



YDINREAKTORIT TEOLLISUUDEN LÄMMÖNLÄHTEINÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

Niilo Haikarainen

Tarkastaja: TkT Heikki Suikkanen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT energijärjestelmät

Energiatekniikka

Niilo Haikarainen

Ydinreaktorit teollisuuden lämmönlähteinä

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

30 sivua ja 2 taulukkoa

Tarkastaja: TkT Heikki Suikkanen

Avainsanat: Ydinreaktorit, Teollisuuden lämmöntarve, Energiantuotanto,

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin eri ydinreaktorityyppien soveltuvuutta teollisuusprosessien lämmönlähteeksi. Työssä keskityttiin kevytvesi-, kaasujäähdytteisiin, nopeisiin ja sulasuolareaktoreihin sekä eri kokoluokan reaktoreihin. Teollisuusprosessien eri tuotantovaiheita käytiin läpi energiantarpeiden näkökulmasta. Työssä valittiin neljä eri teollisuusprosessia, jotka olivat: sellun ja paperin tuotanto, öljyn jalostaminen, vedyn tuotanto sekä alumiinin valmistus. Sen jälkeen selvitettiin mikä ydinreaktori sopii parhaiten mihinkin teollisuusprosessin sekä yhdistämiseen liittyvät turvallisuusvaatimukset. Lopuksi kerrottiin Ydinreaktorien hyödyistä ja haitoista teollisuuden lämmönlähteinä.

Työssä havaittiin, että eri teollisuusprosesseihin sopeutuu eri ydinreaktorityypit. Eniten reaktorityypin valintaan vaikutti teollisuusprosessin vaatima lämpötila sekä vaadittu energiamäärä. Vielä kehitteillä olevissa pienemmissä modulaarisissa reaktorityypeissä nähtiin eniten potentiaalia tulevaisuuden hankkeita varten, mutta nykypäivän reaktorit todettiin myös kannattaviksi tietyissä teollisuuden prosesseissa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Niilo Haikarainen

Nuclear reactors as industrial heat sources

Bachelor's thesis

2023

30 pages and 2 tables

Examiners: Associate professor Heikki Suikkanen

Keywords: Nuclear reactors, Industrial heat demand, Energy production

In this bachelor thesis different types of nuclear reactors were investigated as heat source for industrial purposes. The study focused on light water-, gas cooled-, fast- and molten salt reactors as well as different reactor sizes. Industrial processes were investigated through different stages of the production from the perspective of energy demands. Four different industrial processes were selected: pulp and paper production, oil refining, hydrogen production and aluminum manufacturing. Then it was determined which reactor type suited best for each industrial process and the safety requirements for them. Finally, the benefits of nuclear reactors as heat source for industrial processes were discussed.

The study found that different reactor types are suitable for different industrial processes. The temperature and the amount of energy needed was the main factor when deciding the reactor type. The small modular reactors which are still under development were seen as the most potential for future projects, but current reactors were also found viable option for certain industrial processes.

LYHENNELUETTELO

AGR	Kehittynyt kaasujäähdytteinen reaktori (Advanced Gas-cooled reactor)
BWR	Kiehutusvesireaktori (Boiling Water Reactor)
FNR	Nopea reaktori (Fast-neutron Reactor)
GCR	Kaasujäähdytteinen reaktori (Gas-cooled Reactor)
GFR	Nopea kaasujäähdytteinen reaktori (Gas-cooled Fast Reactor)
HTGR	Korkean lämpötilan kaasujäähdytteinen reaktori (High Temperature Gas-cooled Reactor)
KAERI	Korean atomienergian tutkimuslaitos (Korean Atomic Energy Research Institute)
MMR	Modulaarinen mikroreaktori (Micro Modular Reactor)
MSR	Sulasuola reaktori (Molten Salt Reactor)
PWR	Painevesireaktori (Pressurized Water Reactor)
SCWR	Ylikriittisessä paineessa toimiva reaktori (Supercritical Water Reactor)
SEALER	Ruotsalainen edistynyt lyijyjäähdytteinen reaktori (Swedish Advanced Lead Reactor)
SMART	Järjestelmään integroitu edistynyt modulaarinen reaktori (System-Integrated Modular Advanced Reactor)
SMR	Pieni modulaarinen reaktori (Small Modular Reactor)
USNC	Ultra Safe Nuclear Corporation

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	7
2	Reaktorityypit ja niiden toiminta-arvot	8
2.1	Kevytvesireaktorit	8
2.2	Kaasujäähdytteiset reaktorit	9
2.2.1	Termiset kaasujäähdytteiset reaktorit	9
2.2.2	Nopea kaasujäähdytteinen reaktori	10
2.3	Nopeat reaktorit.....	10
2.4	Sulasuolareaktorit.....	11
2.5	Eri kokoluokan reaktorit	11
2.5.1	Pienet modulaariset reaktorit	11
2.5.2	Isot laitokset.....	12
3	Teollisuusprosessien vaatimukset	14
3.1	Sellun ja paperin tuotanto.....	14
3.2	Öljyn jalostaminen	15
3.3	Vedyn tuotanto	16
3.4	Alumiinin tuotanto	17
4	Ydinreaktorin ja teollisen prosessilaitoksen yhdistäminen	19
4.1	Sellun ja paperin tuotanto.....	20
4.1.1	Turvallisuusvaatimukset	20
4.1.2	Laitosjärjestelmien yhteensovittaminen	20
4.2	Öljynjalostus	21
4.2.1	Turvallisuusvaatimukset	21
4.2.2	Laitosjärjestelmien yhteensovittaminen	22
4.3	Vedyn tuotanto	22
4.3.1	Turvallisuusvaatimukset	23
4.3.2	Laitosjärjestelmien yhteensovittaminen	23

4.4	Alumiinin tuotanto	24
4.4.1	Turvallisuusvaatimukset	24
4.4.2	Laitosjärjestelmien yhteensovittaminen	24
4.5	Yli 1000°C Vaativat teollisuusprosessit.....	25
5	Ydinreaktorin hyödyt ja haasteet teollisuuden lämmönlähteinä	26
6	Johtopäätökset	27
	Lähteet	28

1 Johdanto

Energiantuotanto on tärkeä osa yhteiskuntia kaikkialla maailmassa. Jatkuvasti kasvava energia- ja teollisuustuotanto vaativat yhä enemmän energialähteitä, ja samalla ympäristövaatimukset asettavat paineita kestäväälle energiantuotannolle. Ydinenergia on yksi keino vastata energiantuotannon kasvaviin tarpeisiin samalla kun pyritään vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä.

Ydinvoima on ollut fossiilisten polttoaineiden ohella merkittävässä roolissa sähköntuotannossa jo pidemmän aikaa. Fossiilisista polttoaineista ollaan kuitenkin luopumassa kovaa vauhtia ja siksi ydinvoimalla tuotettu lämpö voisi toimia hyvänä korvikkeena teollisuuden lämmön ja sähkön tarpeisiin. Ydinreaktorit ovat teknologisesti monimutkaisia järjestelmiä, jotka käyttävät uraania tai plutoniumia ydinpolttoaineenaan. Ne tuottavat lämpöä ytimen fissionista, joka sitten siirretään teollisiin prosesseihin esimerkiksi höyryn avulla. Vaikka ydinreaktorit ovatkin olleet tärkeässä roolissa energian tuotannossa jo useiden vuosikymmenten ajan, niiden käyttö teollisuuden lämmönlähteenä ei ole vielä kovin yleistä. Ydinreaktoreiden potentiaali teollisuuden lämmönlähteenä on kuitenkin tunnistettu, sillä ne mahdollistavat korkeiden lämpötilojen tuottamisen pitkiä aikoja kestävästi ja tehokkaasti.

Tämän tutkielman tarkoituksena on tarkastella ydinreaktorien teknologiaa ja eri teollisuusprosessien lämpötilavaatimuksia, sekä selvittää eri lämpötilavaatimuksille soveltuvat ydinreaktorit. Tutkimuksessa tarkastellaan myös ydinreaktorin ja teollisen prosessilaitoksen yhdistämiseen liittyviä teknisiä- ja turvallisuusnäkökulmia, sekä eri kokoluokan reaktoreita ja ydinvoiman hyötyjä teollisuudessa. Tavoitteena on arvioida ydinreaktorien käytön hyödyt ja haasteet teollisuuden lämmönlähteenä sekä tarkastella ydinreaktorien soveltuvuutta eri teollisuuden aloilla. Lopuksi esitetään johtopäätökset tutkimuksesta.

2 Reaktoriyypit ja niiden toiminta-arvot

Tässä kappaleessa kerrotaan lyhyesti teollisuusprosesseihin sopeutuvien ydinreaktoriyyp-
pien toimintaperiaate sekä niiden tuottamat lämpötilat ja paineet. Alla olevaan taulukkoon
1. on kirjattu eri ydinreaktoriyyp-
pien ulostulolämpötilat ja paineet

Taulukko 1. Reaktoriyypit, ulostulolämpötilat ja ulostulopaineet

Reaktoriyyp- pi	Ulostulolämpötila [°C]	Ulostulopaine [bar]
Kevytvesireaktorit	283-374	67-220
Kaasujäähdytteiset reaktorit	540-950	70-170
Nopeat reaktorit	500	170
Sulasuolareaktorit	550	240

2.1 Kevytvesireaktorit

Kevytvesireaktori (LWR, Light Water Reactor) on yksi yleisimmistä reaktoriyypeistä maailmassa. Se voidaan jakaa kolmeen eri reaktoriyyp-
piin: kiehutusvesireaktori (BWR, Boiling Water Reactor), painevesi reaktori (PWR, Pressurized Water Reactor) sekä vielä kehitteillä oleva ylikriittisessä paineessa toimiva reaktori (SCWR, Supercritical Water Reactor). Kaikissa kolmessa toiminta periaate on lähes sama. Kevytvesi toimii jäähdytin aineena sekä neutronien hidastinaineena.

BWR-reaktorissa on yksi vedenkiertojärjestelmä, jossa käytetään jäähdytinaineena vettä, joka kiehuu reaktorin sisällä ja muuttuu höyryksi, vesi on noin 70 baarin paineessa ja se nousee korkeimmillaan 286°C lämpötilaan. Turbiinille menevä vesihöyry on 67 baarin paineessa ja 283°C lämpötilassa (TVO, 2007) PWR-reaktorissa on puolestaan kaksi vedenkiertojärjestelmää: primäärikierto, jossa vesi on korkeassa 155 baarin paineessa ja 328°C lämpötilassa eikä täten höyrysty lainkaan kierron aikana. Tämä korkeapaineinen vesi siirtää reaktorin tuottaman lämmön toiseen vedenkiertojärjestelmään, missä vesi on matalammassa noin 75 baarin paineessa ja 290°C lämpötilassa. (TVO, 2010) PWR-reaktorin tuottama vesihöyry on siis hieman korkeammassa lämpötilassa ja paineessa kuin BWR-reaktorin.

SCWR-reaktorissa kiertävä vesi on hyvin korkeassa 250 baarin paineessa, vesi muuttuu ylikriittiseksi, kun paine ylittää 220 baaria ja lämpötila 374°C , se ei ole olomuodoltaan nestettä eikä höyryä, mutta se on kaasumaista, joten se pystyy pyörittämään turbiinia. veden sisään-tulo lämpötila on noin 280°C , joten se tuodaan reaktoriin nestemäisessä olomuodossa, mutta lämpötila nousee lopulta 500°C lämpötilaan. (Buongiorno and MacDonald, 2003.)

2.2 Kaasujäähdytteiset reaktorit

Kaasujäähdytteisiä reaktoreja on useampaa eri tyyppiä, mutta ne voidaan jakaa kahteen laajempaan ryhmään. Jo useampia vuosikymmeniä käytössä olleisiin termisiin kaasujäähdytteisiin reaktoreihin (GCR, Gas-cooled Reactor) sekä vielä kehitteillä oleviin nopeisiin kaasujäähdytteisiin reaktoreihin (GFR, Gas-cooled Fast Reactor). Kummankin tyyppisillä reaktoreilla päästään kuitenkin lähes samoihin lämpötiloihin.

2.2.1 Termiset kaasujäähdytteiset reaktorit

Termisissä kaasujäähdytteisissä reaktoreissa jäähdytinaineena toimii kaasu ja neutroneiden hidastinaineena käytetään grafiittia. Ensimmäiset termiset kaasujäähdytteiset reaktorit ovat Isossa-Britanniassa jo 1950-luvulla kehitetyt Magnox-tyyppiset reaktorit sekä Ranskassa kehitetyt UNGG-reaktorit, nämä ovat kuitenkin jo poistuneet yleisestä käytöstä. 1960-luvulla kehitetyt kehittynyt kaasujäähdytteinen reaktori (AGR, Advanced Gas-cooled Reactor) ovat kehittyneempiä versioita Magnox-reaktorista. AGR-reaktoreita on edelleen käytössä Isossa-Britanniassa, sen jäähdytinaineena toimiva kaasu nousee yli 600°C lämpötilaan, joka lämmittää erillisessä kiertojärjestelmässä kulkevan veden noin 540°C lämpötilaan, vesi höyrystyy ja kulkee turbiinille. Vesi on noin 170 baarin paineessa. (Nonboel, 1996) Toinen 1960-luvulla kehitetty reaktori tyyppi on korkean lämpötilan kaasujäähdytteinen reaktori (HTGR, High-temperature Gas-cooled Reactor). Tämä reaktori käyttää heliumia jäähdytinaineena, se mahdollistaa jopa 950°C lämpötilan 70 baarin paineessa, mikä on korkein ydinreaktorin tuottama lämpötila. Reaktorista poistuva heliumkaasu voidaan siirtää suoraan turbiinille tai sillä voidaan lämmittää erillistä helium- tai vesihöyrykiertojärjestelmää. (Ball, Holcomb and Cetiner, 2012; Elder and Allen, 2009)

2.2.2 Nopea kaasujäähdytteinen reaktori

Nopea kaasujäähdytteinen reaktori on neljännen sukupolven reaktori, jossa hyödynnetään samoja teknologioita kuin korkean lämpötilan kaasujäähdytteisissä reaktoreissa. Reaktorin jäähdytysaineena toimii helium ja polttoaineen ketjureaktio ylläpidetään nopeilla neutroneilla. GFR-reaktoreiden kehittäminen on kuitenkin edelleen kesken, ja niitä ei ole vielä käytössä kaupallisesti. Reaktorin kehityksessä on edelleen haasteita, kuten polttoainekierron ja jäähdytysjärjestelmän kehittäminen sekä turvallisuustekijöiden varmistaminen. GFR-reaktorin tuottamat lämpötilat voivat nousta jopa 950°C lämpötilaan 70 baarin paineessa. Lämmön siirto tapahtuu samalla tavalla kuin HTGR-reaktorissa (Anzieu, Stainsby and Mikityuk, 2009.)

2.3 Nopeat reaktorit

Nopeita reaktoreita (FNR, Fast-neutron Reactor) on kehitetty jo 1950-luvulta asti, mutta niiden käyttö on kuitenkin ollut vähäistä verrattuna termisiin reaktoreihin. Tällä hetkellä käytössä on muutamia nopeita reaktoreita Venäjällä sekä Aasiassa. Rakenteilla ja kehitteillä on kuitenkin useampia reaktoreita ympäri maailmaa.

Nopeissa reaktoreissa jäähdytin aineena käytetään nestemäisiä metalleja, kuten natriumia tai lyijyä, jotta saavutetaan korkeampi lämpötila ja parempi hyötysuhde. Tämä mahdollistaa myös paremman jäähdytysjärjestelmän, joka voi toimia tehokkaammin kuin perinteinen vesi. Nopeissa reaktoreissa ei ole tarvetta hidastinaineelle, koska ketjureaktio pidetään yllä nopeilla neutroneilla, termisten neutroneiden sijasta. Nopeat ydinreaktorit ovat kuitenkin teknisesti monimutkaisempia ja kalliimpia valmistaa ja ylläpitää kuin perinteiset ydinreaktorit. Nopeiden reaktoreiden tuottamat lämpötilat voivat nousta yli 500°C normaalissa ilmanpaineessa, tämä lämmittää erillisessä kiertojärjestelmässä kulkevaa vesihöyryä, vesihöyryn lämpötila pysyy lähes samana, mutta paine nousee noin 170 baariin. (Aoto et al., 2014; Brunel et al., 2009, s. 174-222.)

2.4 Sulasuolareaktorit

Sulasuolareaktorin kehitys alkoi jo 1940-luvulla, mutta käytännön sovelluksia ei ole vielä toteutettu suuren mittakaavan energiantuotantoon. Käytössä on ollut vain pieniä kokeellisia reaktoreita, mutta niiden kehitystyö on käynnissä useammassa maassa.

Sulasuolareaktori (MSR, Molten Salt Reactor) on neljännen sukupolven reaktori. Sulasuolareaktorissa sulasuola toimii sekä polttoaineena että jäähdytin aineena. Polttoaine koostuu yleensä uraanista tai toriumista, joka on liotettu fluoridisuolaan. Se on nestemäistä ja se kiertää suljetussa kierrätysjärjestelmässä reaktorin läpi. Sitä voidaan lisätä tai poistaa järjestelmästä tarpeen mukaan, mikä mahdollistaa reaktorin tehon ja lämpötilan säätelyn. Suolasuola reaktorit toimivat hyvin korkeissa lämpötiloissa noin 700-750°C ja ne toimivat normaalissa ilmanpaineessa. Tuotettu lämpö lämmittää ylikriittistä vettä, jonka lämpötila on noin 550°C 240 baarin paineessa. (Ignatiev et al., 2012; Serp et al., 2014.)

2.5 Eri kokoluokan reaktorit

2.5.1 Pienet modulaariset reaktorit

Pienet modulaariset reaktorit (SMR, Small Modular Reactor) ovat vielä suunnitteluvaiheessa, ja niitä on rakennettu vain muutamia tähän mennessä. Kehitystyö näiden osalta on kuitenkin kiivasta ja ne kiinnostavat monia maita, joiden pyrkimyksenä on vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista ja lisätä puhdasta energiantuotantoa. SMR-reaktorit ovat myös helpompia ja nopeampia asentaa, sillä reaktorit valmistetaan yleensä tehtaassa etukäteen ja kuljetetaan valmiina pakettina paikanpäälle. Se vähentää rakennus ja huoltokustannuksia. Pieniksi ydinreaktoreiksi lasketaan reaktorit, joidenka tuottama sähköteho on alle 300MW. Keskikokoisiksi reaktoreiksi lasketaan 300 – 700MW sähköteholla toimivat reaktorit ja suuriksi yli 700MW reaktorit. Osa pienistä modulaarisista reaktoreista voidaan kuitenkin skaalata suuremmiksi kuin 300MW. (Locatelli, Bingham and Mancini, 2014.)

SMR-reaktoreiden koko vaihtelee laajasti riippuen mallista. Kevytvesi-reaktorin toimintaperiaatteella toimiva Holtec SMR-160 reaktori toimii nimensä mukaan 160MW sähköteholla. Toinen samalla toimintaperiaatteella toimiva reaktori on Korealainen KAERI SMART-reaktori (Korean Atomic Energy Research Institute System-integrated Modular

Advanced Reactor) toimii 100MW sähköteholla (Michaelson and Jiang, 2021). Näiden lisäksi on vielä NuScale-reaktori, joka koostuu 45MW moduuleista, joita voi tarpeen mukaan olla enintään 12 kappaletta yhdessä reaktorissa, näin saadaan tuotettua 540MW sähköteho. (Vujić, Bergmann, Škoda and Miletić, 2012.)

Kaasujäähdytteisiä reaktoreista General Atomics EM2-reaktori toimii 265MW sähköteholla ja se toimii yhtäjaksoisesti jopa 30 vuotta ilman polttoaineen lisäystä. Kaasujäähdytteisistä reaktoreista on myös kehitteillä hyvin pieniä, alle 10MW sähköteholla toimivia reaktoreita. Näitä kutsutaan yleisesti myös mikroreaktoreiksi. USNC MMR-5/10-reaktori (Ultra Safe Nuclear Corporation Micro Modular Reactor) sekä U-Battery-reaktori toimivat 5MW ja 4MW sähköteholla, näiden tuottama lämpötila on 630°C ja 750°C, joten niiden avulla ei aivan päästä yhtä korkeisiin lämpötiloihin kuin, mitä kaasujäähdytteisillä reaktoreilla on mahdollista päästä. (Michaelson and Jiang, 2021.)

Nopeista reaktoreista natriumjäähdytteinen ARC-100-reaktori toimii 100MW sähköteholla ja sen polttoaineen vaihtoväli on 20 vuotta. Toinen potentiaalinen nopea reaktori on lyijyjäähdytteinen mikroreaktori LeadCold SEALER (Swedish Advanced Lead Reactor), se toimii 3MW sähköteholla ja sen polttoaineen vaihtoväli on 30 vuotta. Sulasuolareaktoreista Terrestrial Energy IMSR-400-reaktori toimii 195 MW sähköteholla ja Moltex Energy Stable Salt Reactor 300MW sähköteholla, tämän reaktorin polttoaineen syöttö on jatkuvaa eli reaktoria ei tarvitse pysäyttää sitä varten. (Michaelson and Jiang, 2021.)

2.5.2 Isot laitokset

Lähes kaikki käytössä olevat ydinvoimalat ovat kokoluokaltaan suuria laitoksia. Suuret ydinvoimalat ovat kuitenkin suunniteltu pääasiassa sähköntuotantoon, eikä niiden lämmöntuotanto ole aina suoraan käytettävissä teollisuudessa. Lisäksi ydinvoimaloiden käyttöönotto vaatii huomattavia investointeja ja pitkän aikavälin suunnittelua, mikä voi olla haastavaa teollisuusprosessien kannalta, jotka vaativat nopeita ja joustavia ratkaisuja energiantarpeisiinsa.

Verrattuna pieniin modulaarisiin reaktoreihin, isojen laitosten käyttöönotto ei vaadi niin paljoa lisätutkimusta, sillä ne ovat olleet yleisessä käytössä jo pitkään. Myös taloudellisesta näkökulmasta isojen reaktoreiden käyttöönoton kustannukset ovat helpommin arvioitavissa,

kuin pienten modulaaristen reaktoreiden, joiden kustannuksista ei vielä ole tarkkaa tietoa. Tutkimusten mukaan ne kuitenkin olisivat taloudellisesti kilpailukykyisiä isojen laitosten kanssa. (Locatelli, Bingham and Mancini, 2014.)

Isojen laitosten teholuokat ovat kasvaneet viime vuosikymmenten ajan reilusti. Uusimmat ydinvoimalat toimivat yli 1500MW sähköteholla, mikä on enemmän kuin mitä suurin osa teollisuusprosesseista vaatii. (Locatelli, Bingham and Mancini, 2014) Tämä ei kuitenkaan ole este sillä laitokset voidaan myös yhdistää sähköverkkoon tai samaa reaktoria voidaan käyttää useamaan teollisuusprosessin lämmönlähteenä, jolloin ylijäämä energia ei mene hukkaan.

3 Teollisuusprosessien vaatimukset

Teollisuussektorilla käytetään laajasti prosessilämpöä hyvin erilaisiin sovelluksiin, joiden lämpövaatimukset vaihtelevat laajasti. Korkeimmat lämpötilavaatimukset ovat metallien, lasin ja sementin valmistuksessa, jossa lämpötilat nousevat jopa yli 1000°C ja korkeimmillaan 1500°C. Kemikaalien valmistusprosesseissa ja vedyn tuotannossa tarvitaan 500-1000°C lämpötiloja, kun taas öljyperäisten tuotteiden ja koksen valmistus vaativat 300-500°C lämpötiloja. Alle 300°C lämpötiloja vaativia prosesseja on paljon, mutta ruuan ja sellun sekä paperin tuotanto ovat näistä merkittävimpiä, kun otetaan huomioon vaadittu lämpömäärä. (Csik and Kupitz, 1997; Peakman and Merk, 2019)

Tässä kappaleessa käydään läpi neljän eri teollisuusprosessin vaiheet ja niiden vaatimat lämpötilat. Jokaisesta lämpötilaluokasta on valittu yksi teollisuusprosessi ja valitut prosessit ovat maailmanlaajuisesti oman luokkansa merkittävimpiä teollisuusprosesseja lämmöntarpeen suhteen. Muita tämän työn kannalta potentiaalisia teollisuusprosesseja on esimerkiksi eri kemikaalien ja tekstiilien valmistus, ruokateollisuus sekä veden suolanpoisto. (Peakman and Merk, 2019.)

3.1 Sellun ja paperin tuotanto

Sellu ja paperi teollisuus on merkittävä ala, joka tuottaa vuosittain yli 400 miljoonaa tonnia sellua ja paperia. (Bajpai, 2015, s.1) Tuotanto eri vaiheet vaativat paljon energiaa ja se tuottaa suuria määriä hiilidioksidipäästöjä. Sellun ja paperin tuotanto koostuu useasta eri vaiheesta.

Ensimmäinen vaihe on raaka-aineen valmistelu, joka sisältää puun kuorinnan, käsittelyn seulonnan ja pihkan poiston. Tämä vaihe tapahtuu noin huoneen lämmössä. (Brännvall, 2009.)

Toinen vaihe on sellun valmistus eli selluloosan erottaminen puusta. Sellua voidaan valmistaa usealla eri tavalla riippuen siitä mitä lopputuotetta halutaan valmistaa. Yleisin tapa on keittää puu sulfaattiliuoksessa noin 130°C lämpötilassa. (Brännvall, 2009.)

Kolmas vaihe on sellun pesu ja valkaisu. Valkaisu voidaan tehdä kloori- tai hapetusprosesseilla. Se on kaksi vaiheinen prosessi, joka vaatii ensimmäisessä vaiheessa vesihöyryä 80-

85°C lämpötilassa 8-10 baarin paineessa ja toisessa vaiheessa vesihöyryä 90-100°C lämpötilassa 3-5 baarin paineessa. (Bajpai, 2015, s. 89-93.)

Neljäs vaihe on paperin valmistus. Tämä prosessi on monivaiheinen ja sen vaiheet riippuvat siitä millaista paperia halutaan valmistaa. Lämpötilat ovat noin 50-100°C. (Bajpai, 2015, s. 168-170.)

Viides vaihe on paperin kuivaus, yksi mahdollinen tapa on 90-luvulla käyttöön otettu Condebelt-kuivausprosessi, tämä vaatii korkeimmillaan 180°C lämpötilan. (Bajpai, 2015, s. 168-170) Perinteinen kuivaus tapa puolestaan vaatii noin 100-140°C lämpötilan. Molemmissa kuivaus menetelmissä lämpö voi tulla prosessiin vesihöyrynä alhaisessa paineessa. Viimeinen vaihe on viimeistelyprosessi mikä tapahtuu yleensä huoneen lämmössä. (Bajpai, 2015, s.11-37.)

Yksi maailman suurimmista paperitehtaista on Kiinassa sijaitseva Hainan Jinhai tehdas, joka tuottaa noin miljoona tonnia valkaistua sellua vuodessa. Se käyttää lämmöntuotantoon höyrykattilaa, joka tuottaa höyryä 480°C lämpötilassa 84 baarin paineessa 204 kg/s massavirralla. (Bajpai, 2015, s. 223-225) Paperin valmistus ei kuitenkaan vaadi näin korkeita lämpötiloja, paineita ja massavirtaa, mutta vastaaviin lukuihin päästään myös ydinreaktoreiden avulla. Paperitehtaat vaativat noin 1200 kWh yhtä tonnia tuotettua paperia kohden. Öljyn jalostaminen

Öljynjalostusprosessi on monivaiheinen prosessi. Eri välivaiheet riippuvat laajalti siitä mitä tarkalleen halutaan valmistaa.

Ensimmäinen vaihe on raakaöljyn esikäsitteily. Raakaöljy sisältää epäpuhtauksia, kuten vettä, rikkiä ja hiekkaa, jotka on poistettava ennen jalostusprosessin alkua. Tämä vaihe sisältää lämmityksen ja mekaanisen puhdistuksen. Lämpötila on yleensä noin 150-200°C. (Young, 2006.)

Toinen vaihe on tislaus. Tämä on öljynjalostuksen tärkein vaihe, jossa raakaöljy erotetaan eri fraktioihin eri lämpötilojen avulla. Tislaus tapahtuu tislauspylväessä, joka on korkea torni, joka on jaettu useisiin kerroksiin. Korkeammassa kerroksessa lämpötila on korkeampi kuin alemmilla kerroksilla. Tislausprosessin aikana öljy höyrystyy, ja eri fraktiot voidaan kerätä eri kerroksista. Lämpötilat vaihtelevat kerrosten mukaan, mutta yleensä alhaisin kerros on noin 350-400°C, kun taas ylin kerros voi olla yli 500°C. (Young, 2006.)

Kolmas vaihe on jatkokäsittely. Tislausprosessin jälkeen fraktioita voidaan edelleen käsitellä eri menetelmillä, kuten krakkaus, reformointi, isomerisointi ja vetykäsittely. Nämä prosessit auttavat muuttamaan fraktioita halutuiksi polttoaineiksi, kuten bensiiniksi, dieseliksi tai lentopolttoaineiksi. Lämpötilat vaihtelevat prosessin mukaan, mutta yleensä ne ovat välillä 200-500°C. (Young, 2006.)

Neljäs vaihe on viimeistely. Lopuksi polttoaineet käsitellään eri menetelmillä, kuten katalyyttisellä reformoinnilla ja alkyloinnilla, jotta saadaan haluttu tuoteominaisuus. Viimeistelyprosessin aikana lämpötilat voivat olla välillä 150-300°C. (Young, 2006.)

On huomattava, että öljynjalostusprosessissa käytettävät lämpötilat voivat vaihdella eri jalostamoissa ja eri prosessien mukaan. Lisäksi jotkut prosessit voivat vaatia erityisiä lämpötila-asetuksia saavuttaakseen halutun lopputuloksen.

Noin 30% kaikesta Öljynjalostamon käyttämästä energiasta tulee vesihöyryä. Vesihöyry kulkee koko jalostusprosessin eri vaiheiden läpi. Prosessien eri vaiheet vaativat eri paineista höyryä, joten painetta säädellään paineenalennusventtiileillä. Öljynjalostusprosessi vaatii korkeimmillaan 10 baarin paineista höyryä. Yleensä höyry kuitenkin tuodaan korkeammassa paineessa kuin mitä vaaditaan. (Worrell and Galitsky, 2005.)

3.2 Vedyntuotanto

Vetyä voidaan valmistaa usealla eri tavalla, mutta ydinvoimaa hyödyntäen kaksi vaihtoehto on ylitse muiden. Yksi tapa on käyttää elektrolyysiprosessia, jossa nestemäinen vesi jaetaan vedyksi ja hapeksi. Tämä prosessi on ollut jo pidemmän aikaa yleisessä käytössä, mutta se vaatii suuria määriä sähköä. Elektrolyysiprosessi voidaan myös toteuttaa korkeissa lämpötiloissa yli 500°C, jolloin vesihöyry voidaan muuttaa vedyksi ja hapeksi. Kun prosessi toteutetaan suoraan vesihöyrystä korkeissa lämpötiloissa, se vaatii sähkön lisäksi suuria määriä lämpöä. (Khan, 2019; Salehi et al., 2021.)

Elektrolyysiprosessi vesihöyrystä korkeissa lämpötiloissa pienentää sähkönkulutusta verrattuna elektrolyysiprosessiin vedestä, sekä sen terminen hyötysuhde on yli tuplasti parempi. Vaikka tämä tapa onkin todettu paremmaksi keinoksi tuottaa vetyä, sitä ei ole vielä otettu käyttöön laajassa mittakaavassa ja sen ottaminen käytäntöön vaatii vielä lisätutkimusta. (Bo, Wenqiang, Jingming and Jing, 2010.)

Toinen tapa valmistaa vetyä on termokemiallisesti. Yleisin termokemiallinen tapa valmistaa vetyä on käyttää höyrymetaanireformointia. Tässä prosessissa maakaasun ja vesihöyryn avulla saadaan tuotettua vetyä ja hiilidioksidia. Maakaasu on kuitenkin mahdollista korvata rikkijodilla, kuparikloorilla tai kalsiumbromiraudalla, mikä mahdollistaa vedyn valmistuksen termokemiallisen prosessin avulla ilman hiilidioksidi päästöjä. Maakaasua hyödyntämällä saadaan kuitenkin paras prosessihyötysuhde sekä korkein energiatehokkuus. Termokemiallisiin menetelmiin vaaditaan 530-950°C lämpötila. (Salehi et al., 2021.)

3.3 Alumiinin tuotanto

Alumiinin valmistus prosessi on monivaiheinen. Ensimmäinen vaihe on alumiinioksidin valmistus: Alumiinioksidi syntyy, kun bauksiitti-nimistä mineraalia käsitellään natriumhydroksidin kanssa liuoksessa, jossa käytetään korkeaa painetta ja lämpötilaa. Tämän prosessin lämpötilavaatimukset ovat noin 90-270°C. (Tabereaux and Peterson, 2014, s. 841-845.)

Toinen vaihe on alumiinin kalsinointi. Alumiinin kalsinointi on prosessi, jossa alumiinioksidia muokataan tiettyyn muotoon tai rakenteeseen, joka sopii paremmin tiettyihin käyttötarkoituksiin. Kalsinointi tapahtuu yleensä korkeissa lämpötiloissa, joiden avulla alumiinioksidin rakenne muuttuu. Kalsinointiprosessissa alumiinioksidia kuumennetaan tyypillisesti noin 950-1250°C lämpötilaan. Tämän seurauksena alumiinioksidin kiteinen rakenne muuttuu ja sen ominaisuudet muuttuvat. Kalsinointi voi esimerkiksi poistaa vettä tai muita epäpuhtauksia alumiinioksidista, tai se voi muuttaa sen kiteistä rakennetta, mikä vaikuttaa sen ominaisuuksiin, kuten sen kovuuteen tai kulumiskestävyyteen. (Tabereaux and Peterson, 2014, s. 845-846.)

Kolmas vaihe on alumiinioksidin pelkistäminen. Se tapahtuu elektrolyysissä, joka vaatii korkeaa lämpötilaa. Alumiinioksidi upotetaan kryoliitti liuokseen. Suljetussa uunissa sähkövirta kulkee elektrodien läpi ja alumiinioksidi hajoaa alumiiniksi. Tämän prosessin vaatima lämpötila on noin 960-1000°C. (Tabereaux and Peterson, 2014, s. 846-857.)

Neljäs vaihe on alumiinin valmistaminen. Alumiinihiutalet sulatetaan ja muotoillaan erilaisiin muotoihin riippuen siitä, miten alumiinia käytetään. Alumiinin sulatusvaatimukset riippuvat käytettävästä menetelmästä ja muodosta, mutta yleensä sulatus tapahtuu noin 660°C

lämpötilassa, joka on alumiinin sulamispiste. Lopuksi on vielä alumiinin jälkikäsittely, mihin ei vaadita korkeita lämpötiloja. (Tabereaux and Peterson, 2014, s. 853-861.)

4 Ydinreaktorin ja teollisen prosessilaitoksen yhdistäminen

Kun mietitään ydinreaktorin ja teollisen prosessilaitoksen yhdistämistä on tärkeää miettiä, onko yhdistäminen mahdollista vai pitääkö lämpö kuljettaa pidemmän matkan päähän. Lämmönkuljetuksessa on otettava huomioon lämpöeristettyjen putkien rakentamisen ja ylläpidon kustannukset sekä mahdolliset lämpöhäviöt. Ihanteellinen vaihtoehto on sijoittaa ydinreaktori ja teollisuusprosessilaitos mahdollisimman lähelle toisiaan, mikä voi vähentää merkittävästi lämmönkuljetuskustannuksia ja -haittoja. (Csik and Kupitz, 1997.)

Turvallisuusriskit on myös huomioitava yhdistäessä ydinreaktoria teollisuusprosesseihin. Mahdollinen radioaktiivinen saastuminen täytyy ottaa huomioon. Se on kuitenkin onnistuttu välttämään kaukolämmöntuotannossa paine-erolla varustetuilla lämmönvaihtimilla. (Csik and Kupitz, 1997) Samaa voidaan myös hyödyntää, kun yhdistetään ydinreaktorin lämpö teollisuusprosesseihin.

Kaikki teollisuusprosessit tarvitsevat lämmön lisäksi myös sähköä, joten on järkevää myös miettiä, tuotetaanko ydinreaktorilla lämpöä, että sähköä vai pelkästään lämpöä teollisuuden tarpeisiin. (Csik and Kupitz, 1997.)

Alla olevaan taulukkoon 2. on koottu valittujen teollisuusprosessien vaatimat lämpötilat, yksittäisen prosessilaitoksen keskimääräinen tehontarve sekä teollisuusprosessiin parhaiten soveltuvat reaktorityypit. Seuraavissa kappaleissa käydään tarkemmin läpi ydinreaktorin yhdistämistä valittuihin teollisuusprosesseihin.

Taulukko 2. Teollisuusprosessit, lämpötilat, tehot ja soveltuvat reaktorityypit

Teollisuusprosessi	Prosessin vaatima lämpötila [°C]	Prosessilaitoksen vaatima keskimääräinen lämpöteho [MW]	Prosessiin parhaiten soveltuvat reaktorityypit
Sellun ja paperin tuotanto	180	30	PWR, BWR
Öljynjalostus	500	500	MSR, FNR, AGR, HTGR, GFR
Vedyn tuotanto	500-950	100	HTGR, GFR
Alumiinin tuotanto	960-1250	500	HTGR, GFR

4.1 Sellun ja paperin tuotanto

Sähkön kulutus sellun ja paperin tuotannossa on noin 90 kWh tuotettua tonnia kohden ja lämmön kulutus puolestaan 1600 MJ. (Pandey and Prakash, 2018) Sellun ja paperin tuotanto kuluttaa keskimäärin noin 30MW lämpöenergiaa laitosta kohden. (Peakman and Merk, 2019.)

4.1.1 Turvallisuusvaatimukset

Sellun ja paperin tuotannossa vapautuu paljon eri kemikaaleja eri valmistusprosessien aikana. Näistä kemikaaleista klooridioksidi, vetysulfaatti ja rikkihappo ovat hyvin vaarallisia, jos niitä ei käsitellä asianmukaisesti. Nämä kaasut ovat reaktiivisia kemikaaleja, mutta niiden läpäisykyky on heikko. (Singh and Chandra, 2019) Näiden kaasujen päätyminen ydinreaktoriin voi aiheuttaa turvallisuusriskin, mutta ne eivät pysty läpäisemään reaktorien perussuojarakenteita, joten ydinreaktorin rakentaminen sellu ja paperitehtaan läheisyyteen ei aiheuta suurta riskiä, jos noudatetaan turvallisuusohjeita.

4.1.2 Laitosjärjestelmien yhteensovittaminen

Sellun ja paperin tuotannossa tarvitaan lämpötiloja, jotka ovat alle 200°C kaikissa tuotannon vaiheissa. Tämän lämmön tuottaminen on mahdollista kaikilla ydinreaktoreilla.

Ydinreaktoria on jo hyödynnetty paperiteollisuuden lämmönlähteenä, Norjassa sijaitseva Halden kiehutusvesireaktori toimi paperitehtaan lämmönlähteenä kuusikymmentä vuotta (1958-2018). reaktorin tuottama lämpöteho oli 25MW ja sen tuottaman vesihöyryn lämpötila 240°C. Halden-reaktori oli pieni tutkimusreaktori, mutta sen toimintaa paperitehtaan lämmönlähteenä voidaan pitää hyvänä esimerkkinä tulevaisuuden hankkeille. (Broy, Wiesnack and Moen, 2001.)

Yleisessä käytössä olevat reaktorit teholuokaltaan merkittävästi suurempia kuin Halden-reaktori. Näin pienen kokoluokan reaktoreita ei ole juurikaan käytössä muuta kuin tutkimusreaktoreina. Kuitenkin kehitteillä olevista pienistä modulaarisista reaktoreista NuScale reaktori on kokoluokaltaan juuri sopiva tätä teollisuusprosessia varten. Toinen vaihtoehto on käyttää suurempia reaktoreita ja yhdistää reaktori myös sähköverkkoon, jolloin ylijäämä energia saadaan parhaiten hyödynnettyä. Kolmas vaihtoehto on yhdistää sellun ja paperin tuotanto osaksi jo olemassa olevaa kevytvesireaktoria, joka tuottaa samalla sähköä sähköverkkoon.

4.2 Öljynjalostus

Öljynjalostusprosessi vaatii hyvin suuria määriä lämpöä ja sähköä, yhtä öljytynnyriä kohden kuluu noin 200-300MJ energiaa, arvo vaihtelee riippuen mitä jalostetaan. (Szklo and Schaeffer, 2007) Yhden laitoksen vaatima lämpöteho on keskimäärin 500 MW. Nykyisissä öljynjalostamoissa lämpö tuotetaan pääosin maakaasun avulla, tuottaen merkittäviä määriä hiilidioksidi päästöjä. (Peakman and Merk, 2019.)

4.2.1 Turvallisuusvaatimukset

Öljynjalostamoista vapautuu paljon eri kemikaaleja, joiden päätyminen lähelle ydinreaktoria voi aiheuttaa turvallisuusriskin. Myös tulipalot sekä räjähdysonnettomuudet öljynjalostamoilla pitää huomioida. Verrattuna muihin teollisuuden aloihin ne ovat hyvin yleisiä ja voivat aiheuttaa vielä suuremman onnettomuuden, jos ydinreaktorit ovat sijoitettu lähelle jalostamoita. Tärkeintä on pitää ydinreaktori ja öljynjalostamo riittävän erillään toisistaan, jotta mahdollinen öljynjalostamolla tapahtuva tulipalo tai räjähdys ei pääse leviämään tai vaikuttamaan ydinreaktoriin. (Samia, Hamzi and Chebila, 2018.)

4.2.2 Laitosjärjestelmien yhteensovittaminen

Öljynjalostamiseen vaaditut lämpötilat vaihtelevat 150-500°C välillä eri tuotantovaiheesta riippuen. Nämä lämpötilat sopisivat hyvin natrium- tai lyijyjäähdytteisille nopeille reaktoreille. Samoin kuin sulasuola reaktoreille ja kaasujäähdytteisille reaktoreille. Nopeat reaktorit ovat kuitenkin teknisesti haastavia ja ne ovat pääosin vielä kehitysvaiheessa, joten niiden käyttöönotto teollisuudessa vaatii vielä lisätutkimusta.

2014 vuoden tutkimuksessa selvitettiin kevytvesireaktori-periaatteella toimivan SMR-reaktorin yhdistämistä öljynjalostusprosessin lämmönlähteeksi. Kyseisellä reaktorilla tuotettu lämpö ei kuitenkaan riitä kattamaan koko öljynjalostusprosessin lämpötilavaatimuksia, joten SMR-reaktoreiden ohella jouduttiin käyttämään maakaasulla toimivia lisälämmittämiä. Tällä tavoin maakaasun käyttö öljynjalostusprosessissa saatiin lähes puolitettyä ja sitä kautta hiilidioksidipäästöjä vähennettyä merkittävästi. Taloudelliset kustannukset nousivat kuitenkin moninkertaisiksi. Tutkimuksessa kuitenkin todettiin reaktorin yhdistäminen osaksi öljynjalostusprosessia kohtalaisen mutkattomaksi. Suurimmiksi haasteiksi todettiin sääntelyyn liittyvät sosiaalipoliittiset esteet, etenkin pelko mahdollisesta onnettomuudesta ydinreaktorin rakentamista öljynjalostamon läheisyyteen. Tutkimuksesta saatiin paljon hyödyllistä tietoa laitosjärjestelmien yhdistämisestä, samoja menetelmiä voidaan soveltaa myös toisen tyyppiin reaktoreihin. Pienet reaktorityypit todettiin kaikista helpoimmaksi ratkaisuksi, verrattuna isoihin laitoksiin, koska ne ovat helpompia asentaa ja niitä voidaan rankentaa useampia, jolloin koko tuotanto prosessia ei tarvitse pysäyttää yhden reaktorin kunnostamisen tai polttoaineen täytön ajaksi. (Ingersoll, Colbert, Bromm and Houghton, 2014.)

4.3 Vedyn tuotanto

Vedyn tuotanto elektrolyysiprosessin avulla nestemäisestä vedestä kuluttaa energiaa noin 60kWh tuotettua kilogrammaa kohden. (El-Shafie, Kambara and Hayakawa, 2019) Korkeissa lämpötiloissa vesihöyrystä energian kulutus on noin 30kWh. (Tenhumberg and Büker, 2020) Termokemiallisin menetelmin energian kulutus on noin 40kWh. (El-Emam, Ozcan and Zamfirescu, 2020) Yhden vedyntuotantolaitoksen keskimääräinen tehontarve on noin 100MW.

4.3.1 Turvallisuusvaatimukset

Onnettomuuksien välttämiseksi, on tärkeää, että ydinreaktori ja vedyntuotantolaitos on erillään toisistaan. Herkästi syttyvä vety voi aiheuttaa merkittävän turvallisuusriskin, jos sitä vapautuu reaktorin läheisyyteen. Turvallisen toiminnan takaamiseksi on määriteltävä ja tiukasti noudatettava turvallisuusetäisyyksiä vedyntuotantolaitoksen ja perusreaktorin välillä. Näin estetään räjähtävän vetykaasun pääsy rakennukseen. Turvallisuusetäisyyden lisäksi reaktorissa on oltava tehokas ilmanvaihtojärjestelmä, joka tukee erottelua. (Khan, 2019.)

Toinen mahdollinen turvallisuusriski on ydinreaktiossa syntyvän tritium. Tritium on vedyn radioaktiivin isotooppi, joka voi mahdollisesti kulkeutua veden tai vesihöyryn mukana osaksi vedyntuotantoprosessia. Jotta vetyä voi hyödyntää kaupallisissa prosesseissa on sen tritiumpitoisuus oltava riittävän alhainen. Tritiumin leviäminen pystytään estää käyttämällä TRISO-pinnoitettua hiukkaspolttoainetta reaktorissa. (Peakman and Merk, 2019.)

4.3.2 Laitosjärjestelmien yhteensovittaminen

Elektrolyysiprosessi matalissa lämpötiloissa onnistuu kaiken tyyppisillä reaktoreilla, jos reaktoria käytetään ainoastaan tuottamaan sähköä prosessia varten. Tässä tapauksessa vedyntuotantolaitoksen yhdistäminen onnistuu helposti ja se on mahdollista yhdistää nykyisiin ydinvoimaloihin. Vetyä voitaisiin tuottaa ruuhka-aikojen ulkopuolella, jolloin sähkön hinta olisi matalampi ja tuotanto kannattavaa. (Khan, 2019.)

Elektrolyysiprosessi korkeissa lämpötiloissa tai vedyn tuotanto termokemiallisin menetelmin sen sijaan mahdollistaisi ydinvoiman hyödyntämisen prosessin lämmönlähteenä, mikä lisäisi ydinreaktorin liittämistä kannattavammaksi. Eri reaktorityypeistä tähän sopisi sulasuolareaktorit tai kaasujäähdytteiset reaktorit. Sulasuolareaktori sekä kaasujäähdytteisistä reaktoreista GFR-reaktori sopisivat tuotetun lämpötilan suhteen hyvin, mutta niiden ollessa vielä kehitystyön alla, käyttöönotto olisi realistista vedyntuotannossa vasta myöhemmin tulevaisuudessa, siksi paras vaihtoehto tällä hetkellä olisi HTGR-reaktori. HTGR-reaktoria on jo prototyyppi tasolla kokeiltu vedyn tuotantoon termokemiallisin menetelmin Japanissa. Kokeilun aikana testattiin yli 100 erilaista prosessia, joista parhaiksi todettiin rikkijodin ja kuparikloorin käyttö. Rikkijodin käyttämiseen tarvitaan noin 950°C lämpötila, mikä voisi rajoittaa sulasuolareaktorin käyttöä tässä prosessissa. HTGR- ja GFR-reaktoreilla tähän

lämpötilaan kuitenkin päästään. Kuparikloorin käytössä vaadittu lämpötila oli alhaisempi, noin 530°C, mikä mahdollistaisi myös useamman eri reaktoriyyppin käytön. (European Nuclear Society, 2022.) Reaktorin liittäminen sähköverkkoon on kuitenkin tässäkin tilanteessa kannattava, jotta tuotantoa voidaan säädellä paremmin. (Khan, 2019) Vedyntuotanto termokemiallisin menetelmin maakaasua hyödyntäen on tällä hetkellä yleisempi käytäntö, sen ollessa tehokkaampi sekä edullisempi tapa tuottaa vetyä. Elektrolyysiprosessin tai termokemiallisin menetelmin rikkijodin tai kuparikloorin avulla kuitenkin pystyttäisiin luopumaan uusiutumattomista luonnon varoista sekä valmistamaan vetyä ilman hiilidioksidi päästöjä. (Stoots, O'Brien, Condie and Hartvigsen, 2010.)

4.4 Alumiinin tuotanto

Alumiinin valmistus vaatii yli 200 MJ energiaa tuotettua kilogramma kohden, mikä on Nikkelin ohella eniten energiaa tuotannon aikana vaativa metalli. (Rankin, 2012) Suurimmat alumiinin tuotantolaitokset vaativat yli 1000MW tehon.

4.4.1 Turvallisuusvaatimukset

Alumiinin tuotannossa yksi mahdollinen onnettomuusriski on, jos korkeassa lämpötilassa oleva sula alumiinin joutuu kontaktiin veden kanssa. Seurauksena syntyy suuria määriä vesihöyryä ja voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa räjähdysten. Tämä voi tapahtua, jos vesi pääsee alumiinin pelkistysvaiheessa elektrolyysiprosessin sisälle tai jos esilämmitystä ei suoriteta tarpeeksi hyvin. Kolmas mahdollinen tapa on sulan alumiinin vuotaminen ulos prosessista. (Chen et al., 2022) Mahdollinen räjähdys voi aiheuttaa suuren turvallisuusriskin, jos ydinreaktori on sijoitettu liian lähelle alumiinin tuotanto prosessia.

4.4.2 Laitosjärjestelmien yhteensovittaminen

Ydinreaktoreita ei ole tällä hetkellä käytössä alumiinin valmistuksen lämmönlähteenä, vaan alumiinin kuten muidenkin metallien valmistuksessa käytetään yleisimmin maakaasua. Alumiinin valmistuksessa tarvitaan hyvin korkeita lämpötiloja, korkeimmillaan jopa yli 1000°C. Eri ydinreaktori tyypeistä, ainoastaan kaasujäähdytteiset reaktorit voisivat toimia prosessin

lämmönlähteenä, mutta jopa niiden tuottamat lähes 1000°C lämpötilat eivät välttämättä riitä koko prosessin eri vaiheiden lämmönlähteeksi. Jos halutaan täysin puhdasta alumiinia, kalksinointi prosessi vaatii lähes 1300°C lämpötilan. Suurin osa tuotetusta alumiinista ei kuitenkaan ole täysin puhdasta, joten matalammat lämpötilat yleensä riittävät. Lämpö voidaan myös osittain tuottaa ydinreaktorilla ja sen lisäksi voi olla jokin muu lämmityskeino, jolla saadaan nostettua lämpötila riittävän korkeaksi. (Lumley, 2011.)

Alumiinin valmistusprosessi vaatii muutakin kuin lämpöä, etenkin alumiinioksidin pelkistysprosessi vaatii korkean lämmön lisäksi suuria määriä sähköä (Lumley, 2011), joten ydinreaktoria kannattaa hyödyntää myös prosessilaitoksen sähköntuotantoon.

4.5 Yli 1000°C Vaativat teollisuusprosessit

Yli 1000°C lämpötiloja vaativia teollisuusprosesseja on esimerkiksi lasin, sementin, keramiikan ja eri metallien valmistus. Noin viidesosa kaikesta teollisuusprosessien käyttämästä lämmöstä vaatii yli 1000°C lämpötiloja. Tällä hetkellä ei ole kehitetty ydinreaktoria, jolla päästäisiin näihin lämpötiloihin ja lämpö saadaankin pääosin maakaasun kivihiilen tai öljyn avulla. (Peakman and Merk, 2019.)

Ydinreaktorien hyödyntäminen ei kuitenkaan ole täysin poissuljettu ratkaisu näiden teollisuusprosessien suhteen. Ydinreaktorin tuottamaa lämpöä pystytään nostamaan muilla keinoilla, esimerkiksi fossiilisia polttoaineita hyödyntäen, jolloin suurin osa lämmöstä tuotettaisiin kuitenkin ydinvoimalla ja näin saataisiin hiilidioksidipäästöjä vähennettyä. Toinen vaihtoehto on käyttää vetyä lämmönlähteenä, jolloin ydinreaktorin avulla toimiva vedyntuotantolaitos yhdistettäisiin näihin yli 1000°C vaativiin teollisuuslaitoksiin. (Peakman and Merk, 2019.)

5 Ydinreaktorin hyödyt ja haasteet teollisuuden lämmönlähteinä

Ydinreaktorit ovat yksi lupaavimmista teollisuuden lämmönlähteistä tulevaisuudessa, sillä ne tarjoavat suuren määrän energiaa ja ne ovat tehokkain tapa tuottaa energiaa ilman hiilidioksidipäästöjä. Ydinreaktorit voivat tuottaa sähköä, lämpöä ja höyryä, joita käytetään laajasti eri teollisuudenaloilla, kuten kemikaalien, öljynjalostuksen, paperinvalmistuksen ja eri metallien tuotannossa.

Ydinreaktorit ovat myös ympäristöystävällisiä, koska ne tuottavat vähemmän päästöjä kuin perinteiset fossiilisia polttoaineita käyttävät lämmönlähteet, kuten kivihiili, öljy tai maakaasu. Tämä auttaa yrityksiä vähentämään hiilidioksidipäästöjään ja niiden ympäristövaikutuksia. Ydinreaktorien tuottama energia on myös riippumatonta fossiilisten polttoaineiden hinnanvaihteluista, mikä tekee niistä vakaa hintaisen lämmönlähteen yrityksille, jotka haluavat ennustettavissa olevia kustannuksia.

Ydinreaktorit ovat erittäin luotettavia lämmönlähteitä, koska ne voivat toimia jatkuvasti pitkiä aikoja ilman huoltotaukoja. Tämä tekee niistä erityisen houkuttelevia yrityksille, jotka tarvitsevat jatkuvaa ja luotettavaa lämmönlähdettä. Haasteena on kuitenkin reaktorin käynnistämiseen ja pysäyttämiseen liittyvät seikat. Ydinreaktorin pysäyttäminen on hankalampaa ja voi vaatia enemmän aikaa riippuen reaktorityypistä. Tämä tarkoittaa sitä, että jos teollisuusprosessi vaatii välitöntä pysäyttämistä, on otettava huomioon, minne ydinreaktorin tuottama energia johdetaan pysäyttämisen ajaksi. Tämä on ongelma, joka ei esiinny muilla energiantuotantomuodoilla, kuten fossiilisilla polttoaineilla. Siksi tämä on ydinvoiman käyttöön liittyvä erityinen haaste, kun on tarpeen pysäyttää teollisuusprosessi nopeasti ja tehokkaasti.

On myös tärkeää huomioida myös ydinreaktorien turvallisuuteen liittyvät kysymykset. Ydinreaktorien käyttö edellyttää tiukkoja turvallisuusvaatimuksia, ja niiden toiminnan on oltava valvottua. Verrattuna muhin energiantuotantotapoihin, ydinreaktorin yhdistäminen osaksi teollisuusprosessia vaati huomattavasti enemmän suunnittelua ja turvatoimia, mikä lisää kustannuksia sekä voi pidentää tuotannon aloittamiseen kuluvaan aikaa. Esimerkiksi vedyntuotannossa maakaasun hyödyntäminen lämmönlähteenä on edullisempaa sekä yksinkertaisempaa, minkä seurauksena se on yrityksille hyvin houkutteleva vaihtoehto.

6 Johtopäätökset

Tässä kandidaatintyössä tarkasteltiin erilaisia ydinreaktorityyppejä ja niiden soveltuvuutta eri teollisuusprosesseihin. Tutkimuksessa saatiin selville että kevytvesi-, kaasujäähdytteiset, nopeat ja sulasuolareaktorit ovat kaikki potentiaalisia lämmönlähteitä, ja niiden soveltuvuus eri teollisuusprosesseihin riippuu prosessin eri vaiheiden vaatimista lämpötiloista sekä vaaditusta energiamäärästä. Kaikista lupaavimmaksi ratkaisuksi tulevaisuuden hankkeille todettiin vielä kehitteillä olevat pienet modulaariset reaktorit, pienen koon lisäksi niiden odotetaan olevan helpompia ja nopeampia asentaa sekä niiden asennus ja huoltokustannusten odotetaan olevan alhaisemmat. Isot laitokset eivät kuitenkaan ole täysin poissuljettu vaihtoehto, ne luovat mahdollisuuden hyödyntää ydinreaktoreita teollisuuden lämmönlähteinä jo tänä päivänä sekä niiden käyttöönoton kustannukset ovat helposti arvioitavissa.

Työssä tarkasteltiin neljää eri lämpötila-alueen teollisuusprosessia: sellun ja paperin tuotantoa, öljyn jalostamista, vedyn tuotantoa ja alumiinin tuotantoa. Kaikissa valituissa prosesseissa ydinreaktorin hyödyntäminen on mahdollista, mutta kaikissa on omat haasteensa sekä jatkotutkimusta aiheesta on tehtävä lisää. Vaikka maakaasu todettiin olevan edelleen kustannustehokkain tapa tuottaa lämpöä teollisuuden tarpeisiin, ydinreaktorien hyödyntäminen lämmönlähteenä näissä prosesseissa voisi vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista

Lopuksi työssä käsiteltiin ydinreaktorien hyötyjä teollisuusprosessien lämmönlähteenä. Ydinreaktorit tarjoavat luotettavan, turvallisen ja vähäpäästöisen vaihtoehdon perinteisille polttoaineille, ja niiden käyttö voisi auttaa teollisuutta saavuttamaan kestävän kehityksen tavoitteet. Kuitenkin ydinreaktorien käyttö teollisuuden lämmönlähteenä vaatii huolellista suunnittelua ja yhteistyötä reaktorin ja prosessilaitoksen välillä.

Lähteet

- Anzieu P, Stainsby R and Mikityuk K (2009) Gas-cooled fast reactor (GFR): overview and perspectives. *Paris, France 9-10 September 2009* 127.
- Aoto, K., Dufour P, Hongyi Y, Glatz JP, Kim Y, Ashurko Y et al., (2014) *A Summary of Sodium-Cooled Fast Reactor Development*. Oxford; Elmsford, NY: Pergamon.
- Bajpai, P. *Basic Overview of Pulp and Paper Manufacturing Process*. Cham: Springer International Publishing.
- Ball SJ, Holcomb DE and Cetiner SM (2012). *HTGR Measurements and Instrumentation Systems*.
- Bo, Y., Wenqiang Z, Jingming X and Jing C, (2010) *Status and Research of Highly Efficient Hydrogen Production through High Temperature Steam Electrolysis at INET*. Oxford New York: Pergamon.
- Brännvall E (2009) Overview of pulp and paper processes. *Pulping Chemistry and Technology 2*: 1-13.
- Broy Y, Wiesenack W and Moen LA (2001) The OECD Halden Reactor Project-international research on safety and reliability of nuclear power generation.
- Brunel L, Chauvin N, Mizuno T, Pauchon MA and Somers J (2009) THE GENERATION IVPROJECT “GFR FUEL AND OTHER CORE MATERIALS”. *Paris, France 9-10 September 2009*: 135.
- Buongiorno Jand MacDonald P (2003) Supercritical water reactor (SCWR). *Progress Report for the FY-03 Generation-IV R&D Activities for the Development of the SCWR in the US, INEEL/Ext-03-03-01210, INEEL, USA, September*.
- Chen, Y., Sun Z, Hou Y, Gao D and Li Z, (2022) *Hazard Identification & Risk Control in Aluminum Production*. Rugby, Warwickshire: Institution of Chemical Engineers.
- Csik BJand Kupitz J (1997) Nuclear power applications: Supplying heat for homes and industries. *IAEA Bulletin* 39(2): 2125.
- Elder Rand Allen R (2009) Nuclear heat for hydrogen production: Coupling a very high/high temperature reactor to a hydrogen production plant. *Progress in Nuclear Energy* 51(3): 500-525.
- El-Emam, R., Ozcan H and Zamfirescu C, (2020) *Updates on Promising Thermochemical Cycles for Clean Hydrogen Production using Nuclear Energy*. Oxford: Elsevier Science Ltd.
- El-Shafie M, Kambara S and Hayakawa Y (2019) Hydrogen production technologies overview.

- European Nuclear Society, *Hydrogen as a Clean Energy Vector -the Potential Role of Nuclear Energy*. (2022).
- Ignatiev VV, Feynberg OS, Zagnitko AV, Merzlyakov AV, Surenkov AI, Panov AV, Subbotin VG, Afonichkin VK, Khokhlov VA and Kormilitsyn MV (2012) Molten-salt reactors: new possibilities, problems and solutions. *Atomic Energy* 112: 157-165.
- Ingersoll DT, Colbert C, Bromm Rand Houghton Z, (2014) *NuScale Energy Supply for Oil Recovery and Refining Applications*. Proc. ICAPP 1-8.
- Khan, S.U. (2019) *Using Next Generation Nuclear Power Reactors for Development of a Techno-economic Model for Hydrogen Production*. Chichester.
- Locatelli G, Bingham C and Mancini M (2014) Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects. *Progress in Nuclear Energy* 73: 75-85.
- Lumley R (2011) *Fundamentals of Aluminium Metallurgy Production, Processing and Applications*. Oxford: Woodhead.
- Michaelson, D. and Jiang J, (2021) *Review of Integration of Small Modular Reactors in Renewable Energy Microgrids*. Amsterdam: Elsevier Science.
- Nonboel E (1996) Description of the advanced gas cooled type of reactor (AGR).
- Pandey AK and Prakash R (2018) Energy conservation opportunities in pulp & paper industry. *Open Journal of Energy Efficiency* 7(04): 89.
- Peakman, A. and Merk B, (2019) *The Role of Nuclear Power in Meeting Current and Future Industrial Process Heat Demands*. Basel, Switzerland: Molecular Diversity Preservation International.
- Petroleum Refining Process Control and Real-Time Optimization*. (2006) New York, N.Y. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Rankin J (2012) *Energy use in Metal Production*. Proceedings of the High Temperature Processing Symposium 6-7.
- Salehi, A.A., Ghannadi-Maragheh M, Torab-Mostaedi M, Torkaman R and Asadollahzadeh M, (2021) *An Overview of Sustainable Energy Development by using Cogeneration Technology and Opportunity for Improving Process*. Chichester.
- Samia C, Hamzi R and Chebila M (2018) Contribution of the lessons learned from oil refining accidents to the industrial risks assessment. *Management of Environmental Quality: An International Journal*.
- Serp J, Allibert M, Beneš O, Delpech S, Feynberg O, Ghetta V, Heuer D, Holcomb D, Ignatiev V, Kloosterman JL, et al. (2014) The molten salt reactor (MSR) in generation IV: Overview and perspectives. *Progress in Nuclear Energy (New Series)* 77: 308-319.
- Singh, A.K. and Chandra R, (2019) *Pollutants Released from the Pulp Paper Industry: Aquatic Toxicity and their Health Hazards*. Amsterdam; New York: Elsevier Science.

Stoots, C.M., O'Brien J.E., Condie KG and Hartvigsen JJ, (2010) *High-Temperature Electrolysis for Large-Scale Hydrogen Production from Nuclear Energy – Experimental Investigations*. Oxford; New York: Pergamon.

Szklo Aand Schaeffer R (2007) Fuel specification, energy consumption and CO₂ emission in oil refineries. *Energy* 32(7): 1075-1092.

Tabereaux AT and Peterson RD, (2014) *Aluminum production*. In: Anonymous Treatise on Process Metallurgy: Elsevier, 839-917.

Tenhumberg, N. and Bükler K, (2020) *Ecological and Economic Evaluation of Hydrogen Production by Different Water Electrolysis Technologies*. Weinheim: Verlag Chemie.

TVO, (2010), Ydinvoimalatoisyksikkö Olkiluoto 3

TVO, (2007), Ydinvoimalaitosyksiköt Olkiluoto 1 ja Olkiluoto.

Vujić, J., Bergmann RM, Škoda R and Miletić M, (2012) *Small Modular Reactors: Simpler, Safer, Cheaper?* Oxford.

Worrell Eand Galitsky C (2005) Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for petroleum refineries.