

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Makean veden valmistaminen merivedestä

Seawater desalination

Työn tarkastaja: Professori Esa Vakkilainen

Työn ohjaaja: Professori Esa Vakkilainen

Lappeenranta 9.4.2018

Joonas Hyvärinen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Joonas Hyvärinen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Professori Esa Vakkilainen

Kandidaatintyö 2018

31 sivua, 10 kuvaa, 2 taulukkoa.

Hakusanat: merivesi, suolanpoisto

Kandidaatintyössä tutkitaan makean veden valmistamista. Työn tavoitteena on selvittää makean veden valmistusprosessi ja yleisimmät makean veden valmistamiseen käytettävät menetelmät sekä vertailla niitä keskenään. Työ on kirjallisuuskatsaus, jossa lähteinä käytetään alan kirjallisuutta, tutkimuksia, lehtiartikkeleita ja uutisia.

Makean veden valmistaminen on energiaa vaativa prosessi, jonka vaiheita ovat esikäsittely, suolanpoisto ja jälkikäsittely. Esikäsittelyssä vedestä poistetaan eloperäinen aines ja sen tarkoituksena on likaantumisen ja karstoittumisen vähentäminen. Suolanpoistossa veden kiintoainepitoisuutta lasketaan ja jälkikäsittelyssä vesi neutraloidaan jakelua varten.

Käänteisosmoosi on yleisimmin käytetty makean veden valmistusprosessi, jossa suolainen vesi pakotetaan puoliläpäisevän kalvon läpi. Käänteisosmoosin suosio perustuu matalan energiankulutuksen tuomaan kustannustehokkuuteen, etenkin murtovedellä. Käänteisosmoosilaitoksissa esikäsittelyn merkitys on suuri sillä kalvot ovat herkkiä eloperäisen aineksen aiheuttamalle likaantumiselle.

Muita valmistusmenetelmiä ovat termiset prosessit monivaiheinen tislauk (MED) ja paisuntahaihdutus (MSF), joissa suolanpoisto perustuu faasimuutokseen. Karkeamman rakenteensa vuoksi prosessit ovat toimintavarmoja, ja soveltuvat hyvin suolaiselle merivedelle. Prosesseja voidaan käyttää yhteistuotannossa höyryvoimalaitosten kanssa.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Makean veden käyttö	7
2.1 Vesivarannot.....	7
2.2 Makean veden kulutus.....	9
3 Makean veden valmistus	11
3.1 Esikäsittely	12
3.2 Suolanpoisto	13
3.3 Jälkikäsittely.....	14
3.4 Valmistusmäärät	15
4 Yleisimmät sovellukset	18
4.1 MED – multi-effect distillation	18
4.2 MSF – monivaiheinen paisuntahaihdutus	21
4.3 RO – käänteisosmoosi	23
4.4 Sovellusten vertailu	25
5 Yhteenveto	29
6 Lähdeluettelo	31

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

MSF monivaiheinen paisuntahaihdutus

MED monivaiheinen tislauk

RO käänteisosmoosi

SWRO käänteisosmoosi merivedellä

1 JOHDANTO

Makea vesi on välttämätöntä paitsi ihmisen perusaineenvaihdunnan, myös yhteiskunnan toiminnan kannalta. Vettä käytetään laajalti maanviljelyksessä, energiantuotannossa ja teollisuudessa.

Tulevaisuudessa makea vesi tulee todennäköisesti olemaan niukka luonnonvara. Väestönkasvun lisäksi alati kasvava vedenkulutus henkilöä kohden tulee kasvattamaan vedentarvetta runsaasti (Kucera 2014, 7). Perinteisesti makea vesi on otettu luonnonvarastoista joko pohja- tai pintavesistä. YK:n arvioiden mukaan jopa kaksi kolmannesta maapallon väestöstä on kuitenkin keskittynyt kaupunkeihin vuoteen 2050 mennessä (UN 2015, 7). Kaupungistuminen aiheuttaa suuren pistekuormituksen jo ennestään epätasaisesti jakautuneille vesivarannoille. Lisäksi ilmaston lämpeneminen ja ilmastonmuutoksen seurauksena lisääntyvät sään ääri-ilmiöt tulevat aiheuttamaan oman uhkansa puhtaan veden saannille.

Tulevaisuuden uhkakuvat ovat kääntäneet valtioiden ja yritysten päättäjät kehittämään vaihtoehtoisia tapoja makean veden saannin turvaamiseksi. Eräs viime vuosina runsaasti kasvanut keino on makean veden valmistaminen kenties runsaimmasta luonnonvarastamme, merivedestä. Vuonna 2017 suolanpoistolaitosten kokonaiskapasiteetti oli likimain 100 miljoonaa kuutiota päivässä (IDA 2017, Water Online). Tästä kapasiteetista noin 70 prosenttia on asennettu tämän vuosituhannen puolella (Kucera 2014, kuva 1.6 (a)).

Tämä työ on Lappeenrannan teknillisen yliopiston energiatekniikan koulutusohjelman kandidaatintyö. Tavoitteena on tehdä ytimekäs ja johdonmukainen katsaus, joka tarjoaa järkevästi jäseneltynä ja tiivistettynä oleellisen perustiedon makean veden valmistamisesta. Työn tarkoituksena on selvittää yleisimmin käytössä olevat makean veden valmistusmenetelmät ja selvittää niiden toimintaperiaatteet. Lisäksi työn tarkoituksena vertailla prosesseja keskenään ja pohtia niiden menestykseen vaikuttavia

syitä. Työ on puhtaasti kirjallisuuskatsaus, lähteinä on käytetty pääasiassa aihepiiriin liittyvää kirjallisuutta, artikkeleita ja uutisia.

Työn alkuosassa perehdytään ensin makean veden varantoihin ja niiden jakautumiseen. Lisäksi kuvataan lyhyesti myös vedenkulutusta ja sen kehityssuuntia.

Seuraavassa osassa käsitellään makean veden valmistusta yleisesti. Tässä osassa kuvataan makean veden valmistusprosessin päävaiheet; esikäsitely, suolanpoisto ja jälkikäsitely. Lisäksi esitetään perusteet erilaisten valmistusprosessien jaottelulle ja tutustutaan yleisimpien valmistusprosessien asennus- ja tuotantomääriin.

Makean veden valmistuksessa suolanpoisto on kenties merkityksellisin vaihe koko prosessissa. Työn seuraavassa osassa tutustutaankin tarkemmin kolmeen yleisimpään käytössä olevaan suolanpoistoprosessiin. Tarkoituksena on esittää kunkin prosessin toimintaperiaate, suorituskyky ja energiankulutus, lisäksi tutustutaan kustannuksiin ja tärkeimpiin sovelluskohteisiin. Lisäksi pyritään muodostamaan kuva erilaisten prosessien hyvistä ja huonoista puolista, tekemään vertailua prosessien välillä ja etsimään perusteita asennetun kapasiteetin kehitykselle.

2 MAKEAN VEDEN KÄYTTÖ

Vesi on fysikaaliskemikaalisilta ominaisuuksiltaan hyvin monimuotoinen. Veteen liuenneiden suolojen lisäksi vesi voi sisältää raskasmetalleja, taudinaiheuttajia ja eloperäistä ainesta, kuten levää tai liejua (Ray & Jain 2011). Eräs yleisesti käytössä oleva veden laadun mittari on kiintoainepitoisuus. Kiintoainepitoisuus mitataan suodattamalla vesinäyte 2 mikrometrin suodattimen läpi, haihduttamalla suodatin kuivaksi ja mittaamalla suodattimen massan muutos (Boyd 2017, 71). Kiintoainepitoisuus ilmoitetaan yksikössä mg/l.

Makealla vedellä tarkoitetaan vettä, jonka kiintoainepitoisuus on alle 1500 mg/l (Micale., Rizzuti, Cipollina, 2009, taulukko 1.1). WHO:n ohjearvon mukaan juotavaksi tarkoitettun veden kiintoainepitoisuuden tulisi olla alle 1000 mg/l, toisaalta hyvin matala kiintoainepitoisuus ei välttämättä ole juomavedelle hyvä ominaisuus sillä se saattaa aiheuttaa juomaveteen latteaa makua (WHO, 2003).

Meriveden kiintoainepitoisuus voi vaihdella, tyypillisesti se on noin 35 000 mg/l. Esimerkiksi joen laskeminen mereen tai jäätiköiden sulaminen alentaa meriveden kiintoainepitoisuutta paikallisesti, tällaista vettä kutsutaan murtovedeksi. Murtoveden kiintoainepitoisuus on tyypillisesti 1000-10 000 mg/l. Vastaavasti mikäli lämpötila on korkea ja makean veden lähteitä ei ole, voi meriveden kiintoainepitoisuus olla jopa 45 000 mg/l. (Micale et al., 2009, 3.)

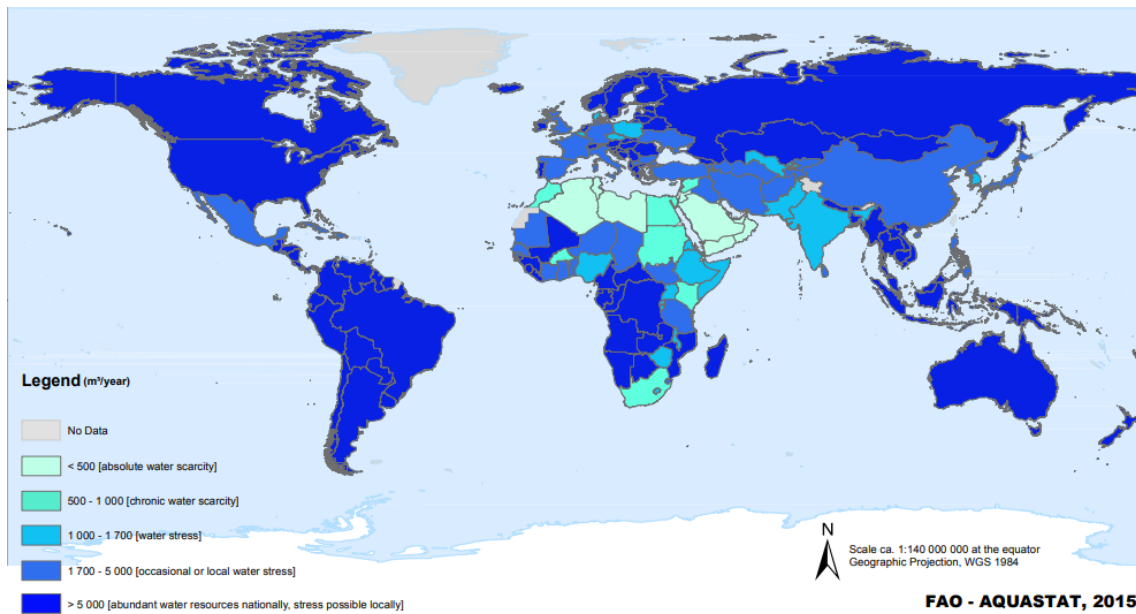
2.1 Vesivarannot

Maapallon pinta-alasta noin kolmannes on veden peittämää, vesi on siis kiistatta erittäin runsas luonnonvara. Suuret asutuskeskittymät ovat perinteisesti keskittyneet veden läheisyyteen, hyötykäyttönsä lisäksi vedestä on ollut apua myös liikkumiseen.

Käytännössä veden kokonaismäärä on ihmiskäyttöä varten ajateltuna rajaton. Kuitenkin kaikesta vedestä noin 97,5 % on merivettä, joka sellaisenaan ei sovellu teollisuuden, maanviljelyksen ja kotitalouksien käyttöön. Jäljelle jäävästä osuudesta peräti 80 % on

sitoutunut jäätiköihin ja pysyvään lumeen. Loppujen lopuksi kaikesta vedestä vain 0,5 % on pinta- ja pohjavesissä. (Kucera 2014, kuva 1.1).

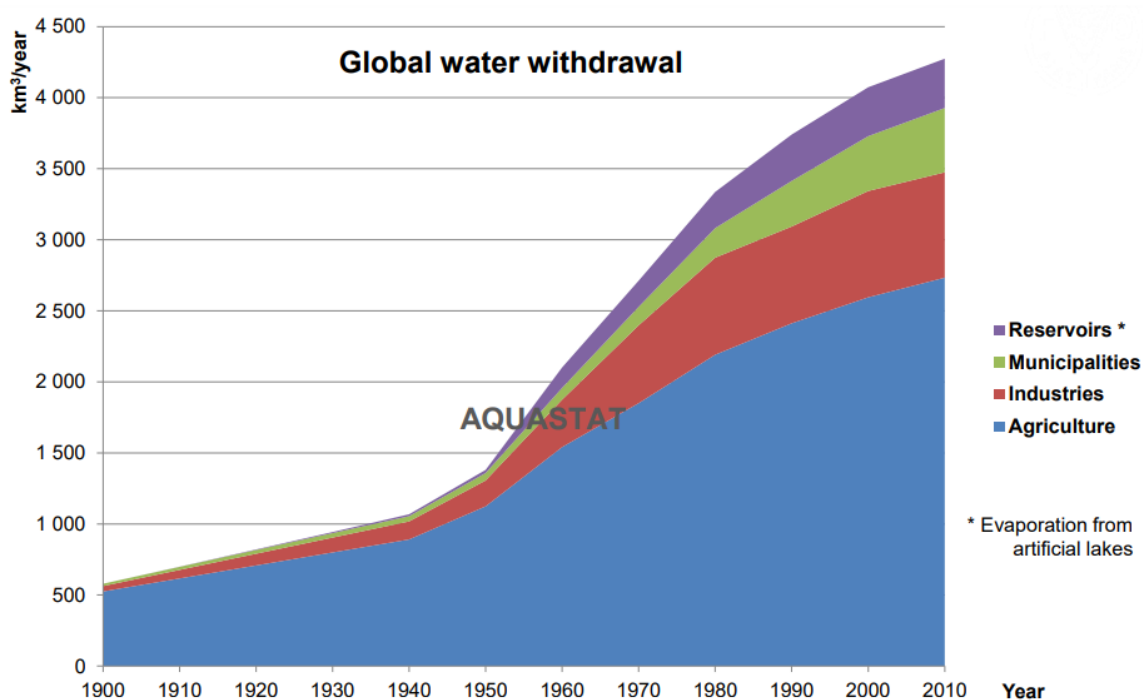
Pohja- ja pintavesivarannot ovat jakautuneet alueellisesti epätasaisesti, varantojen jakautumiseen vaikuttaa pitkän aikavälin vuosittainen sadanta ja haihdunta. Kaikkein runsassateisimmat alueet sijaitsevat päiväntasaajan seudulla Etelä-Amerikassa, Afrikassa ja Kaakkois-Aasiassa. Näillä alueilla myös haihdunta on suurta. Vesivarantojen suuruuteen vaikuttaa oleellisesti myös alueella asuvan väestön määrä, siksi onkin perusteellista esittää vesivarannot suhteutettuna väestön määrään. Kuvassa 1 on esitettyä vesivarantojen suuruus asukasta kohden. Kuvasta voidaan havaita, että veden niukkuudesta kärsiviä maita on erityisesti Pohjois-Afrikassa ja Lähi-Idässä. Lisäksi huomionarvoista on se, että maailman väkirikkaimmat valtiot Kiina ja Intia kärsivät myös veden niukkuudesta.



Kuva 1. Vesivarantojen määrä asukasta kohden (FAO 2015).

2.2 Makean veden kulutus

Makeaa vettä käytetään laajalti maanviljelyksessä, teollisuudessa ja kotitalouksissa. Viimeisen sadan vuoden aikana veden kulutus on kasvanut huomattavasti. Vuonna 1900 vettä käytettiin maailmanlaajuisesti noin 500 kuutiokilometriä vuodessa, vuonna 2010 vastaava luku oli vajaat 4500 kuutiokilometriä (Kuva 2). Vastaavana ajanjaksona maapallon väkiluku kasvoi puolestatoista miljardista noin seitsemään miljardiin. Reilun sadan vuoden aikana vedenkulutus siis kasvoi noin kaksi kertaa enemmän suhteutettuna väestönkasvuun.



Kuva 2. Veden kulutuksen jakautuminen 1900-2010. (FAO 2010).

Eniten makeaa vettä käytetään maanviljelykseen. Kuvasta 2 voidaan havaita, että makean veden kulutuksesta yli puolet menee maanviljelyksen käyttöön. Maanviljelyksessä vettä käytetään kasvien kasteluun ja karjaeläinten juomavedeksi. Erityisesti lihantuotanto

vaatii runsaasti vettä, esimerkiksi yhden naudanlihakilon tuottaminen kuluttaa yhteensä noin 15 000 litraa vettä (Mekonnen & Hoekstra, taulukko 1).

Teollisuudessa vettä käytetään erityisesti energiateollisuudessa. Tämän lisäksi myös kaivosteollisuus käyttää suuria määriä vettä.

3 MAKEAN VEDEN VALMISTUS

Väestönkasvun, lisääntyneen vedenkulutuksen ja kaupungistumisen myötä on vesivarantoihin kohdistuva pistekuormitus kasvanut. Tiheästi asutettujen alueiden vesivarannot joutuvat tulevaisuudessa entistä suuremman rasituksen kohteeksi ja sen vuoksi viime aikoina suosiotaan on kasvattanut makean veden valmistaminen merivedestä.

Makean veden valmistamiseksi (engl. desalination) kutsutaan prosessia, jossa suolaisesta merivedestä tai murtovedestä poistetaan epäpuhtaudet ja taudinaiheuttajat, ja veden Ph-arvo ja kovuus muutetaan sopivaksi.

Makean veden valmistaminen voidaan jakaa yleisesti kolmella eri tavalla. Ensimmäinen luokitteluperiaate perustuu ajatukseen siitä, mitä erotetaan ja mistä. Merivettä voidaan käsitellä joko siten, että suolaisesta vedestä erotetaan itse suola, tai siten, että suolaisesta vedestä erotetaan puhdasta vettä. Valmistustavat voidaan erottaa myös toimintaperiaatteensa mukaan, makean veden valmistaminen voi perustua joko veden höyrystämiseen tai veden suodattamiseen. Kolmas jaottelu perustuu käytettyyn energiaan eli siihen tarvitseeko prosessi toimiakseen mekaanista energiaa vai lämpöä. (Micale et al 2009, 5.)

Tässä työssä makean veden valmistusprosessit jaotellaan tärkeimmän vaiheen eli suolanpoiston toimintaperiaatteen mukaisesti. Termisiksi prosesseiksi kutsutaan prosesseja, joissa suolanpoisto perustuu veden höyrystämiseen ja kalvoprosesseiksi kutsutaan prosesseja, joissa suolanpoisto tapahtuu suodattamalla käsiteltävää vettä puoliläpäisevän kalvon läpi.

Makean veden valmistus on energiaa vaativa prosessi, jonka vaiheita ovat veden esikäsitely, suolanpoisto ja veden jälkikäsitely. Tässä osassa perehdytään makean veden valmistusprosessiin yleisesti.

3.1 Esikäsittely

Ennen kuin käsiteltävä vesi voidaan ohjata varsinaiseen suolanpoistoon, se täytyy esikäsitellä. Esikäsitelyn vaiheisiin vaikuttaa paitsi käsiteltävän veden laatu, myös suolanpoistoon käytettävä menetelmä.

Käsiteltävän veden esikäsitely on tärkeä vaihe koko prosessin toiminnan kannalta, esikäsitelyä vaaditaan, jotta prosessin toiminta ei häiriinny. Esikäsitelyn tarkoituksena on vähentää eloperäisen aineksen aiheuttamaa likaantumista ja liuenneiden aineiden aiheuttamaa karstoittumista. Erityisesti kalvoprosesseissa esikäsitelyn merkitys on suuri, suolanpoistoon tarkoitettu kalvo on hyvin pienijakoinen ja kalvon tukkeutuminen aiheuttaa häiriöitä prosessin toiminnassa. Huonosti esikäsitelty vesi aiheuttaa lyhentynyttä kalvon elinikää, käyttökatkoksia ja korkeita kunnossapitokustannuksia (Prihasto, Liu, Kim 2009, 309). Termiset prosessit ovat rakenteeltaan karkeatekoisempia. Termisissä prosesseissa suolanpoistoon menevä vesi voi sisältää enemmän epäpuhtauksia (Micale et al 2009, 11).

Esikäsitelyssä ensimmäisenä poistetaan suurikokoisin kiintoaines, kuten irtoroska ja kasvit. Suurimmat epäpuhtaudet voidaan poistaa suodattamalla tai seisottamalla käsiteltävää vettä. Suodatus voidaan toteuttaa suodattimella tai vaihtoehtoisesti meren rannalle rakennettavilla kaivoilla. Kaivot eivät kuitenkaan tule kyseeseen, mikäli tarvitaan suuria määriä vettä. Suodatuksen yhteydessä voidaan käyttää lisäksi sakkauttamista. Sakkauttamisessa pienistä partikkeleista saadaan suurempia partikkeleita poistamalla pienten partikkeleiden pinnalta sähkövaraus. Tämä voidaan tehdä lisäämällä käsiteltävään veteen alunaa, kalkkia tai rautasulfaattia. (Prihasto et al 2009, 309.)

Merivesi sisältää mikro-organismeja kuten bakteereja ja levää. Mikäli mikro-organismit pääsevät lisääntymään käsiteltävässä vedessä, voivat ne aiheuttaa pintojen likaantumista ja kalvojen ja suodattimien tukkeutumista. Desinfioinnilla vähennetään levän kasvua ja sen aiheuttamaa likaantumista etenkin yksikön kylmissä osissa kuten syöttöputkissa

(Micale et al 2009, 11). Desinfiointi toteutetaan esimerkiksi ultraviolettisäteilyllä tai otsonoinnilla (Prihasto et al 2009, 310).

Veden happamuutta säätelemällä voidaan vaikuttaa karstoittumiseen. Erityisesti kalsiumkarbonaatti voi kasaantua pinnoille ja suodattimiin. Veden pH-arvoa laskemalla voidaan vaikuttaa kalsiumkarbonaatin liukoisuuteen ja sitä kautta vähentää karstan määrää. Happamuutta voidaan laskea esimerkiksi suolahapolla, rikkihapolla tai hiilidioksidilla. (Prihasto et al 2009, 309.)

Ilmanpoistolla vähennetään lauhtumattomien kaasujen määrää vedessä. Termisissä prosesseissa tämä on edullista, sillä se helpottaa alipaineen pitämistä prosessissa. Lisäksi hiilidioksidin poistaminen vähentää karstoittumista. Ilmanpoistoa ei käytetä kalvoprosesseissa, sillä se vaatii veden lämmittämisen kylläiseen tilaan. Termisissä prosesseissa kiehumisen saattaa lisäksi aiheuttaa vaahtoutumista, tämän estämiseksi veteen lisätään vaahtoutumista estävää ainetta kuten glykolia. (Micale et al 2009, 11.)

3.2 Suolanpoisto

Suolanpoistoksi kutsutaan makean veden valmistuksessa vaihetta, jossa veteen liuenneet suolat ja esikäsitteilyn läpi päässeet epäpuhtaudet poistetaan. Suolanpoisto on merkittävä vaihe koko prosessin kannalta ja se määrittää monia tekijöitä koko prosessista, kuten esikäsitteilyn perusteellisuuden, energiankulutuksen, investointikustannukset ja koko laitoksen koon.

Suolanpoistoon on olemassa monia erilaisia sovelluksia. Useimmat niistä perustuvat veden faasinmuutokseen tai puoliläpäisevän kalvon käyttöön. Yleisimmät faasinmuutokseen perustuvat sovellukset ovat tislaus ja paisuntahaihdutus. Tislauksessa käsiteltävään veteen tuodaan säiliössä lämpöä, mikä aiheuttaa veden höyrystymisen. Höyry tiivistetään takaisin vedeksi ja kerätään talteen. Paisuntahaihdutuksessa lämpö tuodaan veteen jo ennen säiliötä, ja korkeapaineinen vesi ohjataan matalapaineiseen säiliöön, jossa vesi höyrystyy. Höyrystämiseen perustuvat prosessit vaativat toimiakseen

lämpöenergiaa. Käytettävät lämpötilat ovat verrattain matalia, joten niitä voidaan hyödyntää esimerkiksi sähköntuotannon yhteydessä. Hyötysuhteen parantamiseksi yksiköitä käytetään sarjaan kytkettynä. Sarjaan kytketty tislusprosessi on yleisesti tunnettu nimellä MED (Multieffect Distillation) eli monivaiheinen tislus. Vastaavasti sarjaan kytketty paisuntahaihdutukseen perustuva prosessi on nimeltään MSF (Multistage Flash Distillation) eli monivaiheinen paisuntahaihdutus.

Kalvoprosessit perustuvat puoliläpäisevän kalvon käyttöön. Yleisimmin käytössä oleva prosessi on nimeltään käänteisosmoosi. Alan kirjallisuudessa käytetään prosessista yleisesti lyhennettä RO (Reverse Osmosis) tai vaihtoehtoisesti SWRO (Sea Water Reverse Osmosis). Käänteisosmoosissa käsiteltävä vesi paineistetaan ja pakotetaan kalvon läpi väkevämmästä liuoksesta laimeampaan liuokseen. Käänteisosmoosissa käytettävä paine on murtovedellä 15-25 bar ja merivedellä 55-85 bar. (Wang, Chen, Hung, Shammas 2010, 550). Käänteisosmoosi vaatii siis toimiakseen suuren paineen, eli käytännössä prosessi tarvitsee sähköenergiaa.

Muita suolanpoistoon käytettäviä menetelmiä ovat muun muassa haihduttaminen ja veden jäädyttäminen. Haihduttaminen ei ole suuressa mittakaavassa toimiva ratkaisu sen suuren tilantarpeen vuoksi. Lisäksi suolanpoistossa voidaan myös hyödyntää myös sähkökentän aiheuttamaa voimaa, veteen liuenneet partikkelit voidaan poistaa voimakkaalla sähkökentällä. (Chen et al 2010, 540.) Ioninvaihto on höyrykattiloiden syöttöveden valmistukseen käytettävä sovellus, joka ei sovellu juomaveden valmistukseen sen suurten kustannusten vuoksi (Miller 2003, 41).

3.3 Jälkikäsittely

Suolanpoiston jälkeen veden kiintoainepitoisuus on hyvin matala ja siinä ei käytännössä ole lainkaan mineraaleja, joten se täytyy jälkikäsitellä, ennen kuin se voidaan ohjata käyttöön. Jälkikäsitelymenetelmät riippuvat paitsi suolanpoistoprosessin tyypistä, myös veden käyttökohteesta. Veden jälkikäsitely voi sisältää erilaisia kemiallisia käsittelyitä

tai se voidaan toteuttaa sekoittamalla käsitelty vesi valmiiseen juomaveteen. (Chen et al 2010, 532.)

Esikäsitteilyn yhteydessä käsiteltävään veteen on saatettu lisätä happoja karstoittumisen vähentämiseksi. Hapan vesi voi kuitenkin aiheuttaa korroosiota tavallisessa vedenjakeluverkostossa, joten veden pH-arvo täytyy neutralisoida ennen sen jakamista verkostoon.

Rautasulfidin ja happojen käyttö voi aiheuttaa sen, että veteen muodostuu divetyysulfidia. Divetyysulfidi on myrkyllinen ja voimakas hajukaasu, joten se täytyy poistaa käsiteltävästä vedestä (Chen et al 2010, 550).

3.4 Valmistusmäärät

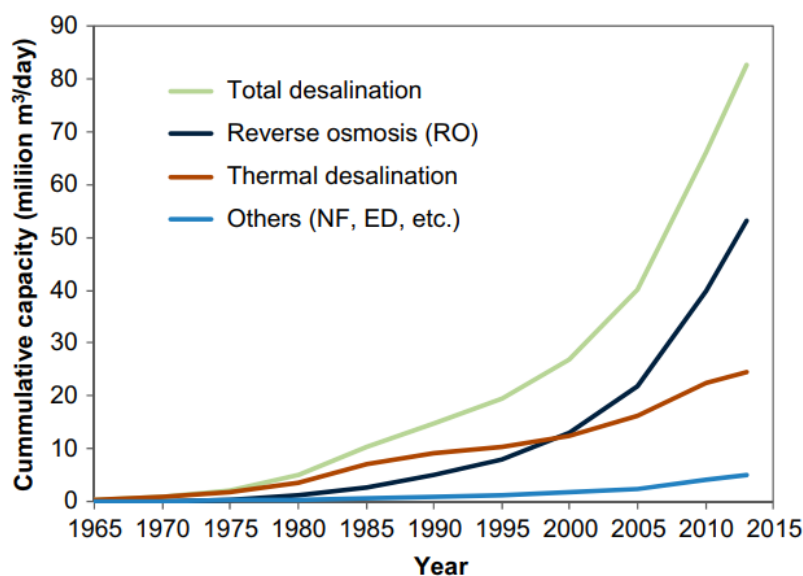
Makean veden valmistusmäärät ovat kasvaneet voimakkaasti viimeisten vuosikymmenien aikana. Kansainvälinen makean veden valmistamiseen ja vesiteknologiaan liittyvän tiedon hallintaan erikoistunut järjestö International Desalination Association julkaisee vuosittain raportin, jossa on eriteltyä makean veden valmistamiseen liittyvää tietoa, ja valtaosa alan kirjallisuudesta käyttää lähteenään kyseisiä raportteja. Raportit ovat kuitenkin maksullisia, joten useimmat valmistusmääriin liittyvät tiedot ovat tässä työssä toissijaisia lähteitä.

Makean veden valmistusmääriin on luonnollista perehtyä asennetun tuotantokapasiteetin avulla. Vuonna 1960 makean veden valmistukseen tarkoitettujen laitosten yhteenlaskettu tuotantokapasiteetti oli alle 2 miljoonaa kuutiota päivässä. Vuoteen 2000 mennessä asennettu kapasiteetti kasvoi noin 30 miljoonaan kuutioon päivässä (Kucera 2014, 13). Tämän jälkeen kasvu on ollut suurta, noin kaksi kolmannesta kaikesta kapasiteetista on asennettu 2000-luvulla. Vuonna 2017 asennetun kapasiteetin määrä oli likimain 100 miljoonaa m³/d (IDA 2017, Water Online).

Ennen vuosituhaten vaihdetta, valtaosa asennetusta kapasiteetista oli veden höyrystämiseen perustuvia prosesseja. 1980-luvulla alkanut puoliläpäisevien kalvojen jatkuva hinnan laskeminen kasvatti kalvoprosessien, pääasiassa käänteisosmoosin suosiota (Ettoney & Wilf 2009, 77). Vuonna 2000 noin puolet valmistuskapasiteetista oli puoliläpäisevien kalvojen käyttöön perustuvia laitoksia. Vuonna 2015 käänteisosmoosiin perustuvien laitosten tuotantokapasiteetti olin jo noin kaksinkertainen termisiin prosesseihin verrattuna (Villacorte et al 2015, 2).

Käänteisosmoosi on siis nykyään eniten käytetty sovellus makean veden valmistamisessa todennäköisesti myös tulevaisuudessa. Water Online -sivuston uutisen mukaan IDA ilmoitti, että vuonna 2017 asennetusta kapasiteetista yhteensä 2,2 miljoonaa m³/d perustui kalvoprosesseihin, kun samana vuonna asennettiin termisiä prosesseja vain 0,1 miljoonaa m³/d. (Water Online).

Termiset prosessit kattavat nykyään noin kolmanneksen kokonaiskapasiteetista. MSF-prosessin määrä on noin kaksinkertainen verrattuna MED-prosesiin (Kucera 2014, 209). Kuvassa 3 on esitetty makean veden valmistukseen asennetun kapasiteetin kehitys vuosina 1965-2015.



Kuva 3. Makean veden valmistusmäärät 1965-2015. (Villacorte et al., 2015).

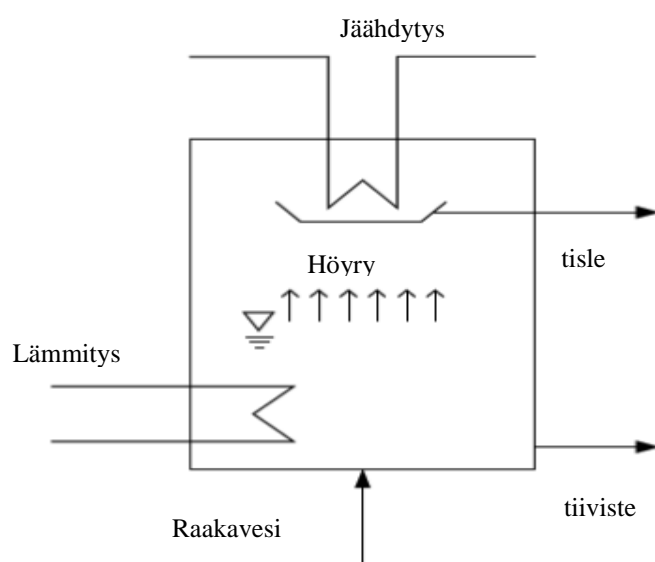
Valmistettu makea vesi kulutetaan pääasiassa juomavedeksi. Vuonna 2014 noin kaksi kolmannesta kaikesta valmistetusta makeasta vedestä käytettiin juomavetenä. Noin kolmannes kului teollisuuden ja energiantuotannon tarpeisiin. (Kucera 2014, 18.)

4 YLEISIMMÄT SOVELLUKSET

Makean veden valmistukseen asennetusta kapasiteetista noin kaksi kolmannesta on käänteisosmoosilaitoksia. Kolmannes asennetusta kapasiteetista taas perustuu käsiteltävän veden höyrystämiseen eli ne ovat termisiä prosesseja. Termisistä prosesseista noin kolmasosa on MED-prosesseja ja loput MSF-prosesseja. Työn tässä osassa perehdytään tärkeimpien suolanpoistoprosessien toimintaan.

4.1 MED – multi-effect distillatio

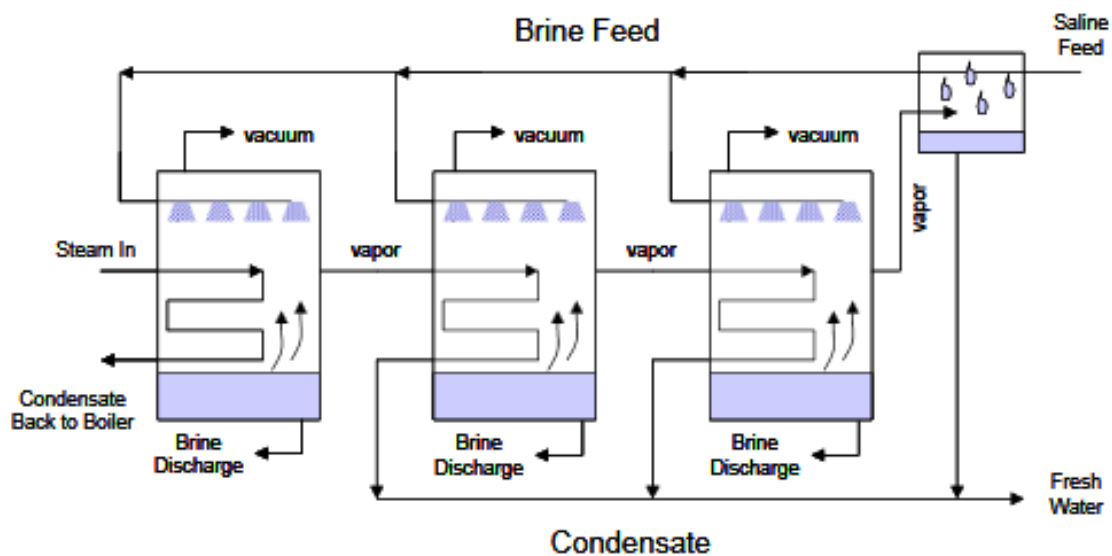
Multi-effect distillation eli monivaiheinen tislauksen perustuu käsiteltävän veden höyrystämiseen. Lämmöntuonti tapahtuu höyrystämiskammiossa, jossa raakavesi ruiskutetaan lämpöpintaa vasten, jota lämmitetään höyryllä. Lämpöpinta on tyypillisesti vaaka- tai pystysuunnassa oleva putkipaketti (Chen et al 2010, 535). Höyrystynyt vesi tiivistyy tisleeksi kylmää lämpöpintaa vasten ja tisle kerätään talteen. Lämmönlähteenä tislauksyksikössä voidaan käyttää esimerkiksi lauhdevoimalaitoksen matalapaineista höyryä. Kuvassa 4 on esitetty periaatekuva yksittäisen tislauksyksikön toiminnasta.



Kuva 4. Tislauksyksikkö. (Kucera 2014, 57.)

Mikäli yksikköön tuleva raakavesi on esilämmitetty kylläiseen tilaan ja oletetaan häviöt pieniksi, voidaan havaita, että höyrystämiseen kulunut lämpö siirtyy kokonaan jäähdysteeseen. Todellisessa prosessissa yksikköön tuleva vesi on suolaista ja se täytyy esilämmittää kylläiseen tilaan. Suolapitoisuuden vuoksi kiehumispiste on korkeampi kuin puhtaan veden. Myöskin suurin mahdollinen tisleen määrä on riippuvainen veden suolapitoisuudesta, suolanpoistoyksiköstä tuleva tiiviste ei saisi olla liian suolapitoista, jotta vältettäisiin suolan aiheuttama karstoittuminen.

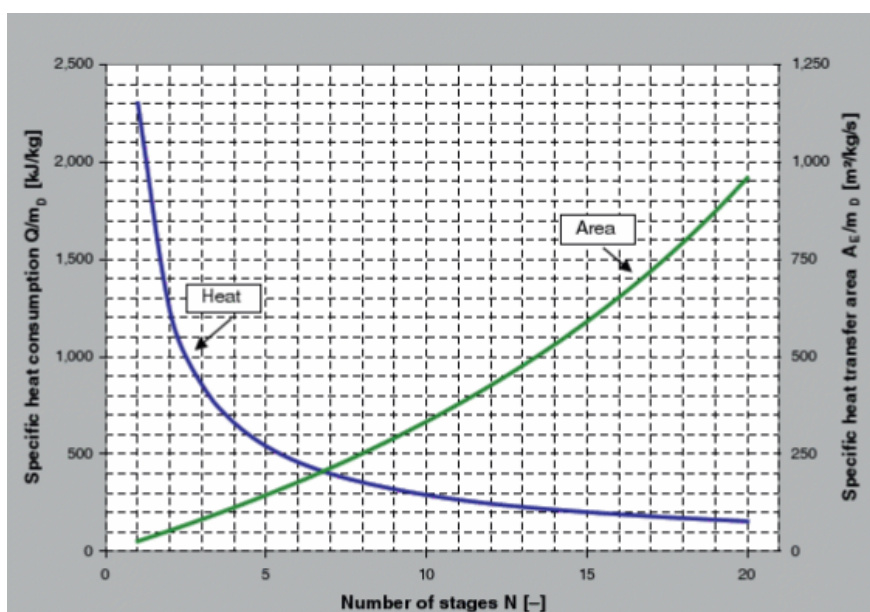
Suolanpoistolaitoksen ominaisenergiankulutusta voidaan pienentää hyödyntämällä tisleen tiivistymisestä talteen otettu lämpö. Tämä voidaan tehdä yhdistämällä kuvan 4 kaltaisia tislauksyksiköitä siten, että edellisen yksikön talteen otettu lämpö käytetään seuraavan yksikön raakaveden höyrystymiseen. Ensimmäisen kammion höyry tiivistyy siis vasta seuraavassa kammiossa (Kuva 5).



Kuva 5. MED-prosessi (Miller 2003, 18)

MED-laitoksessa ensimmäiseen yksikköön tuodaan ulkoisesti lämpöä ja muut yksiköt toimivat edellisten lämmöllä. Tällaisen laitoksen ominaisenergiankulutus siis laskee voimakkaasti, mikäli yksiköiden määrää lisätään. Häviöiden vuoksi seuraavan yksikön

höyrystämiskammion lämpötila on edellistä kammiota matalampi, joten myös höyrystämiskammion paineen on oltava pienempi. Veden höyrystymislämpö kasvaa paineen laskiessa eli jos prosessiin ei seuraavien vaiheiden aikana tuoda lisää lämpöä, täytyy lämmönsiirtopinta-alaa kasvattaa. Yksiköiden määrää siis rajoittaa lämmönsiirtopinta-alan kasvattamisen tuomat lisääntyneet investointikustannukset. Kuvassa 6 on havainnollistettu ominaisenergiankulutuksen ja tarvittavan lämmönsiirtopinta-alan määrä tislauksyksiköiden lukumäärän perusteella.



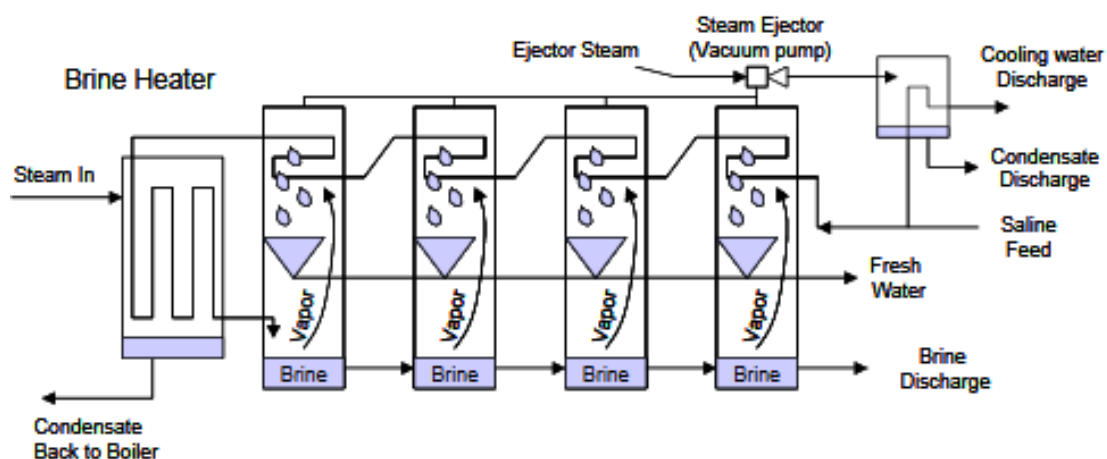
Kuva 6. MED-laitoksen ominaisenergiankulutus ja ominaislämmönsiirtopinta-ala tislauksyksiköiden lukumäärän funktiona. (Kucera 2014, 69.)

MED-prosessissa veden höyrystyminen tapahtuu lämpöpintaa vasten, joten karstoittuminen on MED-prosessissa vakavampi ongelma, kuin MSF-prosessissa, jossa vesi höyrystyy saapuessaan matalapaineiseen tilaan (Micale et al 2009, 11.) Karstoittumisen vähentämiseksi tyypillinen lämpötila on alle 70 °C. Matalat lämpötilat mahdollistavat prosessin hyödyntämisen sähköntuotannon yhteydessä. Tyypillisesti MED-laitoksessa vaiheiden määrä on enimmillään 12 vaihetta, jolloin viimeisen vaiheen lämpötila on noin 30-40 °C (Ettoney 2009, 25.)

MED-prosessien yleistyminen alkoi 1950-luvulla, jolloin yksittäisen laitoksen tuotantokapasiteetti oli alle 500 m³/d. Laitosten koot ovat kasvaneet paljon, nykyään MED-laitosten tyypillinen tuotantokapasiteetti on jopa 36 000 m³/d. (Ettoney & Wilf 2009, 81.) MED-laitoksen energiankulutus on 15 kWh/m³. (Al-Sahali & Ettoney 2006, 228).

4.2 MSF – monivaiheinen paisuntahaihdutus

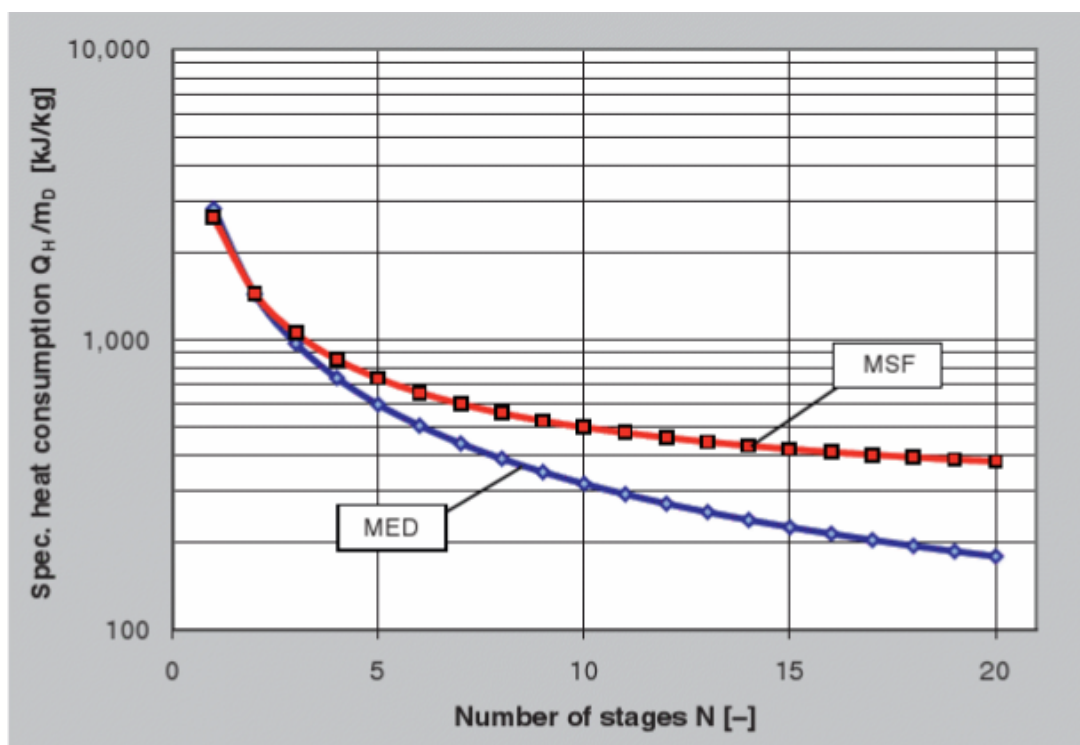
MSF-prosessi on suolanpoistoon käytettävä sovellus, joka on kehitetty 1950-luvulla (Chen et al 2011, 534). Prosessi koostuu useista sarjaan kytketyistä tislauksyksiköistä, joista jokaisesta saadaan MED-prosessin tapaan tuotteena puhdasta vettä. Toisin kuin MED-prosessissa, jossa höyrystyminen tapahtuu tislauksyksikössä kuumaa lämpöpintaa vasten, MSF-prosessissa lämpö tuodaan käsiteltävään veteen jo ennen tislauksyksikköä. MSF-prosessi hyödyntää toiminnassaan paisuntahaihdutusta. Paisuntahaihdutuksessa kylläisessä tilassa oleva neste ajetaan matalaan paineeseen ja neste höyrystyy. Kuvassa 7 on esitetty MSF-prosessin toimintaperiaate. Huomionarvoinen seikka on se, että MSF-prosessissa höyrystyminen ja tiivistyminen tapahtuvat samassa yksikössä, ja tiivistymisessä vapautuva lämpö käytetään raakaveden lämmittämiseen.



Kuva 7. MSF-prosessi (Miller 2003,18)

Kuvasta 7 voidaan havaita myös, että tislauksyksikössä jäljelle jäävä tiiviste siirtyy seuraavaan tislauksyksikköön. Tämä tarkoittaa sitä, että veden esikäsitteilykustannukset ovat pienemmät mutta käsiteltävän veden suolapitoisuus kasvaa ja tämä saattaa aiheuttaa karstoittumista ja prosessin tehokkuuden alenemista. Suurissa MSF-yksiköissä tislauksyksikön jälkeen tiivisteeseen sekoitetaan esikäsiteltyä vettä, jotta suolapitoisuus prosessin loppupäässä ei kasva liian suureksi ja karstoittumisen ja korroosion aiheuttamat ongelmat jäävät kohtuullisiksi. (Chen et al. 2011, 535).

MSF-laitos on energiatehokkuudeltaan hieman huonompi kuin MED-laitos, prosessi kuluttaa energiaa 18 kWh tuotettua vesikuutiota kohti. (Al-Sahali & Ettoney 2006, 228). Kuvassa 8 on havainnollistettu ominaisenergiankulutuksen pieneneminen tislauksyksiköiden lukumäärän perusteella.

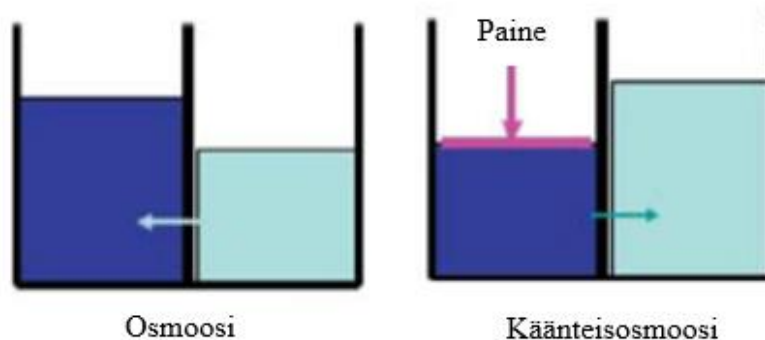


Kuva 8. MED- ja MSF-laitosten ominaisenergiankulutus tislauksyksiköiden lukumäärän perusteella. (Kucera 2014, 88.)

Tyypillisen MSF-laitoksen tuotantokapasiteetti on nykyään 50 000-75 000 m³/d, tislauksyksiköiden lukumäärä on 20-24 ja toimintalämpötila 105-115 °C (Ettoney & Wilf 2009, 86). MSF-laitosten etuna on niiden yksinkertaisesta toimintaperiaatteesta johtuva toimintavarmuus ja pitkä käyttöikä, laitoksen käyttöikä voi olla 40 vuotta. (Al-Sahali & Ettoney 2006, 228). MSF-laitoksia on käytössä lähinnä Persianlahden maissa (Ettoney & Wilf, 85).

4.3 RO – käänteisosmoosi

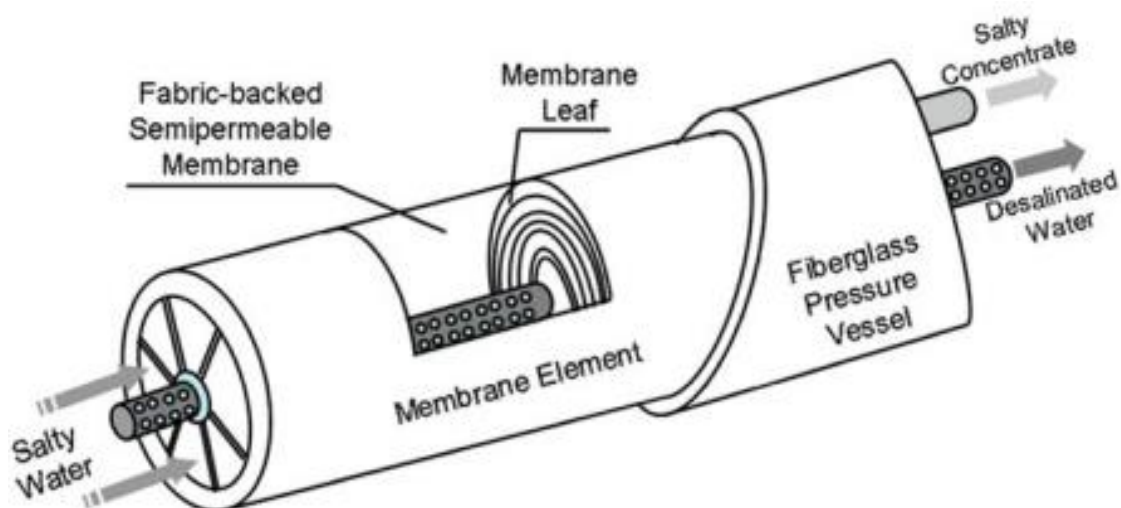
Osmoosi on luonnollinen prosessi, jossa neste virtaa puoliläpäisevän kalvon läpi. Nesteen virtaamisen ja virtauksen suunta riippuu kemiallisesta potentiaalista, joka on paineen, lämpötilan ja konsentraation funktio. Jos nesteen konsentraatio kasvaa, sen kemiallinen potentiaali alenee. Mikäli puoliläpäisevän kalvon toisella puolella on suolaista vettä ja toisella puolella puhdasta vettä, kemiallinen potentiaali pyrkii tasautumaan ja neste siirtyy laimeammasta liuksesta väkevämpään liukseen. Kemiallista potentiaalia voidaan kasvattaa painella. Kun suolaiseen nesteeseen lisätään painetta, sen kemiallinen potentiaali kasvaa. Tasapainotila saavutetaan, kun väkevästä liuksesta siirtyy nestettä laimeampaan liukseen. (Kucera 2014, 158.) Tällaista prosessia kutsutaan käänteisosmoosiksi. Osmoosin ja käänteisosmoosin ero on havainnollistettu kuvassa 9.



Kuva 9. Osmoosi ja käänteisosmoosi. (Kucera 2014, 158.)

Käänteisosmoosilaitosten asennusmäärät ovat kasvaneet voimakkaasti 1980-luvulta lähtien ja laitostyyppi on nykyisin yleisimmin käytetty. Tämä johtuu kalvotekniikan parantumisesta ja siitä seuranneesta voimakkaasta kalvojen hinnan laskusta. Esimerkiksi vuosina 1980-2000, kalvojen suorituskyky parani 100-kertaiseksi ja hinta tippui kymmenyksen (Fane, Wang & Jia 2011, 21).

Kaupallisesti käytössä olevat kalvot ovat polymeerikalvoja, joiden paksuus on kahden mikrometrin luokkaa. Tämän lisäksi kalvoissa on tukikerros, koko kalvo on 0,15-0,20 mm paksu. Kalvojen käyttöikä suolanpoistossovelluksissa on 5-10 vuotta. (Kucera 2014, 167.) Kalvoista tehdään elementtejä, joissa kalvon pinta-ala tilavuutta kohti voi olla jopa tuhansia neliöitä kuutiota kohden (Fane, Wang & Jia 2011, 3). Yleisimmin käytetty moduulityyppi on putkimainen moduuli eli Spiral-Wound Module, SWM (Curcio & Drioli, 2009). Kuvassa 10 on esitetty tyypillinen putkimainen käänteisosmoosielementti, johon johdetaan vettä putken ulointa kerrosta pitkin. Korkeapaineinen vesi läpäisee kalvokerrokset, ja elementin keskustasta johdetaan ulos puhdasta vettä. Tyypillisesti elementin paksuus on 20 cm ja pituus voi vaihdella (Ettoney & Wilf 2009, 91).



Kuva 10. Käänteisosmoosielementti. (Fane, Wang & Jia 2011, 3.)

Suolanpoistolaitoksessa elementtejä on useampia ja ne ovat rinnan kytketty. Matalamman kiintoainepitoisuuden saavuttamiseksi elementtejä voi olla myös sarjaan kytkettynä. Käänteisosmoosilla käsitellyn veden kiintoainepitoisuus on 200-500 ppm (Micale et al. 2011, 13). Tämä on juomavedelle riittävän matala pitoisuus, joten SWRO-yksiköt ovat lähes poikkeuksetta yksivaiheisia (Ettoney & Wilf 2009, 91). Jäljelle jäävä tiiviste on korkeapaineista ja se voidaan johtaa energian talteenottojärjestelmän läpi. Energian talteenotolla varustetun laitoksen hyötysuhde voi olla jopa 95% (Miller 2003 ,9).

Esikäsitellyn merkitys on käänteisosmoosilaitoksissa suuri, esikäsitellyn osuus koko tuotannon kuluista voi olla jopa 30-40 % (Micale et al. 2009, 12). Kalvot ovat herkkiä likaantumiselle, ja perinpohjaisella esikäsitelyllä pyritään pidentämään kalvojen käyttöikä. Käänteisosmoosilaitoksilla käytetään perinteisten esikäsitelymenetelmien, kuten sakkauttamisen, kerrostamisen ja desinfioinnin sijaan tai lisäksi eritasoisia kalvosuodatuksia. (Fane et al. 2011, 22.)

Käänteisosmoosilaitosten energiankulutus on laskenut voimakkaasti kalvojen kehittymisen myötä. Nykyisin energiankulutus voi olla alle 3 kWh/m³. Teoreettisesti pienin suolanpoistoon tarvittava energiamäärä 25-asteiselle merivedelle (35 000 ppm) on noin 0,9 kWh/m³, joten kalvojen kehitys alkaa hidastua (Zarzo & Prats 2018, 2).

4.4 Sovellusten vertailu

Tässä osassa vertaillaan aiemmin esiteltyjä yleisimpiä suolanpoistoon käytettäviä sovelluksia.

Merkittävimpiä tekijöitä makean veden valmistuksessa on energiankulutus. Termiset prosessit kuluttavat enemmän energiaa tuotettua vesimäärää kohti. MSF-prosessi kuluttaa eniten, noin 18 kWh/m³ kun taas MED-prosessi kuluttaa 15 kWh/m³. Käänteisosmoosin energiankulutus voi olla matalimmillaan alle 3 kWh/m³ Termisten prosessien käyttämä energia on pääasiassa lämpöä, kun taas käänteisosmoosi kuluttaa sähköä. Suuresta energiankulutuksestaan huolimatta termisten prosessien käyttö voi olla perusteltua,

mikäli käytössä on halpaa lämpöenergiaa, esimerkiksi höyryvoimalaitosten matalapaineista höyryä. Myös aurinkolämmön käyttö voisi olla mahdollista tulevaisuudessa.

Energiasta aiheutuvat kulut ovat noin 30-50 % tuotetun veden hinnasta. (Miller et al. 2015, 4). Laitosten investointi- ja käyttökustannukset vaihtelevat kapasiteetin ja käsiteltävän veden laadun mukaan. Erityisesti käänteisosmoosilaitoksilla on kustannusetu, kun käsiteltävän veden kiintoainepitoisuus on matala. Taulukossa 1 on esitetty investointi- ja käyttökustannuksien suuruuksia eri laitoksille.

Taulukko 1. MSF- MED- ja RO-prosessien investointi- ja käyttökustannukset (Chen et al. 2011, 530.)

	Investointikustannukset [USD/m ³ /d]	Käyttökustannukset [USD/m ³]
MSF	1200-3000	0,7-1,5 (yhteistuotanto)
MED	1000-3900	0,4-1,5 (yhteistuotanto)
RO	500-1200 (murtovesi)	0,2-1,2 (murtovesi)
	1000-2500 (merivesi)	0,2-1,7 (merivesi)

MED-laitos on tavallisesti kalliimpi rakentaa kuin MSF-laitos, koska rakenne on monimutkaisempi. (Kucera, 2014, 88).

Prosessin valinta riippuu käytettävän veden laadusta ja halutusta tuotantokapasiteetista. Käänteisosmoosi murtovedellä kustannustehokas valinta riippumatta kapasiteetista. Korkeammalla suolapitoisuudella termiset prosessit ovat kustannustehokkaampia. MSF-

prosessi on parempi valinta yli 25 000 m³/d laitoksille, sitä pienemmille MED-laitos on perusteltu valinta. Suuremmilla yksiköillä investointikustannukset ovat suhteellisesti pienemmät, mutta käyttökustannukset eivät merkittävästi muutu. On siis suotavaa rakentaa ennemmin suuria laitoksia kuin useita pienempiä. (Chen et al. 2011, 529.)

Prosessin valintaan vaikuttaa myös käytettävissä oleva energia. Esimerkiksi Persianlahden maissa on pitkät perinteet termisten prosessien käytöstä, mikä selittyy pitkälti halvalla energialla.

Kustannusten lisäksi nykyaikana yhä merkittävämpi piirre teknisissä sovelluksissa on niiden aiheuttama ympäristökuormitus. MED-, MSF- ja RO-laitoksista tehdyn elinkaarianalyysin mukaan (Raluy, Serra, Uche 2006) käänteisosmoosilla toimivien laitosten kuormitus ympäristölle on huomattavasti pienempi kuin termisten laitosten. Termisiä prosesseja voidaan kuitenkin käyttää yhteistuotannossa jo olemassa olevien höyryvoimalaitosten kanssa. Elinkaarianalyysin mukaan yhteistuotannolla voidaan vähentää päästöjä 77% MSF-laitoksilla ja 84% MED-laitoksilla. Käänteisosmoosilla toimivan laitoksen ympäristökuormitus on erittäin pieni, mikäli laitoksessa käytettävä energia on uusiutuvaa. Taulukossa 2 on esitetty eri tuotantolaitosten päästöt tuotettua vesikuutiota kohden.

Taulukko 2. Eri sovellusten päästöt tuotettua vesikuutiota kohti. Tiedot: Raluy et al. 2006.

	MSF	MSF	MED	MED	RO	RO
		yhteistuotanto		yhteistuotanto		vesivoima
CO ₂ [kg/m ³]	23,41	1,96	18,05	1,11	1,78	0,08
NO _x [g/ m ³]	28,3	4,29	5,85	2,42	3,87	0,23
SO _x [g/ m ³]	27,91	14,80	26,48	16,11	10,68	1,73

Suolanpoiston muita ympäristöhaittoja ei täysin tunneta. Takaisin mereen johdettavan tiivisteiden kiintoainepitoisuus on noin 3-5 kertaa suurempi kuin meriveden ja se saattaa sisältää esikäsitellyssä käytettyjä aineita kuten karstoittumisenestoaineita ja happoja (Chen et al 2011, 553).

5 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tehdä tiivistelmä makean veden valmistuksesta. Tarkoituksena oli selvittää yleisimmät makean veden valmistukseen käytettävät menetelmät ja vertailla niitä keskenään.

Makean veden kulutus on viimeisen sadan vuoden aikana kasvanut noin kaksi kertaa nopeammin kuin maapallon väkiluku. Lisääntynyt vedenkulutus yhdistettynä väestönkasvuun ja kaupungistumiseen ovat aiheuttaneet pistekuormitusta vesivarantoihin.

Makean veden valmistusmäärät ovat kasvaneet eksponentiaalisesti 1960-luvulta lähtien. Yhteenlaskettu valmistuskapasiteetti oli vuonna 2017 noin 100 miljoonaa m³/d, josta noin 70 % on asennettu tällä vuosituhannella.

Makean veden valmistus on energiaa vaativa prosessi, joka koostuu esikäsittelystä, suolanpoistosta ja jälkikäsittelystä. Esikäsittelyn tarkoituksena on pienentää kunnossapitokustannuksia ja varmistaa tuotannon jatkuvuus. Suolanpoiston perusteella valmistus jaetaan termisiin prosesseihin, jotka perustuvat faasinmuutokseen ja kalvoprosesseihin, jotka perustuvat puoliläpäisevän kalvon käyttöön. Jälkikäsittelyssä käsiteltävä vesi neutraloidaan.

Termiset prosessit perustuvat veden höyrystämiseen. Energiatehokkuuden parantamiseksi laitoksissa on useita sarjaan kytkettyjä tislauksyksiköitä. MED-prosessissa höyrystyminen tapahtuu kuumaa lämpöpintaa vasten, MSF-prosessissa höyrystyminen tapahtuu paineen alenemisen seurauksena. Prosessit toimivat noin 100 °C:n lämpötilassa, joten niitä voidaan hyödyntää yhteistuotannossa. Prosessit ovat kustannustehokkaita erittäin suolaiselle vedelle. MSF-laitosten yhteenlaskettu kapasiteetti on noin kaksinkertainen verrattuna MED-laitoksiin. Tämä johtuu siitä, että laitosten koot ovat kasvaneet, ja MSF-laitokset ovat kustannustehokkaampia suuressa koossa. MSF-laitosten ominaisenergiankulutus on suurempi, mutta niiden yksinkertaisemmasta rakenteesta seuraa parempi toimintavarmuus, pitkät käyttöiät ja pienet kunnossapitokustannukset.

Käänteisosmoosi on suolanpoistoon käytetty kalvoprosessi, jossa suolainen vesi pakotetaan puoliläpäisevän kalvon läpi. Käänteisosmoosi on eniten käytetty sovellus makean veden valmistamiseen ja se on erityisen soveltuva murtoveden käsittelyyn. Nykyään noin kaksi kolmannesta asennetusta kapasiteetista on käänteisosmoosilaitoksia. Suosioon on syynä pienet kustannukset ja matala energiankulutus. Käänteisosmoosilaitosten ympäristökuormitus on pienin, etenkin jos käytettävä energia on peräisin uusiutuvista energianlähteistä. Valtaosa uusista laitoksista on käänteisosmoosilaitoksia.

Suolanpoistoprosessin valinta riippuu käsiteltävän veden laadusta, saatavilla olevasta energiasta ja laitoksen halutusta kapasiteetista. Käänteisosmoosilla on selkeä etu murtoveden käsittelyssä, kun taas termiset prosessit ovat kustannustehokkaita suolaisen meriveden käsittelyyn. Käänteisosmoosilaitokset vaativat perusteellisemmän esikäsittelyn kuin MSF- ja MED-laitokset.

6 LÄHDELUETTELO

Al-Sahali M, Ettoney H. 2006. Developments in thermal desalination processes: Design, energy and costing aspects. Julkaistu lehdessä: Desalination 234 (2007), s. 224-240. ISSN 0011-9164. doi.org/10.1016/j.desal.2006.08.020

Boyd C. E., 2015. Dissolved solids. In: Water Quality, Springer, Cham. 352 s. ISBN 978-3-319-17445-7

Chen J.P., Wang L.K., Yang L., Zheng YM., 2011. Desalination of Seawater by Thermal Distillation and Electrodialysis Technologies. Teoksessa: Wang L.K., Chen J.P., Hung YT., Shammass N.K. (eds) Membrane and Desalination Technologies. Handbook of Environmental Engineering, vol 13. Humana Press, Totowa, NJ. Sivut 525-558. ISBN: 978-1-58829-940-6

Ettouney H. (2009) Conventional Thermal Processes. In: Micale G., Rizzuti L., Cipollina A. (eds) Seawater Desalination. Green Energy and Technology. Springer, Berlin, Heidelberg. s. 17-40. ISBN 978-3-642-01149-8

Ettouney H., Wilf M. (2009) Commercial Desalination Technologies. Teoksessa: Micale G., Rizzuti L., Cipollina A. (eds) Seawater Desalination. Green Energy and Technology. Springer, Berlin, Heidelberg. s. 77-107. ISBN 978-3-642-01149-8

Mekonnen Mesfin M., Hoekstra Arjen Y., 2012. A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. Ecosystems, 2012, 15:401. Springer-Verlag. ISSN 1432-9840.

Micale G., Rizzuti L., Cipollina A., 2009. Seawater Desalination. Green Energy and Technology. Springer, Berlin, Heidelberg. 303 s. ISBN 978-3-642-01149-8.

Miller J. E., 2003. Review of Water Resources and Desalination Technologies. New Mexico: Sandia National Laboratories. 53 s. SAND 2003-0800.

Miller Sydney, Shemer Hilla, Semiat Raphael 2015. Energy and environmental issues in desalination. Julkaistu lehdessä: *Desalination* 366 (2015), s. 2-8. ISSN 0011-9164. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.11.034>.

Kucera Jane, 2014. *Desalination: Water from Water*. Beverly, Massachusetts: Scrivener Publishing LLC. 624 s. ISBN 978-1-118-20852-6.

Raluy Gemma, Serra Luis, Uche Javier, 2006. Life cycle assessment of MSF, MED, and RO desalination technologies. *CIRCE – Department of Mechanical Engineering, University of Zaragoza, Zaragoza, Espanja*. Lehdessä: *Energy* 31, (2006), s. 2361-2372. doi:10.1016/j.energy.2006.02.005

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2015. *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. New York: United Nations. 493 s. (ST/ESA/SER.A/366).

Villacorte, Loreen & Alizadeh Tabatabai, S. Assiyeh & Dhakal, Nirajan & Amy, Gary & Schippers, Jan & Kennedy, Maria. (2015). Algal blooms: an emerging threat to seawater reverse osmosis desalination. *Desalination and water treatment*. 55. 2601-2611. 10.1080/19443994.2014.940649.

World Health Organization, 2003. Total dissolved solids in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Geneve, Sveitsi. WHO/SDE/WSH/03.04/16.

Zarzo Domingo & Prats Daniel 2018. Desalination and energy consumption. What can we expect in the near future?, Julkaistu lehdessä: *Desalination* 427, (2018), s. 1-9. ISSN 0011-9164. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.046>.