja. Tällöin sen sitouttaminen kiintoainekseen on haastavaa ja kunnallisilla jätevedenpuhdistamoilla vain alle puolet sinne saapuvasta nikkelistä sitoutuu lietteeseen. Tämän takia on tärkeää vähentää kunnallisille jätevedenpuhdistamoille saapuvan nikkelin määrää jo teollisuuslaitosten omilla jätevedenpuhdistamoilla.

moilla. Ominaisuuksiltaan nikkeli on korkeina pitoisuuksina myrkyllinen aine ja osa nikkeliyhdisteistä on vesieliöille erittäin myrkyllisiä. (3.)

2.2 Yrityksen vaatimukset

Viranomaisvaatimusten lisäksi yrityksellä on omat vaatimuksensa prosessille, jotka liittyvät taloudellisiin ja käytännöllisiin seikkoihin. Olennaista olisi, että uusi prosessi olisi vanhaa parempi ja toisi näin ollen lisäarvoa nykyiseen toimintaan verrattuna. Tavoitteena on, että uusi prosessi tuo taloudellista säästöä ja parantaa prosessin tuottavuutta. Lisäksi seikkoja, joihin erityisesti tulee prosessin valinnassa kiinnittää huomiota, ovat kustannusten lisäksi varmatoimisuus, helppohoitoisuus ja prosessin vaatima tila.

Hintaan lasketaan sekä investointikustannukset että käyttökustannukset. Investointikustannuksien takaisinmaksuaika ei saisi ylittää kahta vuotta, tai todennäköisesti investointi ei silloin tule menemään läpi yrityksessä. Investointien kannattavuutta voi mitata monella eri laskutavalla. Käytettäessä takaisinmaksuaikaa mittarina on laskukaava yksinkertaisesti hankintamenot jaettuna vuotuisella nettotuotolla. (5;10.)

Käyttökustannuksissa otetaan huomioon tarvittavien kemikaalien hinnat, työvoima- ja energiakustannukset sekä maksut, joita peritään viemäriin laskettavista jätevesistä ja kiinteästä jätteestä.

Varmatoimisuus liittyy olennaisesti myös käyttökustannuksiin. On kallista, jos jokin prosessin osa vaatii huoltoa usein tai prosessia joudutaan seisottamaan sen takia, ettei jokin toimi. Jätevesilinjalla ei myöskään ole omaa täyspäiväistä operaattoria, joten on tärkeää, että prosessi toimii sujuvasti myös ilman kokoaikaista valvontaa. Tämä tarkoittaa myös sitä, että prosessin tulee puhdistaa jätevedet alle raja-arvojen jatkuvasti, ilman että sitä tarvitsee miettiä.

Oman operaattorin puuttumisen takia yksi kriteeri on myös helppohoitoisuus. Vedenpuhdistuslaitoksen töiden ei tulisi viedä liikaa aikaa muilta töiltä, ja ne pitäisi pystyä opettamaan työntekijöille ilman kohtuuttoman pitkää perehdytystä.

Jätevedenpuhdistuslinjaa suunniteltaessa on myös otettava huomioon tehtaan rajalliset tilat ja kasvava tuotanto, mikä tarkoittaa, että mitä pienempään tilaan käsittely saadaan mahtumaan sen parempi.

3 Nykyinen prosessi

3.1 Prosessin kuvaus

Tämänhetkinen jätevedenpuhdistusprosessi on jatkuvatoiminen eli jätevesiä käsitellään sitä mukaa kun niitä syntyy. Laitoksessa käsitellään vuosittain noin 600 m³ vettä (5). Tämä tarkoittaa noin 2–3 m³ päivässä. Osastolla on käytössä normaali työaika, eikä toimintaa ei ole viikonloppuisin tai iltaisin.

Liitteestä 1 löytyy virtauskaavio prosessille.

Jätevedenpuhdistukseen saapuvat vedet ovat happamia, johtuen prosessissa käytyistä rikkihaposta ja suolahaposta. Raskasmetalleista eniten vedessä on nikkeliä, jonka puhdistukseen alle raja-arvojen on erityisesti keskityttävä. Kuparin määrä saapuvissa jätevesissä on melko vähäinen kuten myös kolmenarvoisen kromin. Lisäksi vedet sisältävät rauta(II)kloridia ja erilaisia prosessin apuaineita, kuten kompleksointiaineita ja kiiltolisiä.

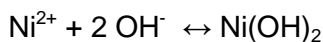
Kaikki jätevedet pintakäsittelyprosessin eri osista tulevat samaan tasausaltaaseen, jonka tehtävä on nimensä mukaisesti tasata virtausta vesienkäsittelyprosessissa. Puhdistusprosessin ensimmäinen vaihe tasausaltaan jälkeen on ollut vielä toistaiseksi kuu-denarvoisen kromin pelkistys kolmenarvoiseksi. Pelkistyskemikaalina toimii natriumbisulfiitti, jonka lisäksi pH lasketaan optimaaliselle tasolle (pH 2) rikkihapon avulla. Näiden annostelu tapahtuu automaattisesti pH- ja Redox-mittareiden perusteella sekoituksen ollessa käynnissä.

Seuraavaksi kaikki vedet siirtyvät neutralointiin, joka tapahtuu samassa säiliössä kuin flokkaus. Neutraloinnissa pH säädetään mahdollisimman lähelle yhdeksää natriumhydroksidin avulla. pH:n säätö ja natriumhydroksidin annostelu tapahtuu automaattisesti säiliössä olevan pH-mittarin perusteella. pH 9 on valittu veteen liuenneiden metallionien mukaan, jotta ne saataisiin saostumaan. Lisäksi happamat vedet vahingoittavat

vesijohtoverkoston putkistoja ja ympäristöä, joten ne on syytä säätää neutraalimmiksi.
(3.)

Flokkauksessa ja saostuksessa veden sisältämät epäpuhtaudet eli tässä tapauksessa lähinnä raskasmetallit, jotka ovat hydratoituneina vedessä, on tarkoitus saada saostettua. Tällöin ne on mahdollista erottaa kiinteänä sakkana vedestä. Yleisimmin käytössä oleva menetelmä, jota myös tällä laitoksella käytetään, on hydroksidisaostus. Siinä metalli-ionit saostetaan niukkaliukoisina hydroksideina. Saostuminen tapahtuu pH:ta säätämällä, jolloin veden hydroksidi-ionien määrä kasvaa ja ne muodostavat metalli-ionien kanssa metallihydroksideja. Optimaalinen pH saostukselle voidaan teoriassa katsoa liukoisuustaulukoista, mutta käytännössä joudutaan tekemään laboratoriomäärittäyksiä sillä jätevedet sisältävät lähes aina useampaa kuin yhtä metallia ja lisäksi muita saostumiseen vaikuttavia aineita. (2, s.49–53.)

Esimerkkinä nikkelin saostumisen reaktioyhtälö:



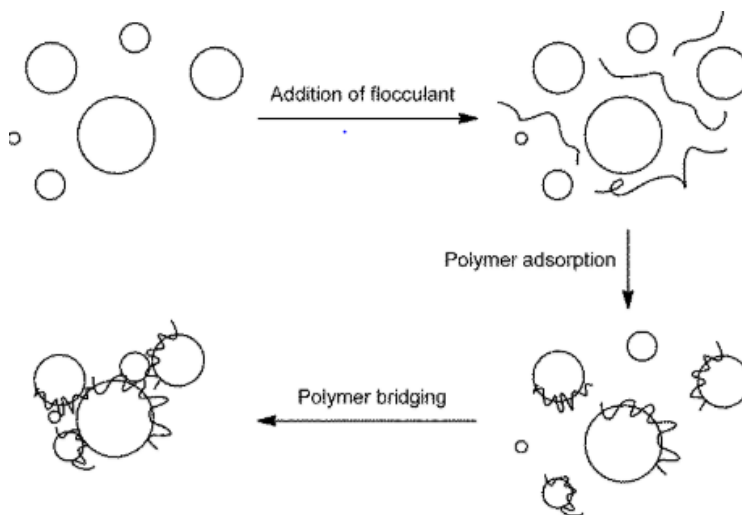
Kuten yllä olevasta reaktioyhtälöstä nähdään, kyseessä on tasapainoreaktio, eli reaktio voi tapahtua kumpaankin suuntaan vain. Pelkällä hydroksidisaostuksella ongelmaksi voi muodostua takaisinliukeneminen, sillä eri metalleilla on eri optimaalinen pH, jossa ne saostuvat parhaiten. Tällöin siinä kohtaa kun yksi metalli alkaa saostua, niin toinen voi alkaa jo liueta takaisin. Esimerkiksi nikkeli saostuu parhaiten pH:n ollessa yli 9,5, kun taas kolmenarvoisen kromin saostumisen optimaalinen pH on noin 7 ja sen takaisinliukeneminen alkaa pH:n ylittäessä 8. Kun vedessä on läsnä useampaa kuin yhtä metallia, ei saostuminen kuitenkaan välttämättä mene suoraan näiden pH-arvojen mukaisesti, vaan esimerkiksi nikkelin pitoisuus voidaan saada saostuksella laskettua alle raja-arvojen jo pH:n ollessa alle yhdeksän. (2, s.49–53.)

Takaisinliukenemisen estämiseksi saostuksen apukemikaalina käytetäänkin alumiinisulfaattia $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Alumiinisulfaatti saostaa raskasmetalleja sulfaatteina. Sulfaattisaostus ei ole yhtä vaativa pH:n suhteen, jolloin takaisinliukeneminen ei ole ongelma. Lisäksi alumiinisulfaatti voi tietyllä pH-alueella toimia koagulanttina, jolloin se ensin saostuu alumiinihydroksidina ja kerää ympärilleen positiivisesti varautuneita ioneja, jotka yhdessä muodostavat kolloideja. Koagulointi helpottaa myös flokkausta. Yhdessä hydroksidisaostuksella ja alumiinisulfaatin lisäyksellä saadaan jätevedenkäsittelypro-

sessissa aikaiseksi hyvä puhdistustulos. Lisäksi pintakäsittelyprosessista tulee jätevesien mukana jonkin verran rautakloridia, joka myös muodostaa sakkaa. (2, s.45–46; 11, s.37-38.)

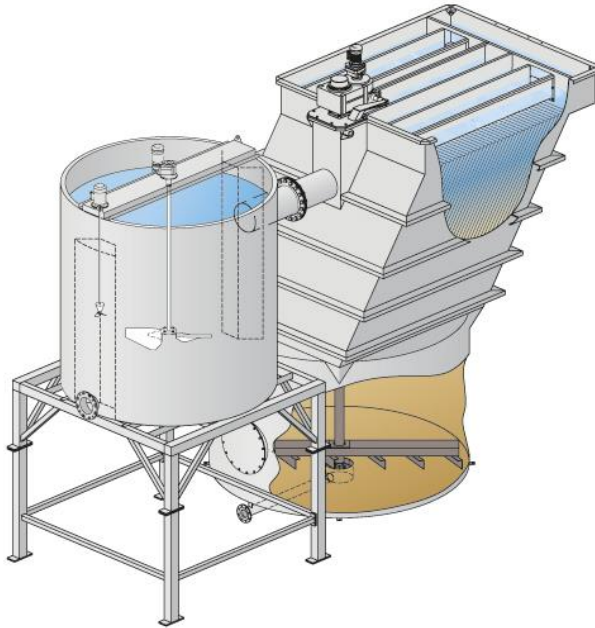
Pelkässä hydroksidi- ja sulfaattisaostuksessa syntyvä sakka on kuitenkin erittäin hienojakoista. Hienojakoinen sakka on hidasta ja haastavaa poistaa laskeuttamalla. Tämän takia prosessissa on vielä saostuksen jälkeen flokkausvaihe, jossa kiintoaineksen hiukkaskokoa kasvatetaan. Saostuksen jälkeen veteen lisätään siis flokkauskemikaalia, joka on useimmiten jokin synteettinen polymeeri. Polymeerit ovat pitkäketjuisia molekyyli­massaltaan suuria orgaanisia yhdisteitä, joissa voi olla useita sähköisesti varautuneita kohtia. (2, s.42; 12.)

Näiden varautuneiden kohtien avulla polymeerit kykenevätkin adsorboimaan hiukkasia vedestä pinnalleen muodostaen ikään kuin siltoja kiintoainepartikkelien välille (kuva 1.). Näin syntyneet hiukkasten yhteenliittymät ovat flokkeja. Polymeerien jaottelu voi tapahtua esimerkiksi sen mukaan millainen varaus niiden aktiivisilla kohdilla on. Tässä prosessissa ja flokkauksessa muutenkin yleisimmin käytetyt polymeerit ovat anionisia eli niiden varaus on positiivinen. Muita polymeerejä ovat kationiset eli negatiivisesti varautuneet ja nonioniset eli varauksettomat polymeerit. (12; 13, s.17.)



Kuva 1. Flokkauspolymeerin toiminta (12)

Flokkauksessa syntynyt kiintoainekas erotetaan vedestä lamelliselkeyttimessä (kuva 2). Siinä tuleva vesi virtaa hitaasti lamellien läpi, jolloin kiintoainekas valuu painovoiman vaikutuksesta niitä pitkin selkeyttimen pohjalle.

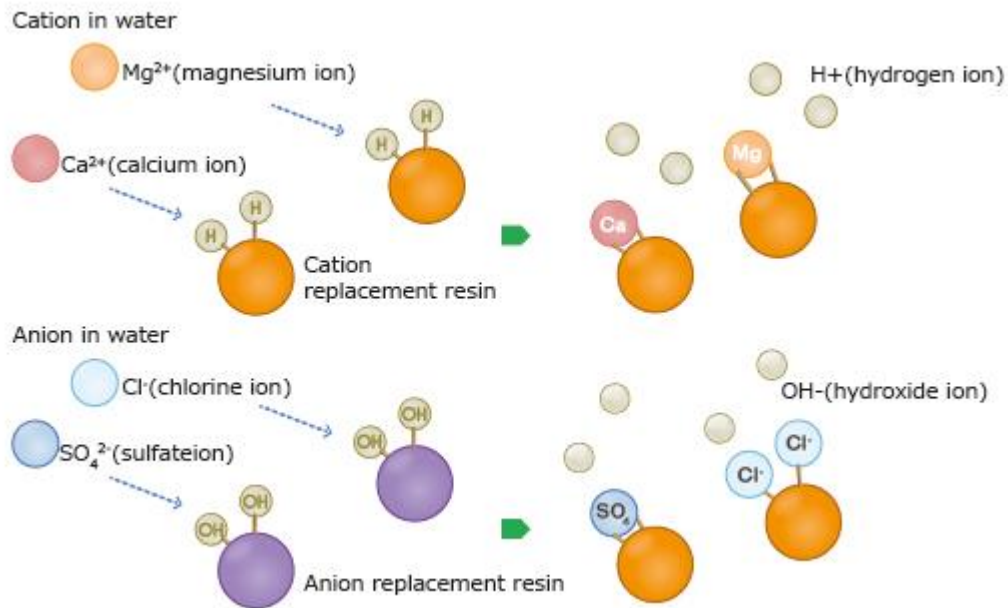


Kuva 2. Lamelliselkeyttimen esimerkkikuva (14)

Kertynyt liete pumpataan selkeyttimen pohjalta lietevarastoon ja puhdas vesi kulkeutuu eteenpäin pumppaussäiliön kautta hiekkasuodatukseen. Siinä vesi ohjataan kulkeutumaan hienojakoisen hiekkapatjan läpi. Hiekka toimii mekaanisena suodattimena, eli se pysäyttää kiinteiden hiukkasten etenemisen. Hiekkasuodatuksen tarkoituksena on estää mahdollisten lietejäämien kulkeutuminen ioninvaihtimelle ja sitä kautta viemäriin.

Hiekkasuodatuksen jälkeen vedet kulkeutuvat ioninvaihtimelle. Sen tehtävänä on ensisijaisesti poistaa mahdollisesti saostumatta jääneet raskasmetallit. Ioninvaihtimen toiminta perustuu siihen, että epäpuhtaudet joita puhdistettava vesi sisältää, ovat varautuneita joko positiivisesti tai negatiivisesti. Ioninvaihdin sisältää hartsia, johon on kiinnittyneenä aktiivisia ryhmiä. Nämä aktiiviset ryhmät pystyvät vaihtamaan ioneja samanmerkkisten veteen liuenneiden ionien kanssa. (15.)

Riippuen puhdistettavan veden sisältämisestä epäpuhtauksista valitaan ioninvaihdin, joka voi olla tyypiltään joko vahva tai heikko anionin- tai kationinvaihdin. Näiden lisäksi on olemassa spesifisiä tiettyjen aineiden poistamiseen kehitettyjä ioninvaihtimia. Määrittely tehdään sen mukaan, millaisia aktiivisia ryhmiä ioninvaihtimessa on. Kationinvaihtimisessa vaihto tapahtuu tyypillisesti vetyionin (H^+) ja positiivisesti varautuneen hiukkasen eli kationin välillä ja anioninvaihtimissa hydroksidi-ionin (OH^-) ja positiivisesti varautuneen anionin välillä (Kuva 3.). (3, s.47.)



Kuva 3. Ioninvaihdon periaate anionin- ja kationinvaihtohartseissa (16)

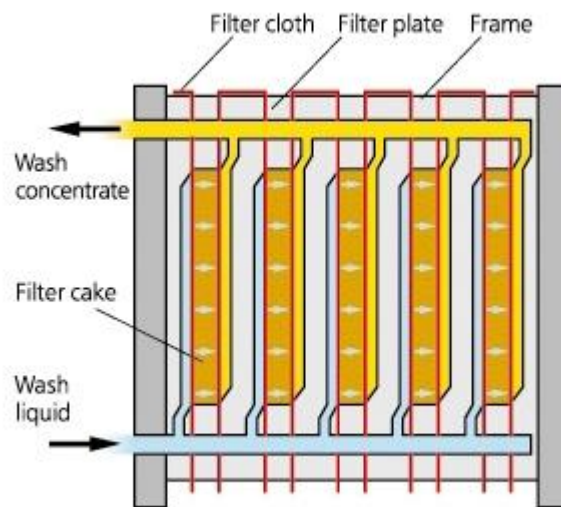
Tässä prosessissa käytössä oleva ioninvaihdin on tyypiltään selektiivinen ioninvaihdin. Selektiivisyydellä tarkoitetaan sitä, että ioninvaihdin adsorboi vedestä erityisesti joitain tiettyjä ioneja, tässä tapauksessa raskasmetalleja jättäen mm. vedessä luontaisesti esiintyvät myrkyttömät natrium- ja kalsiumionit rauhaan. Ioninvaihdinten puhdistusteho on ideaalitilanteessa hyvä ja myös komplekseihin sitoutuneet raskasmetallit saadaan poistettua ioninvaihtimella tehokkaasti. (2, s.61–62; 17, s.4.)

Ioninvaihdin täytyy aika-ajoin palauttaa kuntoon eli regeneroida. Tällöin sen läpi johdetaan ensin suolahappoa ja sitten natriumhydroksidia, jolloin ioninvaihdin saadaan palautettua alkuperäiseen tilaansa.

Ioninvaihtimen jälkeen vedet johdetaan pH:n mittauksen ja mahdollisen säädön jälkeen yleiseen viemäriverkostoon.

Selkeytyksessä erotettu liete varastoidaan lietevarastoon. Varastosäiliön täytyessä se pumpataan kuivattavaksi kammiosuotopuristimeen (Kuva 4.). Kammiosuotopuristimessa on rungon varassa koverrettuja levyjä, jotka on päällystetty suodatinkankaalla. Suotopuristin käynnistetään pumpaamalla levyt manuaalisesti hydraulikkapumpulla toisiinsa vasten, jolloin levyt muodostavat kammioita. Näihin kammioihin pumpataan tasaisella paineella lietettä. Lietteen kiintoaines jää puristimeen muodostaen kiinteän kakun

ja vesi kulkeutuu suodatinkankaan läpi. Syntyneet rejektivedet pumpataan vielä kertaalleen tasausaltaaseen ja sitä kautta prosessin läpi.



Kuva 4. Kammiosuotopuristimen toiminta (18)

Suodatettu kiintoaines kuljetetaan entiselle Ekokemin nykyisin Fortumin ongelmajätteidensä käsittelylaitokselle Riihimäelle käsiteltäväksi.

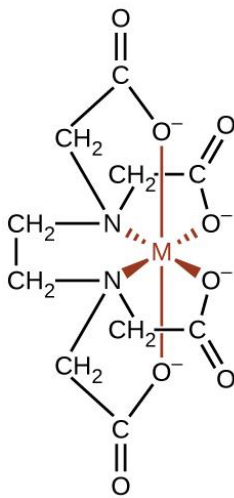
3.2 Prosessin ongelmat

Nykyisessä prosessissa on joitakin ongelmakohtia, joita erityisesti on tässä tarkoitus avata. Ensinnäkin nyt kun kuudenarvoisesta kromista on luovuttu, pelkistysvaihe on turha. Toisaalta kuudenarvoista kromia on vielä melko paljonkin kertyneenä mm. ilmanvaihdon putkistoihin ja laitteisiin. Tämäkin kromi tulee jätevedestä puhdistaa, ettei ylityksiä tiukkoihin raja-arvoihin tule, kuudenarvoisen kromin ollessa syöpövaarallinen aine. Kertyneen kuudenarvoisen kromin määriä on tosin erittäin vaikea arvioida avaamatta putkia. Toki saapuvasta jätevedestä voidaan tehdä laboratoriomäärittämiä kuudenarvoisen kromin osalta, jolloin saadaan kuva sen määrästä putkistoissa.

Toinen ongelmakohta on ioninvaihdin. Tällä hetkellä sitä ei pystytä pitämään päällä läheskään niin usein kuin olisi tarkoituksenmukaista. Ioninvaihdin myös tukkeutuu usein, mikä ei pitäisi olla tilanne. Onneksi saostuksella ja selkeytyksellä saadaan yk-

sinäänkin tarpeeksi hyvä puhdistusteho, mutta häiriötilanteissa on olennaista, että ioninvaihdin toimii ja pystyy leikkaamaan tehokkaasti veden raskasmetallipitoisuuden.

Oman haastavuutensa vesienpuhdistukselle tuo myös kompleksinmuodostus. Kompleksinmuodostuksella tarkoitetaan ilmiötä, jossa keskusatomiin tai -ioniin kiinnittyy koordinaatiosidoksilla muita molekyyliä tai ioneja, joita kutsutaan ligandeiksi. Yhdessä keskusioni ja ligandit muodostavat kompleksiyhdisteen. Kuvassa 5. nähdään esimerkki yleisimmin käytetyn kompleksointiaineen EDTA:n ja kirjaimella M merkityn metallin muodostamasta kompleksiyhdisteestä. Kompleksinmuodostusta tapahtuu useimmiten siirtymämetalleilla, eli sellaisilla metalleilla, jotka esiintyvät usealla eri hapetusluvulla. Näitä ovat esimerkiksi rauta, kupari ja nikkeli. (19;20.)



Kuva 5. EDTA-metallikompleksi (19)

Lisäksi on olemassa kompleksointiaineita, jotka tarkoituksella muodostavat metallien kanssa komplekseja ja näin esimerkiksi pehmittävät vettä. Tällaisia ovat esimerkiksi EDTA, NTA ja erilaiset tensidit. Pintakäsittelyprosesseissa kompleksointiaineita tarvitaan, jotta saadaan sidottua vesijohtovedestä haitallisia aineita ja pinnoituksia tehdessä metallit olemaan muodostamatta yhteenliittymiä ja levittäytymään tasaisesti liuokseen, jolloin myös pinnoituksesta saadaan mahdollisimman tasainen. Tämä aiheuttaa sen, että vedenpuhdistuksessa voikin sitten olla haasteita kompleksien purkamisessa tai saostamisessa. (19.)

Kompleksinmuodostus vaikeuttaa vedenpuhdistusta siten, että kompleksit eivät saostu samalla tavalla kuin puhtaat metalli-ionit. Kompleksiyhdisteet ovat myös luonteeltaan

erittäin pysyviä, jolloin metallin ja siihen kiinnittyneiden ligandien välisten sidoksien purkaminen on hankalaa. Jos kompleksiyhdisteitä ei saada saostettua tai muuten poistettua ne lisäävät jäteveden raskasmetallipitoisuutta, eikä kunnallisilla jätevedenpuhdistamoilla ole myöskään mahdollisuutta niiden tehokkaaseen poistamiseen, jolloin ne kulkeutuvat aina vesistöihin asti. (3, s.31–32.)

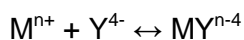
Kompleksiyhdisteiden ja metallihydroksidien eroja saostumisessa ja liukenemisessä (esimerkkinä reaktioyhtälöt alla) voidaan havainnollistaa vertaamalla niiden kompleksija tasapainovakioita. Kun kyseessä on liukenemis- ja saostumisreaktio, tasapainovakion sijaan voidaan käyttää termiä liukoisuustulo K_s . Liukoisuustulo kuvaa kylläisen liuoksen ionien suhdetta liuoksen ollessa tasapainotilassa tietyssä lämpötilassa ja pH-arvossa alla olevan yhtälön 1 mukaisesti. Koska liukoisuustulo lasketaan aineen liukenemiselle, voidaan toiseen suuntaan tapahtuvalle reaktiolle eli saostumiselle laskea tasapainovakio kääntämällä yhtälössä reaktiotuotteet ja lähtöaineet toisin päin. Koska kiinteän aineen konsentraatio on aina yksi, saadaan saostumisen tasapainovakio K laskemalla yksi jaettuna liukoisuustulolla, alla olevan kaavan 2 mukaisesti.



$$K_s = \frac{[M^{a+}]^m [X^{b-}]^x}{M_m X_x} = \frac{[M^{a+}]^m [X^{b-}]^x}{1} = [M^{a+}]^m [X^{b-}]^x \quad (1)$$

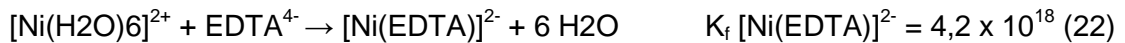
$$K = \frac{M_m X_x}{[M^{a+}]^m [X^{b-}]^x} = \frac{1}{[M^{a+}]^m [X^{b-}]^x} = \frac{1}{K_s} \quad (2)$$

Kompleksinmuodostusreaktion reaktioyhtälö ja kompleksivakion K_f laskukaava:



$$K_f = \frac{M Y^{n-4}}{[M^{n+}] [Y^{4-}]} \quad (3)$$

Esimerkkireaktioyhtälöt ja niiden tasapaino- ja kompleksivakiot nikkelin hydroksidisaostumisesta 25 °C:n lämpötilassa ja kompleksinmuodostuksesta EDTA:n kanssa lämpötilan ollessa 20 °C:



Koska kompleksivakiota EDTA-nikkeli-kompleksille oli haastavaa löytää, yllä esitetyt arvot ovat eri lämpötilassa, siitä huolimatta, että lämpötila vaikuttaa tasapainovakion arvoon.

Kun verrataan nikkeli-EDTA-kompleksin kompleksivakiota K_f nikkelin hydroksidisaostusreaktion tasapainovakioon K , nähdään, että se on suurempi. Tämä tarkoittaa sitä, että reaktiossa nikkelin ja EDTA:n välillä tasapainotila on voimakkaammin reaktiotuotteiden puolella, kun taas nikkelin hydroksidisaostumisessa on aina läsnä myös jonkin verran lähtöaineita, vaikkakin myös nikkelihydroksidi on niukkaliukoinen ja teoriassa sen saostuksen pitäisi olla helppoa. On kuitenkin erittäin vaikeaa saada kompleksinmuodostusreaktiota tapahtumaan toiseen suuntaan ja kompleksia purettua. Koska kompleksinmuodostajien läsnäolo myös sitoo liuksesta metalli-ioneja, vähentäen niiden määrää, myös konsentraatioiden suhteet nikkelin saostuksessa muuttuvat. Jotta liuos tällöin saavuttaisi tasapainotilan, reaktiotuotteita eli metallihydroksideja alkaa liueta metalli-ioneiksi, mikä ei ole prosessissa toivottavaa.

3.3 Panoskäsittely

Panoskäsittelyllä tarkoitetaan sellaista ei-jatkuvatoimista käsittelytapaa, jossa tietty määrä vettä nk. panos käsitellään kerralla. Panostoimista käsittelyä voidaan hyödyntää joko yhdessä prosessin vaiheessa tai koko prosessi voidaan suorittaa panostoimisesti. Panostoimisessa käsittelyssä tasausaltaaseen tulevat vedet johdetaan tietyn kokoisina annoksina säiliöön, johon annostellaan lisäksi tarvittavia kemikaaleja.

Neutralointi, saostus ja flokkaus tapahtuvat samojen periaatteiden mukaisesti samoja kemikaaleja käyttäen kuin jatkuvatoimisessakin käsittelyssä. Kemikaalien kulutus panostoimisessa käsittelyssä saattaa vaihdella käsiteltävän erän mukaan, mutta keskimäärin panoskäsittely pelkille huuhteluvesille kuluttaa vähemmän apukemikaaleja kuin jatkuvatoiminen käsittely. Tämä johtuu siitä, että niitä ei tarvitse annostella varmuuden vuoksi ylenmäärin. (23.)

Kemiallisesti käsitellyt vedet voidaan tämän jälkeen joko laskeuttaa säiliössä tai johtaa erilliselle selkeyttimelle, kuten jo olemassa olevalle lamelliselkeyttimelle. Panoskäsitelyyn voi lisätä vielä viimeistelykäsittelyt kuten hiekkasuodatuksen ja ioninvaihtimen.

Panostoiminen käsittely soveltuu hyvin pienille vedenpuhdistuslaitoksille, joissa päivittäin käsiteltävät vesimäärät ovat alle kymmenissä kuutiometreissä. Lisäksi panoskäsitely mahdollistaa erilaisia pitoisuuksia ja eri aineita sisältävien vesien yksilöllisen käsittelyn, sillä saostus- ja flokkauskemikaalien annosteluun voi vaikuttaa kunkin erän kohdalla. Suurin hyöty panostoimisesta käsittelystä saadaankin, jos jätevesien metallipitoisuudet vaihtelevat paljon. Jopa prosessikylvyt pystytään käsittelemään panostoimisesti jos näin halutaan. Tämä tosin ei välttämättä ole kannattavaa johtuen prosessikylpyjen korkeista raskasmetallipitoisuuksista, jolloin saostuksessa syntyvän sakan määrä on myös korkea. Panoskäsitelyä ajatellen järkevintä olisi erotella erilaiset jätevesijakeet ennen käsittelyä, jolloin niiden yksilöllinen käsittely olisi mahdollista. (2, s. 143–145.)

Säiliöiden ja tasausaltaan mitoitus riippuu prosessin kestosta ja päivittäisestä käsiteltävästä vesimäärästä. Päivittäin käsiteltävä vesimäärä tällä laitoksella on maksimissaan noin 3 m^3 , jolloin tasausaltaan olisi mielellään oltava jonkin verran nykyistä $3,1 \text{ m}^3$ isompi, jotta häiriötilanteessa olisi mahdollista varastoida useampi kuin yhden panoksen vesimäärä altaaseen. Itse reaktiosäiliö on mitoitettava hiukan isommaksi kuin panos. Jos halutaan käsitellä kerralla päivittäinen vesimäärä noin 3 m^3 , on reaktiosäiliön koon oltava noin 4 m^3 . Laitoksella on olemassa kaksi 3 m^3 :n kokoista säiliötä, joita käytetään tällä hetkellä ioninvaihtimen ja hiekkasuodattimen regenerointiin. Vesimäärien pysyessä lähempänä minimiä, eli kahta kuutiota, riittäisi näiden säiliöiden koko. Jos vesimäärät kasvaisivat nykyisestä, olisi helpohkoa kasvattaa vedenpuhdistuslaitoksen kapasiteettia viemättä paljoa lattiapinta-alaa, hankkimalla korkeammat säiliöt. (2, s.145.)

Panoskäsitelyyn päivittäin operaattorilta vaatima työmäärä on melko lailla samaa luokkaa kuin jatkuvatoimisessakin käsittelevässä, riippuen siitä kuinka paljon prosessia halutaan säätää jokaisen panoksen kohdalla. Tosin jatkuvatoimisessa käsittelyssä vaaditaan erilaisia säätö-, mittaus- ja varojärjestelmiä enemmän, jolloin se on monimutkaisempi ja sitä kautta työmäärältään isompi.

3.4 Kustannukset

3.4.1 Nykyinen menetelmä

Tämänhetkisellä menetelmällä kustannuksia syntyy käytetyistä kemikaaleista, syntyvän lietteen hävityksestä aiheutuvista kustannuksista, HSY:n perimistä jätevesimaksuista, energian käytöstä sekä erilaisista työvoimakustannuksista

Viimeisen vuoden (5/2017–5/2018) ajalta kulutuksen perusteella arvioidut kemikaali-kustannukset ovat laitoksella olleet noin 7 300 euroa. Tästä lähes 1 000 euroa tulee natriummetabisulfiitista, jota käytetään kromin pelkistyksessä. Kuudenarvoisen kromin poistussa käytöstä voidaan siis viimevuoden kustannuksista poistaa pelkistysvaiheen kustannukset. Tällöin kemikaalien hinnaksi jää noin 6 300 euroa vuodessa. (24.)

Jätevesien laskeminen viemäriin on myös maksullista, ja tässä tapauksessa siitä koituvat kustannukset ovat vuosittain n. 6 000 euroa. Lisäksi pakolliset neljä kertaa vuodessa tehtävät viemäriin lasketun veden analysoinnit maksavat. (5.)

Koska prosessikylpyjä ei pystytä vedenpuhdistuslaitoksella käsittelemään, täytyy ne lähettää ulkopuoliselle käsittelylaitokselle. Tästä samoin kuin kiintoaineen hävityksestä tulee kustannuksia. Yhteensä näistä syntyvät kustannukset ovat noin 10 000 euroa vuodessa, mukaan lukien kuljetuskustannukset. (5.)

Yhteensä kustannuksia vedenpuhdistuslaitokselta syntyy ilman työvoima- ja energia-kustannuksia n. 23 500 euroa vuodessa.

3.4.2 Panoskäsittely

Panoskäsittelyyn siirryttäessä olisi investoitava suurempaan tasausaltaaseen ja mahdollisesti myös uuteen isompaan säiliöön, vaikka olisikin edullisempaa ainakin aluksi käsitellä vedet sellaisissa panoksissa, ettei uutta säiliötä ole tarpeen hankkia. Toisaalta isomman panoksen käsittely kerralla vähentää operaattoreiden työmäärää ja nopeuttaa prosessia, kun päivittäin ei tarvitse ajaa kuin yksi panos. Muuten investointikustannukset pysyisivät matalina, sillä siirtyminen vaatisi vain jonkin verran asennus- ja testaus-työtä. Nykyisiä säiliöitä käytettäessä olisi niihinkin asennettava valvontalaitteita mittaa-

maan mm. pH:ta ja pinnankorkeutta säiliössä. Muita hankittavia laitteita tasausaltaan lisäksi olisivat siis ainoastaan erilaiset valvontalaitteet.

Käyttökustannuksiltaan panoskäsittely ei eroa suuresti jatkuvatoimisesta käsittelystä. Mahdollisesti kemikaalien pienempi kulutus tekisi panoskäsittelystä edullisemman, mutta erot eivät ole tältä osin suuria. Johtuen panoskäsittelyn yksinkertaisuudesta olisi myös energiankulutus panostoimisessa prosessissa pienempi kuin jatkuvatoimisessa, jolloin siitä saataisiin jonkin verran kustannussäästöjä.

4 Heavy Regulator -saostus

Heavy Regulator -saostus on uusi vuonna 2012 patentoitu menetelmä teollisuuden jätevesien käsittelyyn. Sitä markkinoi Kierto Ympäristöpalvelu Oy. Menetelmä on kehitetty kaikille teollisuudenaloille raskasmetallien poistoon jätevesistä. Jätevesillä tarkoitetaan tässä huuhteluvesiä, joita syntyy pintakäsittelyprosessissa, eikä menetelmä sovellu itse pinnoituskylpyjen käsittelyyn. (25.)

Menetelmä on tällä hetkellä käytössä sekä referenssilaitoksella jatkuvatoimisena että panoskäsittelynä yrityksen omassa tutkimuslaitoksessa. Jatkuvatoimisen laitoksen vuosittain käsiteltävä vesimäärä on noin 2 000 m³. Kyseessä on peittauslaitos, jossa syntyvät jätevedet ovat hiukan erilaisia kuin tarkasteltavassa laitoksessa. Periaate saostuksessa on kuitenkin sama. Ensimmäisiä tuloksia kyseiseltä laitokselta on myös saatu ja menetelmää on opittu käyttämään niin, että tulokset ovat olleet hyviä (Taulukko 2).

Taulukko 2. Analyysitulokset jatkuvatoimiselta referenssilaitokselta ulkopuolisen laboratorion määrittämänä (25)

Analyysi	Pitoisuus (mg/l paitsi sähkönjohtavuudessa mS/m)
Fluoridi, F	< 0,1
Kloridi, Cl	48
Kokonaistyyppi, N	110
Kokonaisfosfori, P	0,55
Kiintoaines	6
pH	9,6
Sähkönjohtavuus	200
Biologinen hapenkulutus	22

Kemiallinen hapenkulutus	59
Kadmium, Cd	0,0013
Kromi 6+	< 0,05
Kokonaiskromi, Cr	0,075
Kupari, Cu	0,029
Lyijy, Pb	< 0,0001
Nikkeli, Ni	0,027
Sinkki, Zn	< 0,005

Panoskäsittelyn vuotuiset vesimäärät ovat noin 660 m³, mikä vastaa lähes täysin tämän työn laitosta. Säiliöiden koot ovat muutamasta kuutiosta kymmeneen kuution. Panoskäsittelyä on tutkittu ja käytetty kahden vuoden ajan.

4.1 Toimintaperiaate

Heavy Regulator -menetelmällä on siis tarkoitus poistaa raskasmetallit jätevesistä. Kyseessä on tehostettu hydroksidisaostus, eli periaate on sama kuin nykyisessä prosessissa. Tehostus tarkoittaa sitä, että vähemmällä kemikaalimäärällä pystytään saostamaan raskasmetalli-ionit, näin ollen myös sakan määrä on pienempi. Saostuskemikaalin tarkkaa koostumusta ei kerrota ennen kuin on tehty sopimus asiakasyrityksen ja Kierto Oy:n välille. Prosessissa syntyvä sakka on kuitenkin booripohjainen. Tyypillisesti esimerkiksi boorihydridejä on käytetty tehostettuun hydroksidisaostukseen, mutta tarkkaa Heavy Regulator -kemikaalin koostumusta ei tämän selvityksen puitteissa ole tiedossa. (2.)

Prosessin virtauskaavio löytyy liitteestä 2.

Tasausaltaaseen tulevat kuudenarvoista kromia sisältävät jätevedet täytyy pelkistää normaalisti ennen saostusvaihetta. Seuraavaksi vesien pH täytyy säätää vähän yli kahteen, lisäämällä esimerkiksi rikkihappoa. pH:n säädön jälkeen voidaan lisätä Heavy Regulator-kemikaali. Annostelu tapahtuu laboratoriokokeiden perusteella määritetyn optimin mukaisesti, mutta keskimäärin yhden kuutiometrin vettä käsittelyyn tarvitaan noin 1 litra Heavy Regulator -saostuskemikaalia, jolloin tällä laitoksella kuluisi sitä vuosittain n. 600 litraa.

Heavy Regulator -kemikaalin lisäämisen jälkeen pH nostetaan jollakin emäksisellä aineella, esimerkiksi natriumhydroksidilla. Tämän jälkeen alkaa saostuminen. Sakan las-

keutumisajassa on kyse kymmenistä minuuteista ja laskeutus voi tapahtua lamelliselkeyttimessä, mutta se ei ole välttämätön. Selkeytyksen jälkeen liete pumpataan kammiosuotopuristimelle kuten nykyisessäkin prosessissa. Puhdistettu vesi on tämän jälkeen viemäröintikelpoista.

4.2 Prosessin vaatimat muutokset

Koska Heavy Regulator -menetelmä perustuu samaan hydroksidisaostukseen kuin nykyinen menetelmä, ei suuria muutoksia ole tarpeen tehdä. Heavy Regulator on kuitenkin yksinkertaisempi, eli joitakin jo käytössä olevia vaiheita olisi mahdollista poistaa. Hiekkasuodatus ja ioninvaihdin ovat esimerkiksi turhia, sillä ilman niitäkin päästään tarpeeksi hyvään puhdistusasteeseen.

Heavy Regulator -menetelmä soveltuu hyvin myös panoskäsittelyyn, jolloin muutokset olisivat samanlaisia kuin nykyisen menetelmän panoskäsittelyssä, eli tarvittaisiin suurempi tasausallas ja riippuen käsiteltävän panoksen koosta myös uusi säiliö.

4.3 Kustannukset

4.3.1 Investointikustannukset

Investointikustannuksia laitteiden puolesta ei Heavy Regulator -menetelmässä synny. Nykyisestä laitoksesta löytyy pH:n säätöallas, saostusallas ja lamelliselkeytin, sekä kammiosuotopuristin. Jos vedenpuhdistuksessa siirryttäisiin panostoimiseen käsitteelyyn, investointikustannuksia syntyisi uuden tasausaltaan hankinnasta, mahdollisesti uusista säiliöistä ja näiden asennuksista.

4.3.2 Käyttökustannukset

Prosessissa tarvittavia kemikaaleja ovat rikkihappo, natriumhydroksidi ja Heavy Regulator -kemikaali. Rikkihapon kulutus vastaa nykyisen prosessin kulutusta, sillä siinäkin saapuvien vesien pH lasketaan kahteen. Natriumhydroksidia tarvitaan seuraavassa vaiheessa pH:n nostamista varten. Säästöjä kemikaalikustannuksista syntyy siis aina-

kin alumiinisulfaatin ja flokkauspolymeerin kustannusten verran eli noin 2 000 euroa vuodessa.

Työvoimakustannukset menetelmällä eivät suuresti eroa nykyisen menetelmän kustannuksista, vaikka prosessi onkin yksinkertaisempi, jolloin sen operointi ja huolto on helpompaa ja vie vähemmän aikaa. Myöskään ioninvaihtimen ja hiekkasuodatuksen regenerointeja ei tarvitsisi tehdä, jos ne jätetään prosessista pois.

Koska Heavy Regulator -menetelmässä kiinteää jätettä syntyy vähemmän kuin nykyisellä menetelmällä, sen hävitys- ja kuljetuskustannukset ovat myös pienemmät. Ottaen huomioon nykyiset kiinteän jätteen hävityksen kustannukset olisi tämä melko merkittävä säästö.

Käyttökustannuksiksi voidaan laskea lisäksi myös lisenssi, joka menetelmästä täytyy vuosittain maksaa. Lisenssin hinta määräytyy sopimusneuvotteluissa yrityskohtaisesti laitoksen koon mukaan. Nykyisellä kokoluokalla hinta olisi arviolta joitakin tuhansia euroja per vuosi. (25.)

4.4 Hyvät ja huonot puolet

Heavy Regulator -menetelmällä on useita etuja verrattuna perinteiseen saostustekniikkaan. Koska siinä lisätään vähemmän saostuskemikaalia, myös sakkaa syntyy selvästi vähemmän kuin nykyisellä tekniikalla. Lisäksi Heavy Regulator -käsittelyssä ei tarvita flokkauspolymeeria, joka saattaa aiheuttaa sakan limaisuutta. Tätä ongelmaa ei tosin ole hetkeen ollut nykyiselläkään menetelmällä. Syntynyt sakka on helppo suodattaa suotopuristimella, ja se myös irtoaa helposti suodatinkankaiden pinnasta.

Menetelmä vastaa myös yrityksen tarpeeseen helppohoitoisuudesta, sillä se vähentää jätevedenkäsittelyn vaiheita. Lisäksi kaikki tarvittavat laitteet löytyvät jo nykyisestä prosessista. Merkittävä etu olisi myös heikosti toimineen ioninvaihtimen tarpeettomuus. Jätevedenpuhdistusprosessissa käytettävien kemikaalien määrä pienenee myös jonkin verran. Lisäksi sakan määrän vähentyessä sen kuljettamisesta ongelmajätelaitokselle ei tarvitse maksaa yhtä paljoa kuin nyt joudutaan.

Puhdistusteho on Heavy Regulator -menetelmällä teoriassa selvästi parempi kuin nykyisellä saostustekniikalla. Tietysti soveltuvuus ja teho täytyisi todentaa vielä laboratorikokeissa, jotta saataisiin todellinen kuva kemikaalikulutuksesta ja soveltuvuudesta juuri tähän prosessiin. Etuna menetelmässä olisi erityisesti komplekseihin sitoutuneiden raskasmetallien saostuminen, joka on tällä hetkellä yksi prosessin ongelmista.

Heavy Regulator -saostuksen ongelmana on lähinnä menetelmän uutuus. Se tarkoittaa, että menetelmästä ei ole läheskään samaa määrää tietoa kuin monista perinteisemmistä menetelmistä. Heavy Regulator -menetelmän objektiivinen arvioiminen on sen takia myös tässä työssä haastavaa. Lisäksi se on patentoitu niin, että käytettävän saostuskemikaalin koostumustakaan ei saa selville ennen sopimuksen tekemistä. Menetelmästä on myös vähemmän kokemuksia muilla vastaavilla laitoksilla, joten menetelmän käyttöönotto täytyisi aloittaa lähes tyhjästä. Toki Kierto Oy:n kautta saa tukea menetelmän käyttöönottoon ja käytön opetteluun, mutta näin uuteen menetelmään sitoutuminen olisi silti jonkinlainen riski.

Hinnaltaan Heavy Regulator -menetelmä on muuten melko lailla nykyistä vastaava, tai hiukan edullisempikin, mutta lisenssi nostaa kustannuksia melko paljon suhteutettuna koko vedenpuhdistuslaitoksen kustannuksiin.

5 Haihdutin

Haihdutus tarkoittaa aineen olomuodon muuttamista nesteestä kaasuksi lämpötilaa tai painetta tai molempia muuttamalla. Haihdutus onkin lämmönsiirto-operaatio, toisin kuin muut työssä käsitellyt menetelmät. Erotuksena tilauksesta, jossa erotetaan toisistaan eri kiehumispisteet omaavia nesteitä, haihdutus-termiä käytetään, kun erotetaan toisistaan haihtuva komponentti, tässä tapauksessa vesi, ja siihen liuenneet haihtumattomat epäpuhtaudet kuten metallit. (15.)

Haihduttimet eivät ole yhtä yleisiä jätevedenpuhdistuksessa kuin edellä esitellyt kemiallis-fysikaaliset menetelmät, vaikka niillä onkin selkeitä etuja erityisesti ympäristönäkö- kulmasta tai teollisuudessa, jossa halutaan ottaa talteen arvokkaita komponentteja jätevedestä. Yleisyyteen eniten vaikuttava tekijä on varmasti niiden hinta, haihdutuslaitteiston investointikustannukset ovat usein korkeat.

Jätevesien käsittelyssä haihdutus tulee prosessissa saostuksen ja selkeytyksen jälkeisenä toimenpiteenä. Haihduttamisella pyritään pienentämään jätevesien tilavuutta, ottamaan talteen liuoksessa esiintyvät metallit tai mahdollistamaan puhdistetun veden kierrätys prosessin muihin osiin. Myös tässä prosessissa puhdistettuja jätevesiä voitaisiin käyttää uudelleen huuhteluvesinä pintakäsittelylaitoksella. (2;3.)

Haihduttamalla pystytään pääosin käsittelemään myös prosessikylvyt. Ennen niiden haihduttamista on kuitenkin kokeiltava tätä pienemmällä määrällä, jotta voidaan varmistua haihdutuksen onnistumisesta. (26.)

Erilaisia haihdutintyyppjeä on useita. Ne voidaan jakaa mm. sen mukaan, millaisessa paineessa ne toimivat, normaali-ilmanpaineessa ja alipaineessa toimiviin. Tässä työssä selvitettiin yhden valmistajan laitteiston hintaa ja ominaisuuksia. Kyseinen laite on vaakuimihaihdutuslaite, eli se toimii alipaineessa. Alipaineessa toimivat haihduttimet ovatkin usein tehokkaampia, ja ne kuluttavat vähemmän energiaa kuin normaali-ilmanpaineessa toimivat vastaavat laitteet. Alipaineen aiheuttamiseksi tarvitaan kuitenkin monimutkaisempi laitteisto alipainepumppuineen. (2.)

5.1 Toimintaperiaate

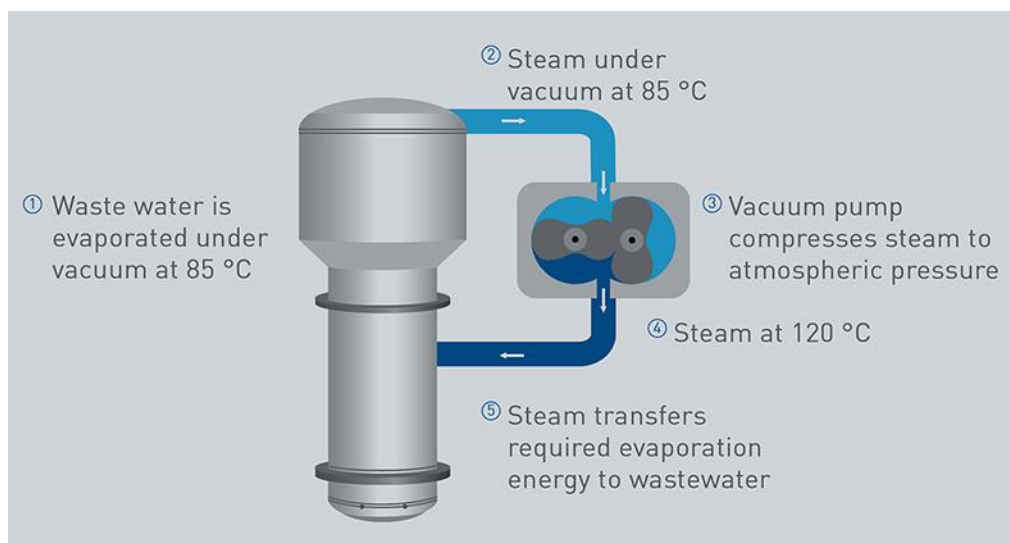
Kuten muissakin prosesseissa myös haihdutusprosessissa saapuvat jätevedet johdetaan ensin säiliöön, jonka tehtävä on tasata virtausta. Käsiteltäessä haihduttamalla happamia jätevesiä, on saapuvien vesien pH nostettava neutraaliksi tai heikosti emäkiseksi. Tämä siksi, että haihtuessaan monet hapot muodostavat vaarallisia kaasuja. Laitetoimittajalla on pH:n säätelyyn tarkoitettu haihduttimeen integroitu lisälaite, joka myös pitää prosessista ulostulevan puhtaan veden pH:n tasaisena.

Neutraloinnin lisäksi mahdollinen kiintoainne on suodatettava, jotta se ei pääse tukki-
maan haihdutuslaitteistoa. Suodatus voidaan tehdä esimerkiksi 50-mikrometrillä suodattimella (24). Näiden toimenpiteiden jälkeen jätevesiä syötetään haihduttimelle tasaisesti, niin ettei haihdutin kuivu missään vaiheessa.

Ennen varsinaista haihdutusta jätevettä lämmitetään haihduttimesta ulostulevalla kuumalla lauhteella. Esilämmitys tapahtuu vastavirtalämmönsiirtimessä, jossa lämmin ja kylmä virta kulkevat vastakkaisiin suuntiin. Tällä tavoin saadaan otettua talteen lämpö-

energiaa kuumasta vedestä ja voidaan näin vähentää haihdutukseen tarvittavaa energiamäärää. Lisäksi lauhde saadaan jäähtymään tehokkaammin.

Esilämmitetty jätevesi kulkeutuu haihduttimelle, jossa kuuman n. 120 °C:n puhtaan vesihöyryn sisältämällä lämpöenergialla ja alipaineella saadaan höyrystettyä esilämmitetty jätevesi. Lämpötila haihduttimessa on n. 85 °C ja alipaine 600 mbar. Veden kiehumispistettä (100 °C) matalampi lämpötila johtuu juurikin alipaineesta, joka laskee veden kiehumispistettä. Tällaisessa haihduttimessa energiaa kuluu eniten laitteen käynnistämiseen, jonka jälkeen lämmönsiirtimillä ja alipainepumpulla saadaan ylläpidettyä haihdutusprosessia. (2, s.89; 27.)



Kuva 6. Alipaineessa tapahtuvan haihdutuksen periaate (27)

Vesihöyry ja epäpuhtaudet erotetaan erottimessa, jonka kolmikerroksinen rakenne mahdollistaa hyvän erotustehokkuuden. Kyseisessä laitteessa erotin on syklonityyppinen. Syklonierottimissa erotus perustuu keskipakoisvoimaan, jonka takia suurella nopeudella erottimeen johdettava vesihöyry ja siinä nestefaasissa esiintyvät epäpuhtaudet erottuvat. (28.)

Erotuksen jälkeen puhdas vesihöyry kulkee alipainepumpun kautta eteenpäin. Alipainepumpulla vesihöyryn paine nostetaan normaaliin ilmanpaineeseen ja höyry lämmitetään 120 °C:seen. 120-asteinen vesihöyry johdetaan ensin haihduttimelle, jossa se kuumentaa jätevettä, ja tämän jälkeen esilämmönsiirtimelle. Epäpuhtauksia sisältävä konsentraatti valuu erotuksessa takaisin haihduttimelle ja laitteen pohjan kautta ulos

varastosäiliöön. Konsentraatti kuljetetaan varastosäiliön täyttymisen jälkeen ongelmajätelaitokselle. (28.)

Tässä prosessissa esiintyvät raskasmetallit on suhteellisen helppo erottaa vedestä haihduttamalla, sillä ne eivät muodosta atseotrooppisia seoksia veden kanssa, eivätkä ne muuta olomuotoa lähelläkään veden lämpötiloja. Muutenkin tällä laitoksella käsiteltävät jätevedet ovat melko tyypillisiä pintakäsittelylaitoksen vesiä. Näiden haihduttaminen ei tuota ongelmia eikä vaadi erikoiskäsittelyjä toisin kuin esimerkiksi syanidipitoisten jätevesien.

Jäljelle jäävän epäpuhtauksia sisältävän konsentraatin tilavuus on jäteveden koostumuksesta riippuen noin 0,5–5 % käsiteltävän veden määrästä. Tällä laitoksella se tarkoittaisi vuosittain noin 3–30 m³. Konsentraatin määrä riippuu jätevesien koostumuksesta ja siitä käsitelläänkö myös kylvyt haihduttimessa. Arvio syntyvän konsentraatin määrästä saadaan koetislauksen perusteella. (29.)

Liitteessä 3 on virtauskaavio haihdutusprosessista.

5.2 Prosessin vaatimat muutokset

Jos siirryttäisiin käsittelemään jätevedet haihduttamalla, menisi vedenpuhdistuslaitos lähes kokonaan uusiksi. Vanhoja altaita ei tarvittaisi lainkaan vaan tilalle tulisi säiliö tulevaa vettä varten, haihdutuslaitteisto ja säiliö puhdistetulle vedelle sekä konsentraatin varastosäiliö. Tilaa haihdutuslaitteisto veisi vähemmän kuin nykyinen prosessi. Liitteessä 4 on kuva haihdutusprosessin laitteista ja niiden mitoituksista.

Jotta puhdistettua vettä voitaisiin hyödyntää pintakäsittelyprosessissa, tulisi myös rakentaa putket puhdistetun veden säiliöstä prosessiin.

5.3 Kustannukset

5.3.1 Investointikustannukset

Haihdutinvalmistajaa edustavan yrityksen edustaja arvioi haihdutuslaitteiston hinnaksi noin 200 000 euroa. Tarkemman tarjouksen saa laitevalmistajan tekemän koehaihdu-

tuksen jälkeen. Koehaihdutuksen hinta on 800 euroa. Lisäksi uuden puhdistuslinjan ja putkien asentamisesta koituu työvoimakustannuksia. (26.)

Investoinnin takaisinmaksuaika on alla esitetyn laskukaavan (4) mukaan lähes kymmenen vuotta. Eli takaisinmaksuaika on huomattavasti pidempi kuin yrityksen yleinen investointiperiaate. Nettotuotoksi on laskettu nykyisen prosessin käyttökustannukset, joista on vähennetty haihdutuksen käyttökustannukset eli energia- ja kemikaalikustannukset. Lisäksi nettotuottona on otettava huomioon säästyneet puhtaan veden käyttömaksut. Kaikki nämä summat ovat melko karkeita arvioita, joten nettotuoton määrää ei välttämättä voi pitää kovinkaan luotettavana. Investoinnin takaisinmaksuajan laskemiseen on tässä käytetty yksinkertaisempaa yhtälöä, jossa ei tehdä diskonttausta eli laskukaava ei ota huomioon koron vaikutusta.

$$\text{investoinnin takaisinmaksuaika} = \text{hankintamenot} \div \text{vuotuinen nettotuotto} \quad (4)$$

$$\text{investoinnin takaisinmaksuaika} = 200\,000 \text{ e} \div 22\,000 \frac{\text{e}}{\text{a}} = 9,1 \text{ a} \quad (5)$$

5.3.2 Käyttökustannukset

Koska haihdutus vaatii energiaa, täytyy käyttökustannuksiin laskea energian hinta (kaava 6). Yrityksen arvio tämän haihduttimen energiantarpeesta on noin 60 kWh/m³. Kun käytetään sähkön hintana 8 snt/kWh, voidaan laskea vuotuiset energiakustannukset. Tällöin vuodessa haihduttimesta tulee energiakustannuksia alla esitetyn laskutoimituksen (7) mukaisesti 2 880 euroa. (30; 31.)

$$\text{energiakustannukset} = \text{haihduttimen energiantarve} \times \text{käsiteltävä vesimäärä} \times \text{sähkön hinta} \quad (6)$$

$$\text{energiakustannukset} = 60 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \times 600 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \times 8 \frac{\text{snt}}{\text{kWh}} = 2\,880 \frac{\text{e}}{\text{a}} \quad (7)$$

Käyttökustannuksia syntyy myös konsentraatin käsittelystä. Se täytyy lähettää ongelmajätelaitokselle hävitettäväksi.

Lisäksi tässäkin menetelmässä pitää huomioida työvoimakustannukset. Haihdutusprosessissa työvoiman tarve on kuitenkin erittäin pieni, sillä kemikaaleja ei tarvitse lisätä, eikä esimerkiksi suotopuristinta puhdistaa.

5.4 Hyvät ja huonot puolet

Haihduttimen etuina voidaan pitää ensinnäkin sen puhdistustehokkuutta. Haihduttamalla jätevedestä saadaan poistettua lähes kaikki epäpuhtaudet. Tällöin puhdistettua vettä voidaankin käyttää uudelleen pintakäsittelyprosessissa, eikä jätevesiä tarvitse laskea viemäriin. Tämä säästää rahaa sekä puhtaan veden käyttömaksuissa että jätevesimaksuissa. Myöskään ulkopuolisen laboratorion tekemiä mittauksia ei tarvita. Lisäksi suljettu kierto prosessin osien välillä ja vedenkulutuksen väheneminen ovat ympäristön kannalta positiivisia vaikutuksia.

Positiivista on myös haihdutusprosessin varmatoimisuus. Laite ei vaadi valvontaa eikä kemikaalien annostelua. Myös tarvittavien kemikaalien määrä vähenee, mikä säästää varastointitilaa, rahaa ja parantaa turvallisuutta. Turvallisuuden kannalta positiivista on myös avoimista säiliöistä ja altaista luopuminen, sekä laitteen automaattisuus. Tällöin inhimillisiltä vahingoilta on helpompi välttyä.

Vuoden aikana kerättävä epäpuhtauksia sisältävä konsentraatti mahtuu parhaassa tapauksessa (3 m³) erittäin pieneen tilaan, jolloin sen lähettäminen hävitettäväksi on suhteellisen edullista verrattuna nykyisessä ja Heavy Regulator -menetelmässä syntyvään kiintoainekseen. Mutta vaikka sitä syntyisi arvioitu maksimimäärä 30 m³, olisi se silti pienempi kuin prosessikylpyjen ja kiinteän jätteen määrä saostukseen perustuvissa menetelmissä.

Haihduttimen huonoin puoli on sen hinta. Pitkällä aikavälillä sen kustannukset laskevat selvästi, sillä käyttökustannukset ovat hyvin pienet, mutta kertainvestointi on suuri.

6 Yhteenveto ja loppupäätelmät

Yhteenvetona (Taulukko 3.) tässä työssä käsitellyistä kolmesta menetelmästä nykyisestä, Heavy Regulator -saostuksesta ja haihdutuksesta voidaan sanoa, että pysyminen nykyisessä menetelmässä on edullisinta. Molempien vaihtoehtoisten menetelmien puhdistustehokkuus on kuitenkin parempi kuin nykyisellä menetelmällä. Lisäksi ne molemmat vähentävät syntyvän jätteen määrää. Näin ollen ainakin ympäristön kannalta olisi edullista miettiä, josko kustannuksista huolimatta haluttaisiin investoida uuteen jätevedenkäsittelyprosessiin.

Taulukko 3. Yhteenveto eri menetelmistä

	Hyvät puolet	Huonot puolet	Kustannukset
Nykyinen menetelmä	<ul style="list-style-type: none"> - Ei vaadi muutoksia - Puhdistusteho riittävä - Varmatoimisuus 	<ul style="list-style-type: none"> - Metallikompleksien poistaminen jätevedestä haastavaa - Ioninvaihtimen toiminnan epätasaisuus - Jätteen määrä 	<ul style="list-style-type: none"> - Käyttökustannukset n. 23 500 euroa vuodessa
Panoskäsittely	<ul style="list-style-type: none"> - Tilansäästö - Kemikaalikulutuksen pieneneminen - Vähemmän laitteita ja niiden valvontaa 	<ul style="list-style-type: none"> - Kompleksien poistaminen ei välttämättä helppoa 	<ul style="list-style-type: none"> - Investointikustannukset ovat pienet, sisältäen vain uuden tasausaltaan hankinnan ja asennukset - Käyttökustannukset vastaavat nykyisen menetelmän kustannuksia, säästöä tulisi mahdollisesti pienenevistä kemikaali- ja energiakustannuksista
Heavy Regulator	<ul style="list-style-type: none"> - Prosessin yksinkertaistaminen - Puhdistusteho - Kiinteän jätteen määrän väheneminen 	<ul style="list-style-type: none"> - Tekniikasta vähän tietoa ja kokemuksia 	<ul style="list-style-type: none"> - Lisenssi tuhansissa euroissa/vuosi - Kiinteän jätteen hävityskustannukset pienenevät
Haihdutus	<ul style="list-style-type: none"> - Puhdistusteho - Ei synny viemäritäviä jätevesiä ja niistä aiheutuvia kustannuksia - Mahdollistaa puhdistetun veden käytön pintakäsittelyä 	<ul style="list-style-type: none"> - Hintaa 	<ul style="list-style-type: none"> - Investointikustannus n. 200 000 € - Käyttökustannukset koostuvat lähinnä energia- ja työvoimakustannuksista, sekä konsentraatin käsittelystä

	lyprosessissa - Syntyvän konsentraatin määrä on vähäinen		- Investointi maksaa itsensä takaisin noin yhdeksässä vuodessa
--	---	--	--

Heavy Regulator -menetelmän etu on, ettei se vaadi suuria muutoksia prosessiin, mutta parantaa silti puhdistuksen tehoa ja vähentää jätteen määrää. Ongelma menetelmässä on lähinnä se, että objektiivista aineistoa ei menetelmästä löydy ja siksi kaikki tieto tässäkin työssä on sitä markkinoivan yrityksen kautta tullutta. Toki esimerkiksi analyysitulokset (taulukko 2) puhuvat puolestaan ja niistä nähdään, että oikein toimiesaan menetelmä on tehokas. Laboratoriokokeita menetelmän soveltuvuudesta tälle laitokselle olisi tehtävä seuraavaksi, mikäli haluttaisiin harkita Heavy Regulator -menetelmän käyttöönottoa.

Haihduttaminen on näistä kolmesta menetelmästä tehokkain, mutta myös kallein. Investoinnin takaisinmaksuaika haihduttimelle ei ole tarpeeksi lyhyt, että se olisi välttämättä lyhyellä aikavälillä kannattavaa hankkia. Tosin tässä työssä saatiin tarjous vain yhdeltä yritykseltä, eikä ole poissuljettua etteikö muita halvempia laitteistoja olisi markkinoilla. Joten jos ollaan vieläkin kiinnostuneita haihduttamisesta, niin hintavertailua muiden vastaavien toimittajien välillä olisi järkevä suorittaa.

Yrityksen vaatimukseen kuuluivat hinnan lisäksi helppohoitoisuus, varmatoimisuus ja prosessin vaatima tila. Kaikilla näillä osa-alueilla lukuun ottamatta edellä käsiteltyä hintaa Heavy Regulator -saostus ja haihdutus olisivat ainakin teoriassa parempia vaihtoehtoja kuin nykyinen menetelmä. Aluksi uuden prosessin käyttöönotto veisi tietysti enemmän aikaa ja vaatisi opettelua, mutta molemmat menetelmät sisältävät vähemmän vaiheita, jolloin niiden valvonnan pitäisi myös olla helpompaa. Lisäksi vaiheiden väheneminen vähentäisi myös prosessilaitteita ja näin ollen säästäisi tilaa.

Jos halutaan vain kehittää nykyistä prosessia, voisi panoskäsittely olla hyvä vaihtoehto. Tällöin saataisiin valtaosan ajasta tyhjillään olevat tilaa vievät säiliöt jatkuvaan käyttöön ja kenties laskettua kemikaalikustannuksia. Panoskäsittelyssä saataisiin myös valvottua tehokkaammin, ettei ylityksiä raja-arvoihin tule. Toinen vaihtoehto nykyisen prosessin kehittämiseksi olisi tutkia, millaisia vaihtoehtoisia kemikaaleja markkinoilla olisi saostukseen ja flokkaukseen nykyisen alumiinisulfaatin tilalle.

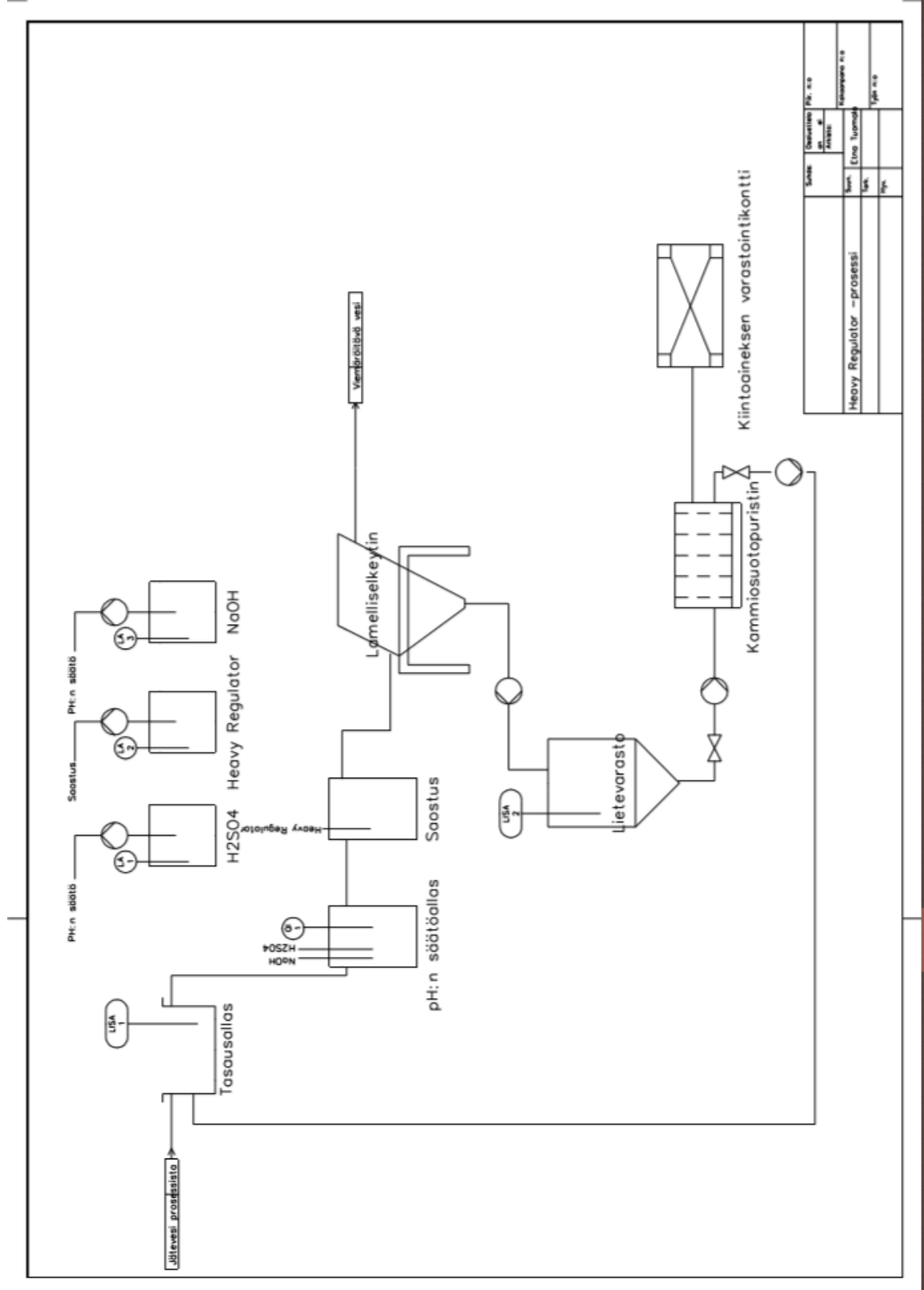
Lähteet

- 1 Yhtiömme. 2006-2018. Verkkoaineisto. Gemalto Oy. <www.gemalto.com/suomi/yhtiomme/> Luettu 18.4.2018.
- 2 Suomen Galvanoteknisen seuran julkaisuja nro 8. 2003. Pintakäsittelylaitosten vesien käsittely. Jyväskylä. Gummerus Kirjapaino.
- 3 Jarmo Siivinen & Amar Mahiout. 1999. Pintakäsittelylaitosten jätevesikuorman vähentäminen Osa 1. Kirjallisuusselvitys.
- 4 Teollisuusjätevesisopimus. 2014. Yrityksen sisäinen dokumentti. Gemalto Oy.
- 5 Arkiomaa Miia. 2018. QHSE-manager. Gemalto Oy. Vantaa. Aloituspalaveri 10.4.2018 ja sähköpostikeskustelu 18.4. - 12.6.2018.
- 6 Compound Summary for CID 29131. 16.9.2014. Verkkoaineisto. PubChem Open Chemistry Datapage. <<https://chem.nlm.nih.gov/chemidplus/sid/0018540299>> Luettu 20.6.2018
- 7 Lupamenettely. 2018. Verkkoaineisto. REACH, CLP ja biosidi neuvontapalvelu yrityksille. <<http://www.kemikaalineuvonta.fi/fi/Saadosalue/REACH/Menettelyt/Lupamenettely/>> Päivitetty 22.5.2018. Luettu 20.6.2018
- 8 Stockmann-Juvala Helene, Hyytinen Eija-Riitta, Zitting Antti, Santonen Tiina. 2010. Kromimetallin ja epäorgaanisten kromi(III)-yhdisteiden tavoitetasoperustelu. Työterveyslaitos. 1.12.2010.
- 9 Solomon, Frances. 2009. Impacts of Copper on Aquatic Ecosystems and Human Health. Verkkoaineisto. <http://www.ushydrotech.com/files/6714/1409/9604/Impacts_of_Copper_on_Aquatic_Ecosystems_and_human_Health.pdf> Luettu 15.7.2018.
- 10 Seuranen, Timo. 2015. Investoinnin laskentaopas. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 11 Kolehmainen, Terhi. 2013. Kemiallinen saostus metallien talteenotossa ja vedenpuhdistuksessa. Pro gradu-tutkielma. Oulun yliopisto, Kemian laitos. Oulun yliopiston julkaisuarkisto.
- 12 Dao, Vu H., Cameron, Neil R., Saito, Kei. 2016. Synthesis, properties and performance of organic polymers employed in flocculation applications. Polymer Chemistry Issue 1 January 2016, s.11–25.

- 13 Frassila, Sami. 2014. Pintavesilaitoksen saostuslietteiden tiivistys, vedenerotus ja loppusijoitus. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- 14 Lamella-selkeyttimet. Verkkoaineisto. Hyxo Oy.
<https://hyxo.fi/products/fin/lamella_selkeyttimet-p-288-642/> Luettu 2.8.2018
- 15 Yksikköoperaatiot ja teolliset prosessit. 2015. Kurssimateriaali. Aalto yliopisto.
- 16 Deionization technologies. 2016. Verkkoaineisto. Kurita Water Industries Ltd.
<http://www.kurita.co.jp/english/technology/core_technology/deionized.html> Luettu 2.8.2018
- 17 Niskakoski, Henna. 2013. Metallien eluointi kelatoivasta ioninvaihtimesta. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- 18 Andritz filter press. 2018. Verkkoaineisto. Andritz Separation GMBH.
<<https://www.andritz.com/products-en/group/separation/filter-presses/filter-press-side-bar-overhead>> Luettu 2.8.2018
- 19 Coordination chemistry of transition metals. Verkkoaineisto. Open Stax resource.
<<https://opentextbc.ca/chemistry/chapter/19-2-coordination-chemistry-of-transition-metals/>> Luettu 13.5.2018
- 20 Tulonen, Miikka. 2011. Metallien kompleksinmuodostus liuosfaasissa. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- 21 Lide, David R. 2003. Handbook of chemistry and physics 87th Edition. CRC Press LLC. 58 USA.
- 22 Toivonen, Jukka. 2013. Analyttinen kemia. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 23 Batch versus continuous treatment. 1998. Verkkoaineisto. Bulk Transporter.
<<https://www.bulktransporter.com/archive/batch-versus-continuous-treatment>> Julkaistu 1.10.1998 Luettu 20.7.2018
- 24 Olkinuora, Martta. 2018. Gemalto Oy. Sähköpostikeskustelu 25.5.2018.
- 25 Kapanen, Jaakko. 2018. Business unit manager, Kierto Ympäristöpalvelut Oy. Sähköposti- ja puhelinkeskustelut 9.5.–18.6.2018.
- 26 Wiik, Esa. 2018. Sales Manager, Finnsonic Oy. Sähköpostikeskustelu 22.5.–11.6.2018.

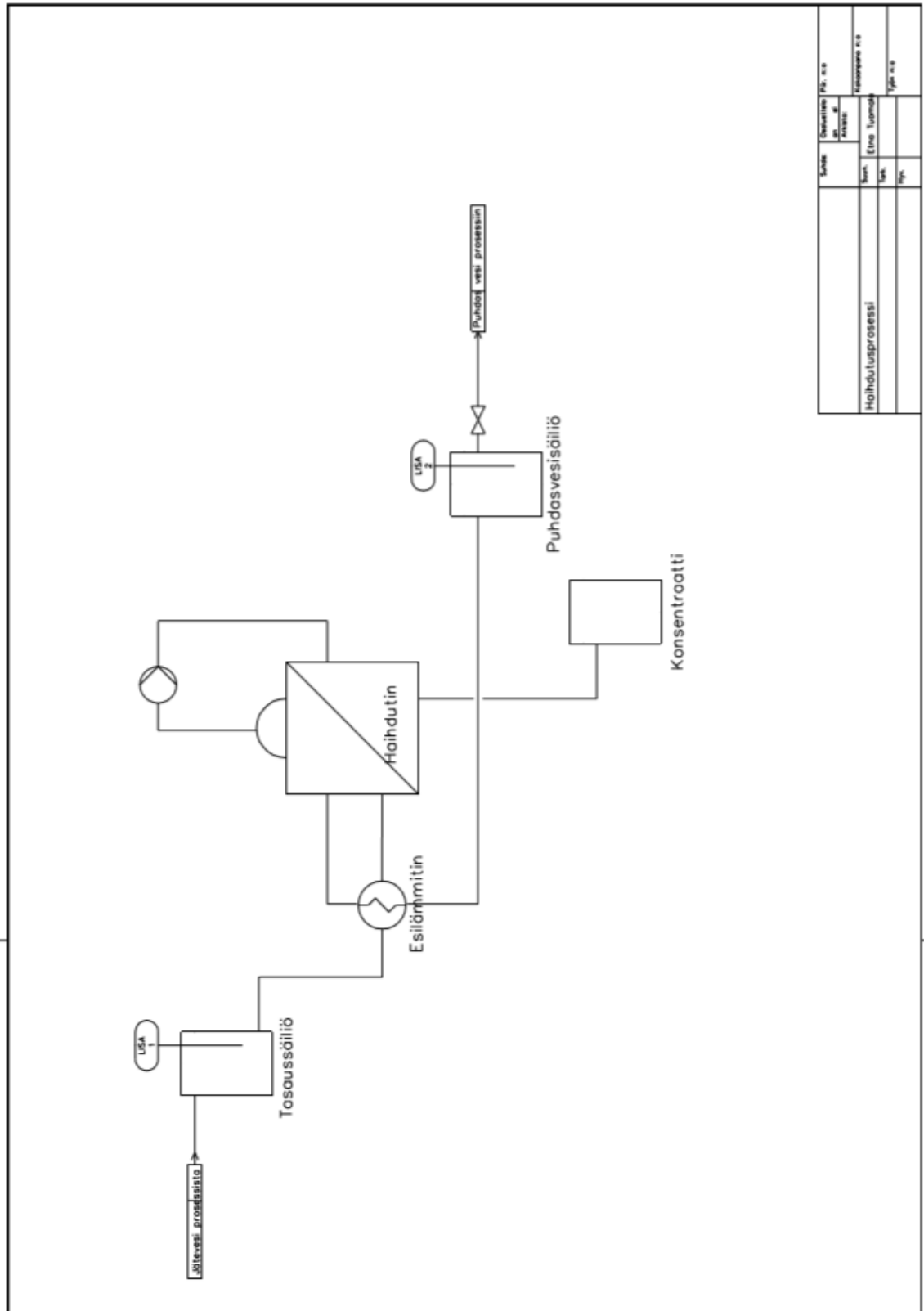
- 27 Wastewater evaporator with energy recycling. 2018. Verkkoaineisto. H₂O GmbH. <<https://www.wastewater-evaporator-h2o.com/innovations/vacudest-wastewater-evaporator-with-energy-recycling>> Luettu 20.6.2018
- 28 FinnSonic jätevedenkäsittelyratkaisut. 2018. PowerPoint-esitys. Finnsonic Oy.
- 29 Vacudest brochure. 2017. Verkkoaineisto. H₂O GmbH. <<https://www.wastewater-evaporator-h2o.com/images/h2o/downloads/prospekte/Englisch/ab-2017/GB-VACUDEST-Stand-2017.pdf>> Päivitetty 2/2017. Luettu 23.5.2018.
- 30 Technical data Vacudest S. 2017. Verkkoaineisto. H₂O GmbH. <<https://www.wastewater-evaporator-h2o.com/images/h2o/downloads/datenblaetter/Englisch/ab-2017/H2O-GB-Datasheet-S.pdf>> Päivitetty 2/2017. Luettu 23.5.2018.
- 31 Energian hinnat - 2017 3. neljännes. 2017. Raportti. Tilastokeskus.

Heavy Regulator -prosessin virtauskaavio



Sivun numero	Sivun määrä	Päiväys	
		vuosi	kuukausi
Heavy Regulator -prosessi			

Haihdutusprosessin virtauskaavio



Haihdutuslaitteiston kuva ja layout-piirustus

