

KANDIDAATINTYÖ

2024

Aino Savusalo

Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden korkeakoulu
Energia- ja konetekniikka

Aino Savusalo

**Siirtymä kestäviin kemianteollisuuden prosesseihin sähköistämällä:
Ammoniakin tuotannon ja höyrykrakkauksen näkökulma**

Kandidaatintyö

[30.8.2024]

Työn ohjaaja:

Vanhempi yliopistolehtori Henrik Holmberg
Sophia Havulinna DI

AALTO-YLIOPISTO
INSINÖÖRITIEDEIDEN KORKEAKOULU
PL 13000
00076 AALTO

TEKNIIKAN KANDIDAATINTYÖN
TIIVISTELMÄ

Tekijä: Aino Savusalo

Työn nimi: Siirtymä kestäviin kemianteollisuuden prosesseihin sähköistämällä: ammoniakkin tuotannon ja höyrykrakkauksen näkökulma

Tutkinto-ohjelma: Energia- ja konetekniikka

Päiväys: 30.08.2024

Sivumäärä: 23

Vastuunopettaja: Vanhempi yliopistolehtori Kari Alanne

Ohjaajat: Vanhempi yliopistolehtori Henrik Holmberg
ja Sophia Havulinna DI

Kieli: suomi

Ammoniakin tuotanto ja höyrykrakkaus ovat merkittäviä prosesseja kemiantekniikassa, mutta ne ovat hyvin energiantensiivisiä prosesseja ja tuottavat merkittävästi hiilidioksidipäästöjä. Tämä työ käsittelee millaisilla sähköistävillä teknologioilla ammoniakkin tuotannosta ja höyrykrakkauksesta voidaan tehdä kestävämpiä. Työssä käsitellään myös olemassa olevia hankkeita, jotka soveltavat sähköistäviä teknologioita.

Avainsanat: kemianteollisuus, ammoniakki, vety, höyrykrakkaus, sähköistäminen

Sisällysluettelo

	Tiivistelmä.....	ii
1	Johdanto	1
2	Nykytilanne	3
2.1	Ammoniakin tuotanto	4
2.2	Höyrynrakkaus	5
3	Kemianteollisuuden sähköistäminen.....	8
3.1	Korvaavat teknologiat ammoniakintuotannossa	8
3.1.1	Korvaavat hankkeet ammoniakintuotannossa	10
3.2	Korvaavat teknologiat höyrynrakkauksessa.....	12
3.2.1	Korvaavat hankkeet höyrynrakkauksessa	13
4	Haasteet.....	20
5	Yhteenveto	22
6	Viitteet	23

Lyhenteet

Atm	Maapallon ilmanpaineen suurin paine meren tasolla n. 101325 Pascalia
BEDP	Basic engineering and design package
GJ/t	Gigajoulea per 1 tonni lähtöainetta
HB	Haber-Bosch
IEA	International Energy Agency
Li-NRR	Lithium mediated nitrogen reduction reaction
LPG	Liquified petroleum gas
MW	Megawatti
NO _x	Typenoksidi
PEM	Proton exchange membrane electrolysi
RDR	RotoDynamic Reactor
SMR	Steam methane reforming
TRL	Technology readiness level

1 Johdanto

Kemianteollisuus on yhteiskunnan teollistumisen jälkeen toiminut yhtenä pilareista, jotka ovat edistäneet ihmisten elintasoja. Kemianteollisuus tuottaa raaka-aineita lukemattomien tuotteiden valmistusta varten ja on siten osana jokapäiväistä elämäämme. Polttoaine, jolla ajoneuvot kulkevat, kosmetiikan lukuisat ainesosat, lääkkeet, lannoitteet ja ruokien säilöntäaineet ovat vain muutama esimerkki kemianteollisuuden tuotteista. Kemianteollisuuden hyödyistä huolimatta, se on myös osa yhteiskuntamme suurinta ongelmaa, kasvihuonekaasupäästöjä.

Siirtyminen kestäviin energiasysteemeihin on osoittautunut nykypäivän yhdeksi suurimmista haasteista, ja sen merkitys ilmastonmuutoksen ehkäisyssä ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä on suuri. Monien kasvihuonepäästöjä aiheuttavien sektorien joukossa kemianteollisuudella on merkittävä rooli korkean energiankulutuksen vuoksi. Vuonna 2021 teollisuus tuotti 18,9% koko maailman hiilidioksidipäästöistä. Josta noin 14% on peräisin kemianteollisuudesta. Kemianteollisuudessa prosessilämpö on suuri hiilidioksidipäästöjen tuottaja, mutta myös prosessien lähtöaineet. Perinteisesti tämä prosessilämpö tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, kuten hiilellä, öljyllä ja maakaasulla, jotka ovat suurimmat hiilidioksidipäästöjen aiheuttajat maailmanlaajuisesti[2]. Toisaalta kemianteollisuudessa esimerkiksi maakaasu on myös yleinen lähtöaine prosesseissa, eikä pelkästään polttoaine. Kun maailma pyrkii irtautumaan hiilestä, nousee kemianteollisuuden sähköistäminen mahdolliseksi strategiaksi tämän edistämiseksi.

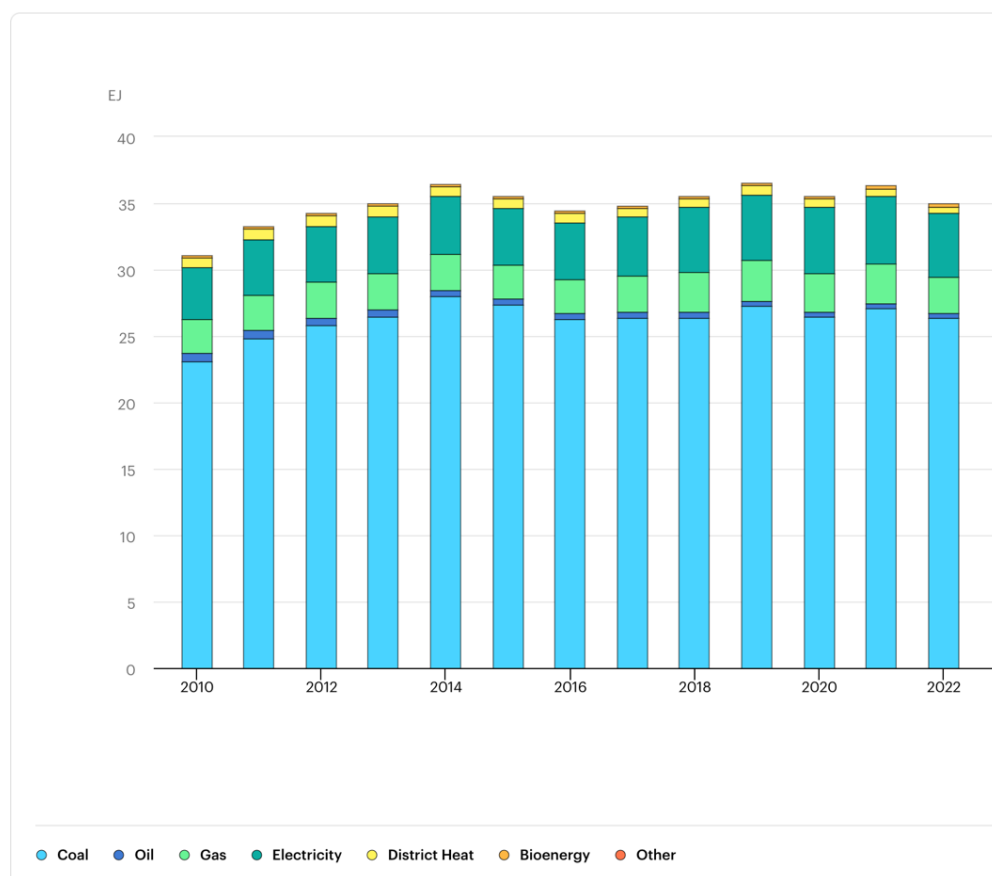
Tässä kontekstissa sähköistäminen tarkoittaa perinteisten fossiilisilla polttoaineilla toimivien prosessilaitteistojen korvaamista sähköllä toimivilla vaihtoehdoilla. Esimerkkejä tällaisista sähköisistä vaihtoehdoista ovat sähkökattilat, sähköiset prosessiuunit ja elektrolyysit. Kaikkia näitä teknologioita voidaan käyttää päästöttömällä sähköllä, joka antaa niille suuren potentiaalín muuntaa kemianteollisuutta kestävämpään suuntaan. Tämän muutoksen toteuttaminen ei kuitenkaan tule olemaan haasteetonta, sillä siihen liittyy merkittäviä investointikustannuksia niin teollisuudelle kuin valtioillekin mahdollisten infrastruktuurimuutosten vuoksi.

Tämä opinnäytetyö käsittelee kahden kemianteollisuuden prosessin sähköistämistä. Nämä prosessit ovat ammoniakín tuotanto ja höyrynkraukkaus. Tavoitteena on

analysoida sähköistämisen mahdollisia hyötyjä, haasteita ja teknologioita. Työ alkaa kemianteollisuuden sekä ammoniakin tuotannon ja höyrykrakkauksen nykytilanteen tarkastelulla kappaleessa 2, mukaan lukien nykyisin käytössä oleva teknologia ja fossiilisten polttoaineiden rooli kemianteollisuudessa. Luvussa 2.1 syvennyttään spesifimmin ammoniakin tuotantoprosessiin ja luvussa 2.2 puolestaan höyrykrakkaukseen. Seuraavaksi käsitellään mahdollisia teknologioita, joita voitaisiin hyödyntää tulevaisuudessa, sekä olemassa olevia hankkeita luvussa 3. Lukuun 3 sisältyy alaluvut 3.1 ja 3.2 jotka käsittelevät erikseen ammoniakin tuotantoa ja höyrykrakkausta. Viimeisenä luvussa 4 käsitellään kemianteollisuuden sähköistämisessä kohdattavia haasteita ja miten ne vaikuttavat sähköistämisen toteuttamiseen laajemmalla tasolla.

2 Nykytilanne

Kemikaalit ovat osa jokapäiväistä elämäämme, ja niiltä on vaikea välttyä. Kemianteollisuus on kaikista teollisuuden aloista suurin energian kuluttaja, ja tuottaa kolmanneksi eniten hiilidioksidipäästöjä[3]. Suuret päästöt kemianteollisuudesta ovat peräisin fossiilisten polttoaineiden hyödyntämisestä. Fossiilisia polttoaineita hyödynnetään kemianteollisuudessa sekä raaka-aineena, että prosessilämmön tuotannossa. [3]



Kuva 1 Prosessilämmön tuotanto kemianteollisuudessa[4]

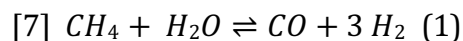
Yllä oleva kuva 1 kuvaa, millä prosessilämpö tuotetaan kemianteollisuudessa ja mitkä ovat eri tuotantotapojen osuudet[4]. Kuten taulukosta nähdään, suurin osa kemianteollisuuden prosessilämmöstä tuotetaan hiilellä, öljyllä tai maakaasulla.

Tässä luvussa paneudutaan kahteen kemianteollisuuden prosessiin, joiden sähköistämismahdollisuuksia tämä työ käsittelee. Työ keskittyy ammoniakin tuotantoon ja höyrykrakkaukseen, sillä ne ovat merkittäviä kemianteollisuuden prosesseja, sillä niiden tuotanto on kasvanut merkittävästi viimeisen kymmenen vuoden aikana.[3] Luvun tavoitteena on antaa kuva siitä millaisia, nämä kemianteollisuuden prosessit ovat ja millaista teknologiaa ne perinteisesti hyödyntävät, sekä niiden haittapuolia.

2.1 Ammoniakin tuotanto

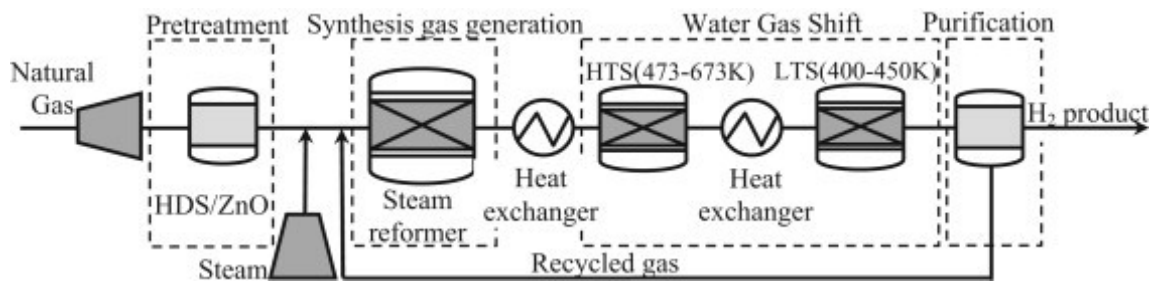
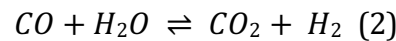
Ammoniakin synteesi on tilavuudeltaan suurin teollisuudessa tuotettu kemiallinen reaktio. Ammoniakkia tarvitaan kaikkiin tyyppiä sisältävien kemikaalien tuotantoon, eli se on lukuisten muiden kemikaalien lähtöaine. 85% ammoniakista menee kuitenkin lannoitteiden tuotantoon.[5]

Historiallisesti Haber-Bosch-menetelmä on ollut yleisin ammoniakin synteessin menetelmä. Menetelmää on optimoitu siitä lähtien kun se kehitettiin 1900-luvun alussa. Tämä on ehkä yksi syy siihen, miksi Haber-Boschilla on ollut käytännössä monopoli asema ammoniakin tuotannossa. Menetelmä syntesoi ammoniakkia vedestä ja metaanista. Haber-Bosch-menetelmä ei kuitenkaan ole täysin ongelmaton. Prosessi on hyvin energiaintensiivinen ja vaatii korkean lämpötilan ja paineen. Tyypillisesti 500–1000 celsius-astetta ja 100 baaria. Tähän mennessä käytännössä kaikki ammoniakkisynteessissä hyödynnettävä vety tuotetaan fossiilisista hiilivedyistä höyryreformoinnin avulla, mikä lienee menetelmän suurin haitta.[6] Vety siis puolestaan tuotetaan perinteisesti metaanin reformointiprosessilla, englanniksi steam methane reforming eli SMR, jonka reaktioyhtälö on esitetty alla.



Metaanin reformointi on kehittynein ja eniten hyödynnetty prosessi vedyntuotannossa. Prosessissa maakaasusta eli metaanista tehdään katalyyttisesti endotermisen reaktion avulla vetyä, hiilimonoksidia ja hiilidioksidia. Kuvassa 2 on havainnollistettu vetylaitosta, joka hyödyntää metaanin reformointiprosessia. Kuvassa 2 itse metaanin reformointivaihe on merkitty nimellä "Synthesis gas generation". Reaktion endotermisen luonteen takia prosessi vaatii paljon energiaa polttimeista. Tyypillisesti reaktio vaatii 800–1000 asteen lämpötilan ja 5–20 barin

paineen. Ennen itse reformointia prosessissa on myös maakaasun esikäsittely vaihe, jossa maakaasusta poistetaan epäpuhtauksia kuten rikkiyhdisteitä. Reformoinnin jälkeen fluidi menee ns. "water-gas shift" reaktorin läpi, jossa fluidin hiilimonoksidi muutetaan hiilidioksidiksi ja vedyksi reaktiolla veden kanssa. Reaktioyhtälö havainnollistettu alapuolella yhtälössä 2. Viimeisenä on puhdistus vaihe, jossa vety ja hiilidioksidi erotetaan toisistaan, jotta saadaan tuotteena puhdasta vetyä.[8]



Kuva 2 Perinteisen SMR vetylaitoksen toimintavaiheet[8]

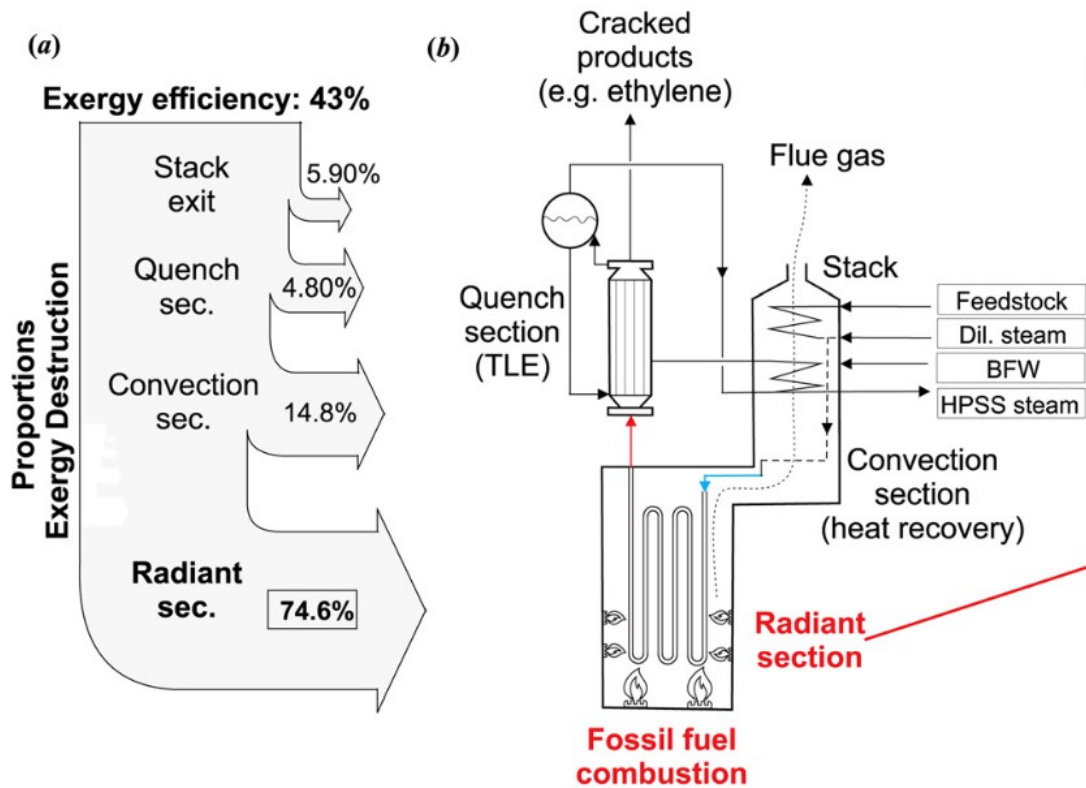
Metaanin reformointi tuottaa siis harmaata vetyä. Vetyä on monenlaista, mutta yleisintä tällä hetkellä on harmaa vety, jota siis tuotetaan maakaasusta, eikä sivutuotteena syntyvää hiilidioksidia oteta talteen niin, kuin sinisen vedyn kohdalla tehdään. Vihreällä vedyllä taas viitataan vetyyn, joka tuotetaan täysin uusiutuville energianlähteillä hyödyntäen elektrolyysiä. Tuotanto on siis täysin päästötöntä, mutta kattoi vain 0,1% kaikesta vedyn tuotannosta vuonna 2021.[9] Vihreän vedyn tuotantoa ja sen roolia ammoniakkin tuotannon tulevaisuudessa käsitellään tarkemmin luvussa 3.2.

2.2 Höyrykrakkaus

Höyrykrakkaus on johtava prosessi petrokemian merkittävien komponenttien tuotannossa. Tämän lisäksi se on myös petrokemiallisista prosesseista eniten energiaa kuluttava[10]. Höyrykrakkaus on kemiallinen krakkaus prosessi, jossa usein petrokemianteollisuudessa hyödynnettäviä hiilivetyjä pilkotaan pienemmiksi, eli alkaaneista tehdään olefiineja.[11] Raaka-aineena krakkaamisessa voidaan hyödyntää puhtaita alkaaneja (etaania, propaania tai butaania) tai erilaisia hiilivetyseoksista kuten naftaa tai polttoöljyä. [12] Prosessissa raaka-aine

sekoitetaan kuuman höyryn kanssa ja lämmitetään 775–900 celsiusasteen lämpötilaan vain millisekunneiksi, jonka aikana krakkausreaktio tapahtuu. Sitten seos jäädytetään nopeasti, jolloin reaktio loppuu ja reaktiotuotteet voidaan erotella toisistaan.[13]

Perinteisesti teollisuudessa höyrynrakkaus tapahtuu höyrynrakkausuunissa. Höyrynrakkausuunissa käytettävän höyryn lämpötila on usein yli 800 celsius astetta ja reaktorin seinien lämpötila voi nousta jopa 1150 asteeseen. Jo pelkästään tämän takia höyrynrakkaus on hyvin energiaintensiivinen prosessi.[14] Höyrynrakkausuuneja on monia erilaisia, mutta niiden perusrakenne on usein samankaltainen. Alaosa koostuu niin kutsutusta säteilevästä osasta (radiant section) johon kuuluu tulipesä ja reaktori. Yläosa taas on niin kutsuttu konvektio osa (convection section), jossa lämmönsiirto tapahtuu.[15] Kuvassa 3 näkyy höyrynrakkausuunin perusrakenne ja exergiatasapaino. Krakkauksen raaka-aine, krakkausuunin malli ja prosessin spesifit olosuhteet vaikuttavat kuitenkin laitteiston rakenteeseen. Krakkausuunia lämmitetään tulipesässä sijaitsevat polttimet, joita useimmiten lämmitetään maakaasulla. Polttimet lämmitävät krakkausputkia säteilemällä lämmöllä.[16]



Kuva 3 Höyrykrakkauslaitoksen exergiatasapaino[17]

Korkeiden hiilidioksidipäästöjen lisäksi perinteisissä höyrykrakkausuuneissa on muitakin ongelmia. Polttimien korkeasta toimintalämpötilasta johtuen, prosessissa syntyy myös merkittävä määrä NO_x päästöjä, jopa 120ppm. Päästörajoitukset ovat kuitenkin yleistäneet katalyyttisten NO_x:in poisto systeemien käyttöä höyrykrakkauslaitoksissa.[16] Lisäksi vain 30% polttimien tuottamasta lämmöstä tarvitaan itse kemiallista reaktiota varten ja noin 50% tuotetusta lämmöstä täytyy palauttaa prosessin nesteistä tuottamaan lämpöä prosessin esilämmitysvaiheeseen.[13] Eli prosessi kärsii häviöistä vaikka perinteisen höyrykrakkausprosessin hyötysuhde on yli 90%[18]. Myös koksen muodostuminen aiheuttaa rajoitteita höyrykrakkausuunin käytössä. Perinteinen höyrykrakkausuuni voi toimia vain 40–100 päivää ennen kuin koksia täytyy poistaa. Normaalisti koksen poisto kestää noin 48 tuntia, joka tietenkin vaikuttaa negatiivisesti prosessin taloudellisuuteen.[19]

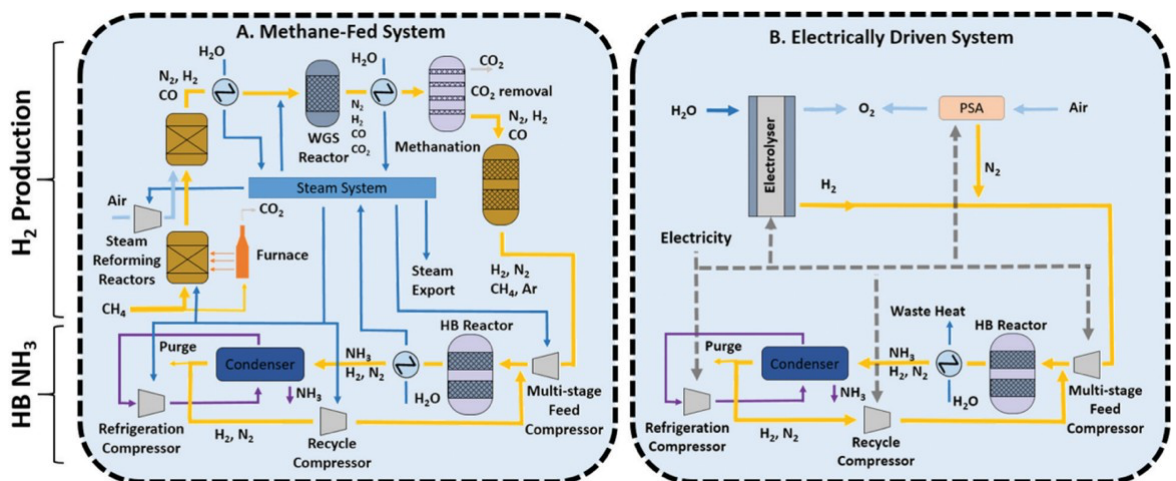
3 Kemianteollisuuden sähköistäminen

Tämä luku paneutuu ammoniakintuotannon ja höyrykrakkauksen sähköisiin teknologioihin. Ensin keskitytään ammoniakintuotantoon ja miten ammoniakkia voidaan tuottaa sähköllä nyt ja tulevaisuudessa. Sitten siirrymme käsittelemään höyrykrakkausta ja millaisia sähköisiä teknologioita on olemassa ja kehitteillä. Seuraavaksi käsitellään teknologiaa käytännöllisemmästä näkökulmasta ja keskitytään olemassa oleviin alojen toimijoihin ja heidän projekteihinsa, jotka hyödyntävät keskusteltuja sähköisiä teknologioita.

3.1 Korvaavat teknologiat ammoniakintuotannossa

98% ammoniakintuotannon kasvihuonekaasupäästöistä syntyy vedyn tuotannon yhteydessä.[20] On siis järkevä keskittyä vihreän vedyn tuotantoon, joka voi toimia sähköistetyn Haber-Bosch prosessin kanssa.

Kuten aikaisemmassa luvussa kerrottiin, Haber-Bosch menetelmä vaatii korkean lämpötilan ja paineen, sekä tuottaa merkittävän määrän kasvihuonekaasua päästöjä perinteisesti käytetyillä polttoainella. Haber-Bosch menetelmä olisi mahdollista sähköistää. Käytännössä tämä tarkoittaa, että metaanipohjainen vedyntuotanto korvattaisiin elektrolyysillä ja Haber-Bosch reaktio, jolla ammoniakki tuotetaan, toimisikin sähköllä, eikä käyttäisi metaania polttoaineena. Näiden kahden prosessin ero on yksinkertaisesti kuvattuna kuvassa 4.



Kuva 4 Perinteinen ja sähköistetty ammoniakintuotanto Haber-Bosch prosessilla[21]

On myös tehty tutkimusta teknologioista, jotka voisivat korvata Haber-Bosch menetelmän kokonaan. Ammoniakin sähkökemiallinen synteesi on yksi tapa, jolla on potentiaalia korvata HB-menetelmä. Ammoniakin sähkökemiallinen synteesi on prosessi, joka voidaan suorittaa normaali lämpötilassa ja paineessa[22], ja prosessin energia on sähkön muodossa, joka voidaan tuottaa täysin päästöttömästi. Ammoniakkia tuottavia elektrolyysiteknologioita on monia. Esimerkiksi litium välitteinen tyyppi pelkistys eli Li-NRR on todistettu yhdeksi parhaista mahdollisista teknologioista korvaamaan tällä hetkellä hiili-intensiivisen Haber-Bosch menetelmä[23]. Toisaalta tämä teknologia ja monet muut sähkökemialliset ammoniakin syntetisointi teknologiat ovat vielä niin aikaisessa kehitysvaiheessa, että niitä ei olla päästy soveltamaan teollisessa mittakaavassa.[24]

TRL-taso (Technology readiness level) kuvaa uusien teknologioiden kypsyyden tasoa eli kuinka kaukana teknologioiden valmius on markkinoille lanseeraamisesta. TRL-taso 1–2 viittaa yleensä perustason tieteelliseen tutkimukseen. Tasoilla 3–4 teknologiasta on yleensä tehty jo käytännöllisempiä laboratoriotason kokeita. Tasot 5–7 tarkoittaa että teknologiaa on testattu sille relevantissa käyttöympäristössä esimerkiksi suuremmissa teollisissa mittakaavassa. Tasoilla 8-9 teknologia on käytännössä valmis ja sitä pystytään hyödyntämään kyseisen teknologian markkinoissa.[25] Taulukossa 1 näkyy tiivistettynä taulukko erilaisista vedyntuotannon teknologioista. Ainoat, joilla on merkittäviä teollisia sovelluksia, ovat kaksi ylintä eli emäksinen vesi elektrolyysi ja protoni vaihto membraani elektrolyysi, joiden TRL on 7–9. Kahden ylimmän elektrolyysiteknologian ja muiden teknologioiden välillä on suhteellisen suuri hyppy, joten alemmilla tasoilla ei ole vielä juurikaan teollisuuden mittakaavan sovelluksia. Tämän vuoksi keskitymme perinteisen HB-prosessin sähköistämiseen kahdella ylimmällä elektrolyysiteknologialla.

Taulukko 1 Eri vedyntuotanto teknologioiden TRL-arvot[21]

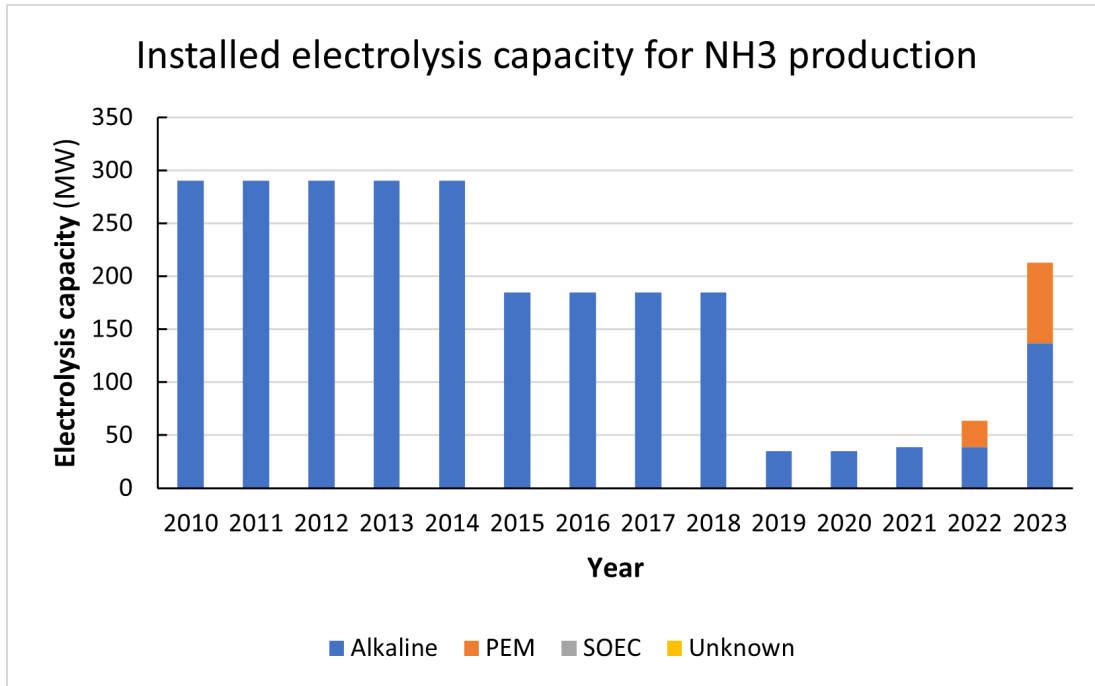
Hydrogen production technologies	TRL	Feedstock
Alkaline electrolysis	9	H ₂ O + electricity
PEM electrolysis	7–8	H ₂ O + electricity
Solid oxide electrolysis	3–5	H ₂ O + electricity + heat
Biomass gasification	4	Biomass + heat
Biological	1–3	Biomass + microbes (+ light)
Photoelectrochemical	1–3	H ₂ O + light
Thermochemical	1–3	H ₂ O + heat

Sähköistäminen on myös yksi tapa kasvattaa ammoniakintuotannon prosessin hyötysuhdetta. Maakaasun käyttöön perustuvalla ammoniakintuotannolla hyötysuhde on 61-62% verrattuna sähköiseen vaihtoehtoon, jonka hyötysuhde voi ylettyä 76-77%:iin.[26]

3.1.1 Korvaavat hankkeet ammoniakintuotannossa

Tässä luvussa käsitellään miltä vihreän ammoniakintuotannon tulevaisuus näyttää. Luvussa esitellään valmiita ja kehitteillä olevia hankkeita, joita lähinnä teollisuuden suuret toimijat ovat lanseeranneet.

Elektrolyysillä valmistettuun vetyyn pohjautuva ammoniakintuotanto on itseasiassa laskenut viimeisen kymmenen vuoden aikana, sillä monia ammoniakintuotanto laitoksia suljettiin vuosina 2015 ja 2019. Tätä havainnollistaa kuva 5. Merkittävimmät syyt laitosten sulkemiselle oli sähkön suuri kysyntä alueella, joka johti korkeisiin sähkön hintoihin. Lisäksi alueella pidempään vallinnut kuivuus vaikeutti prosessin ylläpitoa, sillä elektrolyysiin tarvitaan paljon vettä. [27]



Kuva 5 Elektrolyyttisen ammoniakintuotannon kapasiteetti[27]

Uusiutuvien energianlähteiden yleistyessä ja niillä tuotetun sähkön hinnan laskiessa elektrolyysi pohjainen vedyn- ja ammoniakintuotanto on kuitenkin lähtenyt uuteen nousuun. Lukuisat yritykset ovat aloittaneet hankkeita ja rakentaneet laitoksia, joissa tuotetaan vihreää vetyä ja ammoniakia.

Tällä hetkellä yleisin tapa tuottaa vähempi päästöistä ammoniakia on tuottaa sitä vihreällä vedyllä ja hyödyntämällä perinteistä Haber-Bosch menetelmää. Tämä ei täysin poista prosessin hiilidioksidipäästöjä, jos Haber-Bosch prosessin prosessilämmön tuottamiseen käytetään fossiilista polttoainetta.

Iberdrolan vetylaitos Espanjassa

Iberdrola on espanjalainen energiayhtiö, joka on suuri toimija muun muassa vesivoiman, aurinkovoiman ja tuulivoiman tuotannossa Euroopassa. Vuonna 2022 Iberdrola otti käyttöön Euroopan suurimman vihreän vedyn tuotantolaitoksen, joka tuottaa vetyä ammoniakintuotantoa varten. Vety valmistetaan hyödyntämällä elektrolyysiteknologiaa, joka hajottaa veden hapeksi ja vedyksi suoran sähkövirran avulla.

Yaran vetylaitos Norjassa

Yara on norjalainen lähinnä lannoitteita valmistava yritys. Vuonna 2024 Yara otti käyttöön PEM teknologiaa hyödyntävän vetylaitoksen Norjassa[28]. Laitos on suurin ja ensimmäinen laatuaan. Laitos on siis 24MW elektrolyysipilotti, joka on saksalaisen yrityksen Linden kehittämä. Tarkoituksena tuottaa vihreää vetyä perinteistä ammoniakkin tuotantoa varten.[29] Vaikka vihreän vedyn käyttö vähentää hiilidioksidipäästöjä, ei ammoniakkin tuotannon koko prosessi ole päästötön. Tämä johtuu siitä, että HB-menetelmää hyödyntävä ammoniakkin tuotanto laitos, jota varten vihreä vety tuotetaan, toimii LPG:llä[30]. Yaralla on myös toinen samankaltainen meneillään oleva hanke. Yara rakentaa Länsi-Australiaan elektrolyysillä toimivaa 10MW vedyntuotantolaitosta. Tarkoituksena on tuottaa puhdasta vetyä olemassa olevalle ammoniakkin tuotantolaitokselle aurinkoenergialla saatavalla sähköllä. Laitoksen on tarkoitus valmistua vuonna 2025.[31]

Plug Power

Plug Power on yhdysvaltalainen vedyntuotanto yritys. Plug pyrkii rakentamaan vihreää vetyekosysteemiä, joka korvaisi fossiilisten polttoaineiden hyödyntämistä monilla sektoreilla. Plug Power valmistaa PEM teknologiaa hyödyntäviä moduulisia elektrolyysereitä, jotka on mahdollista integroida olemassa olevaan laitokseen. Tämä mahdollistaa sen, että teknologiaa voidaan hyödyntää ilman että rakennetaan täysin uusi laitos. Plugin elektrolyysereitä on siis mahdollista hyödyntää myös ammoniakkin tuotantolaitoksissa. Plugin viimeisimpänä projektina yritys teki BEDP (Basic Engineering and Design Package) sopimuksen 3GW vedyntuotantoa varten Australiassa. Australialaisen yrityksen Allied Green Ammonian on tarkoitus hyödyntää tuotettua vetyä omissa ammoniakki laitoksissaan.[32]

3.2 Korvaavat teknologiat höyrykrakkauksessa

90% höyrykrakkauslaitosten kasvihuonekaasu päästöistä on yhteydessä niiden korkeaan energiankulutukseen. [15] On monia strategioita, joilla höyrykrakkauslaitosten päästöjä voidaan mahdollisesti vähentää, kuten krakkausuunin energiatehokkuuden kasvattaminen ja koksen syntymisen vähentäminen. Tässä työssä keskitymme kuitenkin prosessilämmöntuotannon sähköistämiseen pohjautuviin teknologioihin.

Polttoaineella toimivien höyrykrakkausuunien korvaaminen sähköllä toimivilla uuneilla on lupaava vaihtoehto sähköistää höyrykrakkausprosessi, mutta täysin erilaisia teknologioita on myös kehitteillä. Käytännössä sähköistetyssä höyrykrakkauslaitoksessa itse krakkausprosessi toimisi täysin samalla tavalla kuin perinteisessä laitoksessa. Ainoa ero siis olisi millainen uuni tai muu laite lämmittää raaka-aineen. Perinteisen maakaasupolttoaineen korvaamista vedyllä on myös tutkittu mahdollisena tapana vähentää höyrykrakkauksen päästöjä.

Esimerkkinä myös TechnipEnergies on patentoinut uudenlaisen höyrykrakkausuunin, joka on parantanut tulipesän hyötysuhdetta, jolloin uuni käyttää vähemmän polttoainetta. [33]Edellä mainittu ei kuitenkaan ole sähköistävä tapa vähentää höyrykrakkauksen päästöjä, joten työ ei syvenny siihen enempää.

On myös kehitteillä teknologiaa, joka hyödyntää paineaaltolämmitystä pyörivän roottorin tuottamaa lämpöenergiaa reaktorin sisällä olevan nafta seoksen lämmittämiseen. [15]Aikaisemmin esiteltyjä teknologioita ja niiden kehittämistä käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.

Perinteiset krakkausuunit käyttävät keskimäärin 18-25GJ energiaa per tonni tuotettua eteeniä. Esimerkiksi TechnipEnergiesillä, Lindellä ja Lummuksella on perinteisiä krakkausuuneja, joiden energian kulutus on tätä luokkaa. Toisaalta jos hyödynnetään paineaaltolämmitys teknologiaa, niin kuin CoolBrook, energiankulutus on tasoa 8-10GJ/t. Seuraavassa luvussa käsitellään näiden yritysten hankkeita ja laitoksia hieman tarkemmin.

3.2.1 Korvaavat hankkeet höyrykrakkauksessa

Tämä luku käsittelee höyrykrakkauksen tulevaisuutta ja mitä kemianteollisuuden toimijat ovat tehneet edistääkseen alan sähköistymistä. Luku siis keskittyy suurien yritysten hankkeisiin, jotka hyödyntävät sähköistettyä höyrykrakkausteknologiaa.

Ludwigshafenin demonstraatiolaitos

Huhtikuussa 2024 Ludwigshafenissa Saksassa otettiin käyttöön maailman ensimmäinen demonstraatio laitos suuren mittakaavan teolliselle sähköiselle höyrykrakkaukselle. Laitos on Linden, BASF:n ja SABIC:in yhteistyön tulos. Demonstraatio laitos on täysin integroitu olemassa oleviin höyrykrakkaajiin, eli käytännössä itse höyrykrakkaus tapahtuu täsmälleen samalla prosessilla kuin

perinteisissä laitoksissa[34]. Laitos koostuu kahdesta höyrykrakkausuunista. Toinen niistä toimii johtamalla sähköä suoraan uunin käämiin, ja toisessa on sähköllä toimivat lämmityselementit käämin ympärillä. Eli ensimmäinen hyödyntää resistanssilämmitystä ja toinen induktiolämmitystä. Teknologialla on potentiaali vähentää hiilidioksidipäästöjä jopa 90% verrattuna perinteiseen höyrykrakkauslaitokseen.[35] Linden mukaan myös sähköisen krakkaajan energiatehokkuus on suurempi kuin perinteisissä krakkausuuneissa. Tämä perusteellaan sillä, että sähköisessä krakkaajassa jopa 90% sähköenergiasta muuttuu krakkausputkien lämmöksi verrattuna polttoainetta käyttävään krakkaajaan, jossa vain 40-45% polttoaineesta saadusta lämmöstä siirtyy krakkausputkiin.[34]

Dow Chemicalsin ja Shellin e-krakkaaja

Myös muilla yrityksillä on suunnitteilla olevia samankaltaisia hankkeita. Esimerkiksi Dow Chemicals ja Shell ovat tehneet yhteistyötä ja lanseeranneet kokeelliset "e-krakkaajan"(e-cracker) Hollannissa vuonna 2022. Kokeellisesta laitoksesta saatua dataa tullaan hyödyntämään suuremman pilottilaitoksen rakentamisessa, jonka toiminta voidaan aloittaa parhaimmillaan jo vuonna 2025. [36]

Aiepöytäkirja demonstraatiolaitosta varten

Puolestaan LyondellBasell, Technip Energies ja Chevron Phillips Chemical kirjoittivat aiepöytäkirjan sähköisen höyrykrakkausdemonstraatiolaitoksen rakentamisesta. Aiepöytäkirja allekirjoitettiin 2023 ja tarkoituksena on rakentaa demonstraatiolaitos, joka hyödyntää Technip Energies'in kehittämää eFurnace eli sähköistä höyrykrakkausuuni teknologiaa.[37]

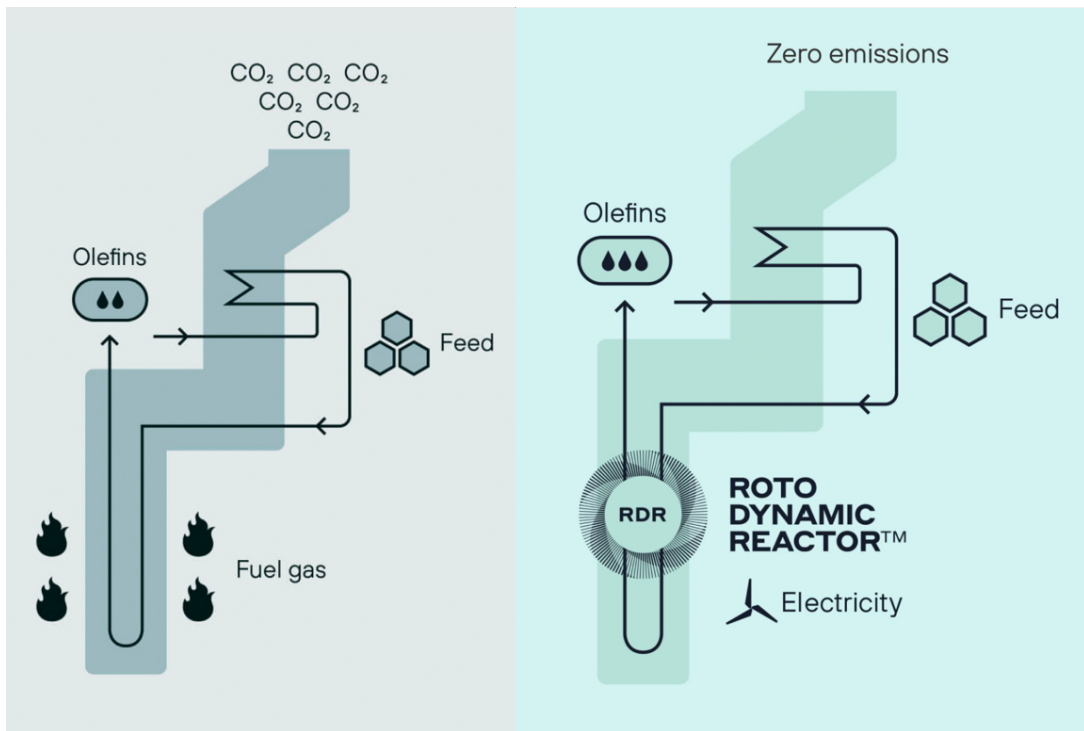
Lummuksen sähköiset höyrykrakkaajat

Yhdysvaltalainen Lummus on suuri toimija prosessiteollisuuden alalla ja valmistaa höyrykrakkaajia. Vuonna 2022 Lummus lanseerasi ensimmäisen eteeniä tuottavan sähköisen höyrykrakkaajan, mutta lämmitykseen höydynnettävästä teknologiasta ei ole vielä tietoa.[38] Lummus julkaisi vuonna 2024 tekevänsä yhteistyötä brasilialaisen kemianteollisuuden yrityksen Braskemin kanssa. Yhteistyön tarkoituksena on suorittaa yhteistä tutkimusta Lummuksen SRT-e sähköisten höyrykrakkausuunien käytöstä. Tutkimus tullaan suorittamaan yhdessä Braskemin eteenin tuotanto laitoksista. SRT-e on Lummuksen patentoitu

höyrykrakkausuuni teknologia, joka vastaa Lummuksen perinteistä SRT uunia, mutta toimii täysin sähköllä. SRT-e höyrykrakkausunit ovat modulaarisia ja ne voidaan asentaa täysin uuteen laitokseen tai integroida jo olemassa olevaan laitokseen.

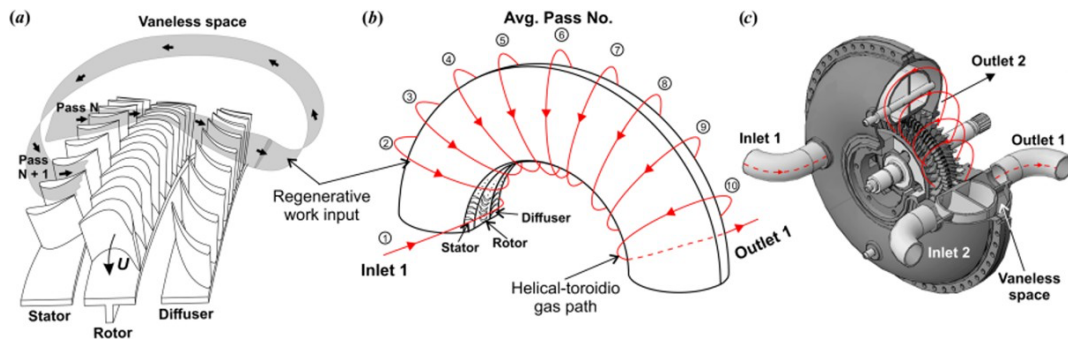
CoolBrookin Rotodynamic reactor

CoolBrook on Suomessa, UK:ssa, Hollannissa ja Intiassa operoiva teollisuusteknologia yritys. CoolBrook on kehittänyt ainutlaatuisen RotoDynamic Reactor höyrykrakkaus teknologian, joka hyödyntää pyörivästä roottorista syntyvää lämpöenergiaa. Kuvassa 7 näkyy yksinkertaistetusti perinteisen teknologian ja RDR:n ero. Kun RDR:ää käytetään päästöttömällä sähköllä se vähentää höyrykrakkauksen hiilidioksidipäästöjä jopa 100% verrattuna perinteiseen prosessiin.[39] Vuosina 2021-2023 CoolBrook rakensi ja suoritti testauksia Hollantiin rakennetussa pilottilaitoksessa ja krakkasi naftaa pilotilla onnistuneesti vuonna 2023. CoolBrookin seuraava askel on asentaa teollisuus skaalan reaktoreita asiakkaiden laitoksiin ja testata teknologiaa niissä. Tarkoituksena on onnistua reaktorin kaupallisessa lanseerauksessa vuonna 2025.[40] Seuraavaksi kerrotaan RDR teknologiasta ja sen toiminnasta hieman tarkemmin.



Kuva 6 Perinteinen höyrykrakkaus verrattuna RDR teknologiaan[40]

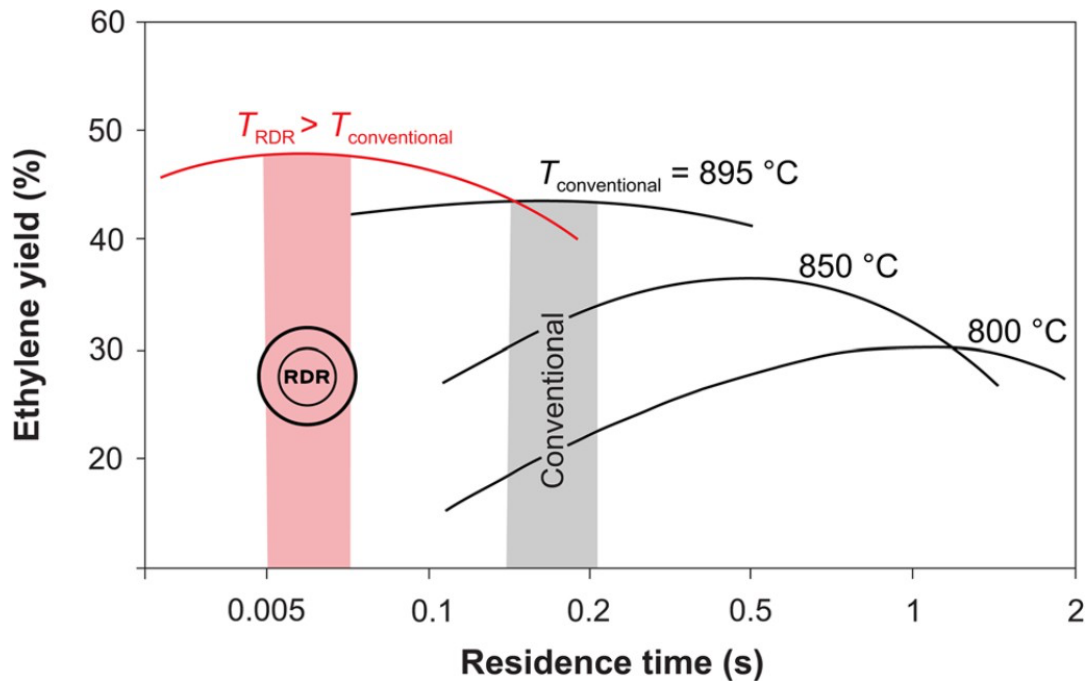
Paineaaltolämmitys on suhteellisen uusi konsepti. Paineaaltolämmitys toimii paineaalloilla, jotka lämmittävät kaasua puristamalla sitä tilavuudeltaan tiiviimmäksi. RDR:n toiminta perustuu tähän paineaaltolämmitys ilmiöön, jossa kaasu lämpenee roottorin sisällä, kun sitä ensin kiihdytetään staattoreilla ja sitten muutetaan kineettinen energia sisäiseksi energiaksi hidastamalla kaasu diffuuserin avulla. Tämän jälkeen kaasuvirta jatkaa tilaan, jossa ei ole lapoja (vaneless space), joka puolestaan johtaa virran takaisin roottoritilaan. Lavaton putki tila roottorin ympärillä mahdollistaa sen, että kaasu pääsee kulkemaan staattori-roottori-diffuuseri-systeemin läpi monta kertaa ennen laitteesta poistumista.[16] Kuva 8 kuvaa RDR:n rakennetta tarkemmin ja näyttää missä roottori(rotor), staattori(stator) ja diffuuseri(diffuser) sijaitsevat.



Kuva 7 RDR:n rakenne[17]

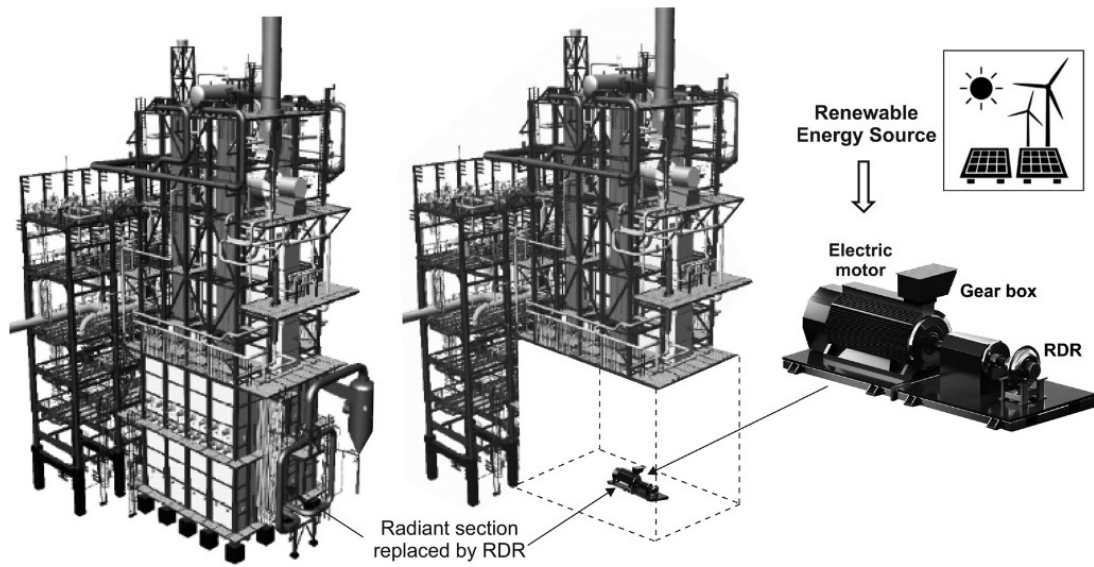
RDR-tekniikalla on päästöttömyyden lisäksi muitakin hyötyjä perinteiseen höyrynkraukaukseen verrattuna. Ensinnäkin reaktorin sisällä oleva fluidi pystyy saavuttamaan korkeamman lämpötilan ilman, että reaktorin seinämät saavuttavat sen materiaalin kannalta kriittisiä lämpötiloja, jolloin myös koksien muodostuminen on vähäisempää. Tämä mahdollistaa myös sen, että fluidilla on lyhyempi viipymäaika reaktorissa ja näin myös korkeampi saanto. Kuvassa 9 nähdään fluidin viipymäaika eteenin saannon funktiona RDR:n ja perinteisen reaktorin tapauksessa. RDR hyödyntää suoraa energiansiirtoa, joka mahdollistaa noin 4 kertaa lyhyemmän fluidin kulkeutumisreitit reaktorissa verrattuna perinteisen reaktorin kraukausputkiin. Nämä viipymäaika lyhentävät tekijät

kasvattavat eteenin ja propeenin saantoa 20%:lla Coolbrookin mukaan. Samalla myös prosessissa käytetty energia on vähäisempi.[17]



Kuva 8 Kaasun viipymä aika eteenin saannon funktiona[17]

Suuri etu RDR:n muotoilussa on myös reaktorin suhteellisen pieni koko. RDR on tilavuudeltaan jopa 500 kertaa pienempi kuin perinteisen höyrykrakkaimen säteilevä osa. Reaktorin pienempi koko johtaa myös pienempiin pääoma-, toiminta- ja huoltokustannuksiin. RDR:n ja perinteisen krakkauslaitoksen säteilevän osan kokoeroa on havainnollistettu kuvassa 10.



Kuva 9 RDR:n koko verrattuna perinteiseen höyrykrakkausuniin[17]

4 Haasteet

Kemianteollisuuden prosessit, mukaan lukien höyrynkraakkaus ja ammoniakkin tuotanto, ovat erittäin pitkälle optimoituja prosesseja. Kemian teollisuus on kehittynyt viime vuosisadan aikana, ja sen ympärille on kehittynyt miljardien eurojen infrastruktuuri, joka tukee suuren skaalan kemiallisia prosesseja, jotka on hiottu optimaaliseksi vuosien varrella. Tämän vuoksi yritykset voivat olla vastahakoisia uuden sähköistävän teknologian implementointia kohtaan, varsinkin jos kyseessä on elämänkaarensa aikaisessa vaiheessa oleva laitos. Lisäksi alan työvoima ei yleisesti ottaen ole koulutettu esimerkiksi sähköverkkojen ja sähkökemian aiheisiin, sillä historiallisesti nämä eivät ole olleet esimerkiksi kemiantekniikan insinöörin tutkinnolle keskeisiä aiheita. Siksi kemianteollisuuden yritykset tulevat tarvitsemaan työvoimansa lisäkoulutusta kaikilla tasoilla.[41]

Myös taloudellisuuden saavuttaminen on ongelmana vihreän vedyn tuotannossa ammoniakkin tuotantoa varten. Sekä alkaline elektrolyysi että PEM, mutta etenkin PEM. Tällä hetkellä alkaline elektrolyysin hinta on luokkaa 700-800€/kW ja PEM:n on 1000-1500€/kW. [42] Käytännössä yksi kilo vihreää vetyä maksaa tällä hetkellä vähintään 5€/kg, kun maakaasulla tuotettu harmaa vety maksaa vain 1,5€/kg. [43]Tämä vedyn hintaero on merkittävä, kun sitä tarvitaan suuren kapasiteetin ammoniakkin tuotantolaitosta varten.

Vedyn ja tätä kautta myös ammoniakkin tuotantoon tarvitaan paljon vettä. 1 vetykilon tuottamiseen tarvitaan 9–11 kg vettä riippuen elektrolyysiteknologiasta.[44] Niin kuin luvussa 3.1.1 mainittiin, vety-ammoniakki-laitoksia on jouduttu sulkemaan laitoksen alueen kuivuuden vuoksi. Tämä tarkoittaa, että elektrolyysiin pohjautuva vedyn ja ammoniakkin tuotanto ei välttämättä ole realistinen tai kestävä tuotantotapa kaikissa maailman osissa.

Monet tutkimukset keskittyvät teollisuuden lopputuotteiden käyttäjiin ja miten he voisivat vähentää päästöjä, eikä itse lopputuotteen valmistajaan. Esimerkiksi McMillan käytti artikkelissaan *Industrial process heat decarbonization: A user-centric perspective* esimerkkinä tilannetta missä tutkitaan tapoja, miten viljelijä voi vähentää päästöjään arvioimalla lannoitteen kulutusta, mutta ei tutkita ammoniakkin tuottajan päästövähennys strategioita. [45] McMillan totesin tehtyjen haastatteluiden perusteella myös, että prosessien uudistamista vaikeuttaa se, että prosesseja ei haluta häiritä tai keskeyttää firmojen omien vaatimusten vuoksi. Firmoilla myös on jo resursseja ja tietämystä perinteisistä fossiilisiin polttoaineisiin

perustuvista menetelmistä ja uuden tietämyksen ja osaamisen hankkiminen firmalle voi tulla kalliiksi.[45] Tämän perusteella voisi päätellä, että siirtymät ovat vaikeita isoille organisaatioille. Tätä vahvistaa myös se, että moni McMillanin haastateltavista otti esille sen, että harvoin löytyy korvaavaa teknologiaa, joka pystyisi korvaamaan firman kaikkien laitosten nykyiset teknologiat. Muutos siis vaatisi laitosten yksittäistä käsittelyä muutosta suunniteltaessa, joka vie enemmän resursseja kuin yksikäsitteinen ratkaisu. McMillanin mielestä olisi tärkeää, että teollisuutta sähköistäviä teknologioita kehitettäessä olisi jonkin sortin standardointia. Tämän avulla firmat, jotka ovat hyödyntäneet kyseistä teknologiaa, voisivat jakaa oppimansa prosessin muutuoksesta, jolloin teollisuuden sähköistäminen voisi olla nopeampaa. Toisaalta firman halu jakaa osaamistaan riippuu täysin siitä, kuinka hyvänä kilpailuetuna firma sitä pitää.[45] Siksi standardoinnin implementointia ei välttämättä voi pitää luotettavana tapana kiihdyttää teollisuuden sähköistämistä. Myös sähkön korkeat hinnat maakaasuun verrattuna nostavat kynnystä siirtyä sähköisiin vaihtoehtoihin.

5 Yhteenveto

Tämä kandidaatintyö on käsitellyt kahden kemianteollisuudelle merkittävän prosessin sähköistämistä: ammoniakkin tuotannon ja höyrynrakkauksen. Siirtymä kestäviin energiasysteemeihin kemianteollisuudessa on välttämätön askel ilmastonmuutoksen pysäyttämistä kohti. Sähköistäminen tarjoaa lupaavan vaihtoehdon parantaa ammoniakkin tuotannon ja höyrynrakkauksen energiatehokkuutta, sekä niiden vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista.

Ammoniakin tuotannossa perinteinen Haber-Bosch-prosessi on hiili-intensiivinen prosessi etenkin maakaasuun perustuvan vedyntuotannon takia. Metaanilla tuotetun harmaan vedyn korvaaminen elektrolyysillä tuotetulla vihreällä vedyllä ja HB-prosessin ajaminen sähköllä vähentäisivät CO₂-päästöjä merkittävästi. Vihreässä ammoniakkin tuotannossa on vielä kuitenkin haasteita etenkin taloudellisista syistä.

Höyrynrakkaus on merkittävä prosessi petrokemianteollisuudelle, mutta on hyvin energiantensiivinen ja merkittävä CO₂-päästöjen tuottaja. Höyrynrakkausprosessin sähköistäminen joko sähköisillä krakkausuneilla tai innovatiivisilla krakkausreaktoreilla voi mahdollistaa CO₂-päästöjen merkittävän vähennyksen ja korkeamman energiatehokkuuden saavuttamisen petrokemian alalla. Pilotti projektit ja jatkuva tutkimus uusista höyrynrakkausmenetelmistä esittää lupaavaa edistystä, mutta laaja höyrynrakkauksen sähköistäminen vaatii vielä teknisten kuin taloudellistenkin esteiden ratkaisua.

Yhteenvetona sähköistäminen esittää monia hyötyjä kemianteollisuudelle. Etenkin päästöjen vähentämisessä ja prosessien energiatehokkuuksien parantamisessa. Kemianteollisuudella on kuitenkin monia haasteita ratkaistavana kustannuksiin, infrastruktuuriin ja teknologian kehitykseen liittyen, joten alan laajempi sähköistäminen vaatii vielä lisää aikaa ja investointeja.

6 Viitteet

1. IEA. *CO2 Emission in Finland*. 2021; Available from: <https://www.iea.org/countries/finland/emissions>.
2. IEA. *CO2 Emission in the world*. 2021; Available from: <https://www.iea.org/world/emissions#what-are-the-main-sources-of-global-co2-emissions>.
3. IEA. *Chemicals overview*. 2023; Available from: <https://www.iea.org/energy-system/industry/chemicals>.
4. IEA, *Process energy for primary chemical production*. 2023, IEA: Paris.
5. Ertl, G., *Handbook of Heterogeneous Catalysis Inorganic Reactions*. 2008: John Wiley & Sons Incorporated. 2501-2575.
6. Jiao, F. and B. Xu, *Electrochemical Ammonia Synthesis and Ammonia Fuel Cells*. *Advanced materials*, 2019. **31**(31).
7. Ke, L., S. Chunshan, and S. Velu, *Hydrogen and syngas production and purification technologies*. 2010, Hoboken, NJ :: Wiley.
8. Hajjaji, N., et al., *Exergy analysis: An efficient tool for understanding and improving hydrogen production via the steam methane reforming process*. *Energy policy*, 2012. **42**: p. 392-399.
9. Forum, W.E. *Grey, blue, green – why are there so many colours of hydrogen?* 2021; Available from: <https://www.weforum.org/agenda/2021/07/clean-energy-green-hydrogen/>.
10. Ren, T., M.K. Patel, and K. Blok, *Steam cracking and methane to olefins: Energy use, CO2 emissions and production costs*. *Energy*, 2008. **33**: p. 817-833.
11. Speight, J.G., *Handbook of industrial hydrocarbon processes*. 2 ed. 2020: Gulf professional publishing.
12. Gholami, Z., et al., *A Review on the Production of Light Olefins Using Steam Cracking of Hydrocarbons*. *Energies*, 2021. **14**(23): p. 8190.
13. Chadwick, S.S., *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Reference services review : RSR., 1988. **16**(4): p. 31-34.
14. Gholami, Z., et al., *A Review on the Production of Light Olefins Using Steam Cracking of Hydrocarbons*. *Energies*, 2021. **14**(23).
15. Amghizar, I., et al., *Sustainable innovations in steam cracking: CO2 neutral olefin production*. *Reaction chemistry & engineering*, 2020. **5**(2): p. 239-257.
16. Haikala, E., *Modeling of a rotodynamic reactor*. 2023.
17. Rubini, D., et al., *A New Turbomachine for Clean and Sustainable Hydrocarbon Cracking*. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 2022. **144**(2).
18. Gao, Y., et al., *Recent Advances in Intensified Ethylene Production—A Review*. *ACS catalysis*, 2019. **9**(9): p. 8592-8621.
19. Patil, M., et al., *Catalytic Effect of Dimethyl Disulfide on Coke Formation on*

- High-Temperature Alloys: Myth or Reality?* Industrial & engineering chemistry research., 2020. **59**(34): p. 15165-15178.
20. Forum, W.E., *Net-zero industry tracker*. 2023. p. 132.
 21. Smith, C., A.K. Hill, and L. Torrente-Murciano, *Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape*. Energy & Environmental Science, 2020. **13**: p. 331-344.
 22. Li, Y., et al., *Recent Advances and Perspective on Electrochemical Ammonia Synthesis under Ambient Conditions*. Small Methods, 2021. **5**(11).
 23. Fu, X., J. Zhang, and Y. Kang, *Recent advances and challenges of electrochemical ammonia synthesis*. Chem Catalysis, 2022. **2**(10): p. 2590-2613.
 24. Ghavam, S., et al., *Sustainable Ammonia Production Processes*. Frontiers in energy research., 2021. **9**.
 25. Yliopisto, A. *Technology Readiness Level (TRL)*. 2023; Available from: <https://www.aalto.fi/en/services/technology-readiness-level-trl>.
 26. Zhang, H., et al., *Techno-economic comparison of green ammonia production processes*. Applied energy, 2020. **259**: p. 114135.
 27. Association, A.E. *Technology status: ammonia production from electrolysis-based hydrogen*. 2023; Available from: <https://ammoniaenergy.org/articles/technology-status-ammonia-production-from-electrolysis-based-hydrogen/>.
 28. Yara. *Yara opens renewable hydrogen plant: "A major milestone"*. 2024; Available from: <https://www.yara.com/corporate-releases/yara-opens-renewable-hydrogen-plant-a-major-milestone/>.
 29. Industripark, H. *The world's largest and first green hydrogen plant starts production at Herøya in 2023*. 2023; Available from: <https://eng.heroya-industripark.no/en/news/the-worlds-largest-and-first-green-hydrogen-plant-starts-production-at-heroeya-in-2023/>.
 30. Yara, *Yara's renewable hydrogen plant fact sheet*. 2024, Yara.
 31. HyResource. *Yuri Renewable Hydrogen to Ammonia Project*. 2024; Available from: <https://research.csiro.au/hyresource/yuri-renewable-hydrogen-to-ammonia-project/>.
 32. Power, P. *Plug Reaches 7.5 GW in BEDP Contracts for Global Electrolyzer Projects*. 2024; Available from: <https://www.ir.plugpower.com/press-releases/news-details/2024/Plug-Reaches-7.5-GW-in-BEDP-Contracts-for-Global-Electrolyzer-Projects/default.aspx>.
 33. Oleksii, M., et al., *Electrification of steam cracking as a pathway to reduce the impact of the petrochemical industry on climate change*. Journal of Cleaner Production, 2023. **427**.
 34. Linde. *Electrification of Steam Cracking Furnaces*. 2024; Available from: <https://www.linde-engineering.com/products-and-services/process-plants/sustainable-hydrocarbon-solutions/linde-efurnace>.
 35. BASF, SABIC, and Linde *BASF, SABIC, AND LINDE CELEBRATE THE START-UP*

- OF THE WORLD'S FIRST LARGE-SCALE ELECTRICALLY HEATED STEAM CRACKING FURNACE.* 2024.
36. Hebden, K., *Dow and Shell's 'e-cracker' technology now operational*, in *TheChemicalEngineer*. 2022, TheChemicalEngineer.
 37. LyonellBasell LyondellBasell *Pursues New Electric Furnace Technology, Collaborates with Technip Energies and ChevronPhillips*. 2023.
 38. Lummus, *Lummus Introduces Industry's First Net Zero Ethane Cracker*. 2022, Lummus.
 39. Coolbrook. *Piloting RotoDynamic Technology: Shaping the Future of Electrification*. Available from: <https://coolbrook.com/electrification-technology-pilot/>.
 40. Coolbrook. *Electric cracking: RotoDynamic Reactor cuts 100% of CO2 in steam cracking*. Available from: <https://coolbrook.com/electrification-solutions/rdr-electric-cracking/>.
 41. Mallapragada, D.S., et al., *Decarbonization of the chemical industry through electrification: Barriers and opportunities*. *Joule.*, 2023. **7**(1): p. 23-41.
 42. Grigoriev, S.A., et al., *Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology*. *International journal of hydrogen energy.*, 2020. **45**(49): p. 26036-26058.
 43. Credits, C. *DOE Sets Eyes on Cutting Clean Hydrogen Cost, \$1/Kilo by 2031*. 2024; Available from: <https://carboncredits.com/doe-sets-eyes-on-cutting-clean-hydrogen-cost-1-kilo-by-2031/>.
 44. Franco, A. and C. Giovannini, *Recent and Future Advances in Water Electrolysis for Green Hydrogen Generation: Critical Analysis and Perspectives*. *Sustainability.*, 2023. **15**(24): p. 16917.
 45. McMillan, C.A. and L. Wachs, *Industrial process heat decarbonization: A user-centric perspective*. *Energy research & social science.*, 2024. **112**.