SMR TEKNIIKAN HYÖDYNTÄMINEN TERÄSTEOLLISUUDESSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2025

Henri Nivala

Tarkastaja: TkT Ville Rintala

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT energiajärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Henri Nivala

SMR tekniikan hyödyntäminen terästeollisuudessa

Energiatekniikan kandidaatintyö

2025

35 sivua, 7 kuvaa, 3 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastaja: TkT Ville Rintala

Avainsanat: SMR, terästeollisuus

Terästeollisuus on yksi suurimmista hiilidioksidipäästöjen ja sähkönkulutuksen lähteistä, mikä korostaa energiatehokkaiden ratkaisuiden tarvetta. Yksi potentiaalinen vaihtoehto terästehtaiden korkeaan energian tarpeeseen olisi pienen modulaarisen reaktorin (SMR) hyödyntäminen terästeollisuudessa. Työssä keskitytään erityisesti rahoituksen haasteisiin ja eri tekniikoilla toimivien reaktorien taloudelliseen kannattavuuteen, jonka arviointiin käytetään kannattavuuslaskelmia.

Laskelmat osoittavat, että pitkälle kehitettyjen vesijäähdytteisten reaktorien rakentaminen on moninkertaisesti kannattavampaa verrattuna uudempiin teknologioihin. Tämä johtuu vesijäähdytteisten reaktorien laajemmasta tutkimustaustasta ja aiempien pienimittakaavaisten reaktoriprojektien tuomista kokemuksista. Kannattavuuteen vaikuttavat merkittävästi myös rakennuskustannukset sekä käyttö- ja kunnossapitokustannukset, jotka vaihtelevat huomattavasti eri teknologioiden välillä.

SMR-laitoksien käyttöä terästeollisuuden ja muiden teollisuudenalojen tarpeisiin tutkitaan yhä laajemmin, mikä luo uusia mahdollisuuksia ja tuo esiin uusia haasteita. Projektien eteneminen edellyttää kuitenkin merkittäviä investointeja, sillä erityisesti uudempien teknologioiden käyttöönottaminen sisältää taloudellisia riskejä. Näiden riskien hallinta ja rahoituksen varmistaminen ovat keskeisiä tekijöitä, jotka määrittävät SMR-teknologian menestyksen teollisessa mittakaavassa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Henri Nivala

Utilization of SMR technology in the steel industry

Bachelor's thesis

2025

35 pages, 7 figures, 3 tables and 4 appendices

Examiner: D.Sc. Ville Rintala

Keywords: SMR, steel industry

Steel industry is one of the largest sources of carbon dioxide emissions and electricity consumption, highlighting the need for energy-efficient solutions. One potential option to address the high energy demand of steel plants is the utilization of small modular reactors (SMRs). This thesis focuses particularly on the financial challenges and economic feasibility of reactors operating with various technologies, assessed through profitability calculations.

The calculations indicate that the construction of advanced water-cooled reactors is significantly more cost-effective compared to newer technologies. This is due to the broader research background of water-cooled reactors and the experience gained from previous small-scale reactor projects. Profitability is also significantly influenced by construction costs as well as operational and maintenance expenses, which vary considerably between different technologies.

The use of SMR facilities to meet the needs of the steel industry and other industrial sectors is being increasingly explored, creating new opportunities and revealing new challenges. However, the progress of such projects requires substantial investments, particularly since adopting newer technologies involves financial risks. Managing these risks and securing financing are critical factors that will determine the success of SMR technology on an industrial scale.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

I	Investointi	€
i	Laskentakorko	%
JA_n	Jäännösarvo	€
n	Pitoaika	a
NA	Hankkeen nykyarvo	€
S_t	Vuotuinen nettosäästö	€/a

Dimensiottomat luvut

$a_{n/i}$	Jaksollisten maksujen nykyarvotekijä

Lyhenteet

BWR	kiehutusvesireaktori (Boiling water reactor)
CO_2	hiilidioksidi
DRP	rautamalmin suorapelkistys (Direct Reduction Plant)
EAF	valokaariuuni (Electric Arc Furnace)
GFR	kaasujäähdytteinen nopea reaktori (Gas-cooled fast reactor)
HALEU	matalasti väkevöity uraani, jonka U-235 osuus on 5-20% (High-Assay Low-Enriched Uranium)
HTGR	korkean lämpötilan kaasujäähdytteinen reaktori (High temperature gas-cooled reactor)
iPWR	integroitu painevesireaktori (Integral pressurized water reactor)
LBE	lyijy-vismutti-kylmäseos (Lead-bismuth eutectic)
LMFR	nestemetallijäähdytteinen nopea reaktori (Liquid-metal fast reactor)
LWR	kevytvesireaktori (Light water reactor)
MHTGH	modulaarinen korkean lämpötilan kaasujäähdytteinen reaktori (Modular high temperature gas-cooled reactor)
MOX	sekaoksidipolttoaine (Mixed Oxide Fuel)
MR	mikroreaktori (Micro reactor)
MSR	sulasuolareaktori (Molten salt reactor)
NSSS	ydintekniset lämmönkehitysjärjestelmät (Nuclear steam supply system)
OSM	happipuhallusmasuunikaasu (Basic oxygen steelmaking)
PWR	painevesireaktori (Pressurized water reactor)
SFR	natriumjäähdytteinen nopea reaktori (Sodium-cooled fast reactor)
SMR	pieni modulaarinen ydinreaktori (Small modular reactor)
SOEC	kiinteäoksidielektrolyysi (Solid Oxide Electrolysis Cell)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto ... 8
2 Pienet modulaariset reaktorit ... 9
2.1 Vesijäähdytteiset reaktorit ... 11
2.2 Kaasujäähdytteiset reaktorit ... 13
2.3 Nestemetallijäähdytteiset reaktorit ... 14
2.4 Sulasuola reaktorit ... 16
3 Teräksen tuotanto ... 19
3.1 Masuuni ... 19
3.2 Konvertteri ... 21
3.3 Valokaariuuni ... 22
4 SMR:n mahdolliset hyödyntämistavat terästeollisuudessa ... 23
4.1 Energian tuotanto ... 23
4.2 Prosessilämpö ... 23
4.3 Talouslaskenta ... 24
5 Kannattavuus ... 27
5.1 Talous ... 27
5.2 Ympäristövaikutukset ja turvallisuus ... 28
5.3 Haasteet ... 28
6 Yhteenveto ... 30
Lähteet ... 32

Liitteet

Liite 1. SMR-300 hankkeen kannattavuus

Liite 2. SMART-reaktorin kannattavuus

Liite 3. EM2-reaktorin kannattavuus

Liite 4. SEALER-55 reaktorin kannattavuus

1 Johdanto

Terästeollisuus on merkittävä sektori maailmanmarkkinoilla, mutta sen ongelmana on korkea energiantarve ja suuret CO_2 päästöt. Merkittävin teräksen tuotantomenetelmä on masuuni, joka on hiilipohjainen valmistusmenetelmä, mikä selittää suuret päästöt. Teräksen tuotannon päästöjen vähentäminen on merkittävässä roolissa Pariisin ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi ja siihen on kehitteillä useita eri ratkaisuja (Xi, Wu, Chen & Sha 2021). Tämä tutkimus keskittyy siihen, kuinka pieniä modulaarisia reaktoreita (SMR) voidaan hyödyntää teräksen valmistuksessa.

Tutkimuksessa selvitetään, miten SMR-teknologiat voivat tarjota sekä taloudellisesti että teknologisesti kilpailukykyisen ratkaisun terästeollisuuden energiantarpeisiin. Työssä tehdyt talouslaskelmat osoittavat, mitkä SMR-teknologiat ovat taloudellisesti kannattavimpia ja mitkä tekijät vaikuttavat eniten niiden soveltuvuuteen. Työssä keskitytään SMR-teknologioiden potentiaaliin energian tuotannossa ja niiden merkitykseen hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä.

Seuraavassa kappaleessa tarkastellaan yleisimpiä SMR-laitoksia sekä kerrotaan niiden peruspiirteistä, toimintatavoista ja turvallisuusmenetelmistä. Kolmannessa kappaleessa tarkastellaan teräksentuotantoprosessia yleisimpien teräksentuotanto menetelmien kautta. Tarkastelussa otetaan huomioon niiden peruspiirteet ja tarkastellaan niiden CO_2 päästöjä. Neljännessä kappaleessa pohditaan mikä tai mitkä esitetyistä SMR:stä voitaisiin ottaa mukaan teräksen tuotantoon ja miten niitä voisi hyödyntää. Viidennessä kappaleessa tutkitaan, kuinka kannattavaa SMR:n hyödyntäminen lopulta olisi. Kannattavuutta tarkastellaan talouden, päästöjen vähentämisen ja turvallisuuden kannalta sekä lopuksi mietitään, mitä haasteita SMR:ien hyödyntämiseen terästeollisuudessa kohdistuu.

2 Pienet modulaariset reaktorit

Pienistä modulaarisista reaktoreista (SMR) ei ole olemassa tarkasti määriteltyä teholuokkaa, mutta käytännössä niiden sähköntuotantokapasiteetti sijoittuu noin 10–300 megawatin välille. Tämä tehoalue on syntynyt pitkälti käytännön vaatimuksista: alaraja takaa, että reaktori pystyy vastaamaan teollisuuden energiatarpeisiin, ja yläraja puolestaan mahdollistaa sen, että laitokset voidaan valmistaa sarjatuotannossa ja ottaa käyttöön vaiheittain esimerkiksi pienemmissä sähköverkoissa. (Ingersoll, Carelli 2021.)

SMR-reaktorien merkittävä etu perinteisiin reaktoreihin verrattuna on niiden kompakti koko. Pienempi koko tekee niistä helpommin sijoitettavia esimerkiksi teollisuusalueelle, missä tilaa on rajoitetusti. Rakennusaika voi myös lyhentyä, jos laitokset toimitetaan valmiina moduuleina, ja kuljetettavuus helpottaa käyttöönottoa erityisesti syrjäisemmillä alueilla. (IAEA 2022.)

Toisaalta teknologian kehitykseen liittyy myös haasteita. Useat SMR-reaktorit käyttävät polttoaineena HALEU:ta (High-Assay Low-Enriched Uranium), joka ei ole vielä laajasti saatavilla kaupallisesti. Lisäksi esimerkiksi lupaprosessit ja toimitusketjujen rakentaminen ovat vielä monin paikoin kesken, ja nämä seikat hidastavat uuden teknologian yleistymistä. Haasteita on myös yleisessä hyväksynnässä, sillä uudenlaisten ydinlaitosten käyttöönotto vaatii yhteiskunnallista luottamusta. (OECD, NEA 2021.)

SMR-teknologia herättää silti paljon kiinnostusta ympäri maailmaa. Tällä hetkellä kehitteillä on kymmeniä eri reaktorimalleja, ja ne eroavat toisistaan muun muassa siinä, millaista jäähdytysratkaisua ne käyttävät. Yleisimmät jäähdytystavat ovat vesi-, kaasu-, nestemetalli- ja sulasuolajäähdytys, ja valinta vaikuttaa paitsi turvallisuuteen myös käyttötarkoitukseen ja tehokkuuteen. (IAEA 2022). Taulukossa 1 esitelty osa suunnitteilla olevista pienistä reaktoreista.

Taulukko 1. Suunnitteilla olevat pienet reaktorit (Ingersoll, Carelli 2021.)

Reaktorin malli	Sähköteho [MWe]	Tyyppi	Jäähdytinaine	Suunnitteleva valtio	Suunnittelija
CAREM	30	iPWR	Vesi	Argentiina	CNEA
NuScale	60	PWR	Vesi	Yhdysvallat	NuScale Power
RITM-200N	55	iPWR	Vesi	Venäjä	OKBM
SMR-300	300	PWR	Vesi	Yhdysvallat	Holtec
SMART	110	iPWR	Vesi	Etelä-Korea	KAERI, KHNP, KA-CARE
KARAT-45	50	BWR	Vesi	Venäjä	NIKIET
STAR	10	Paineputki LWR	Vesi	Sveitsi	STAR ENERGY SA
OPEN20	22	PWR	Vesi	Yhdysvallat	Last Energy Inc.
VK-300	250	BWR	Vesi	Venäjä	NIKIET
HTMR100	35	HTGR	Helium	Etelä-Afrikka	STL Nuclear (Pty) Ltd.
FMR	50	GFR	Helium	Yhdysvallat	General Atomics
HTR-10	2.5	HTGR (sorakerros)	Helium	Kiina	INET, Tsing-huan yliopisto
EM2	265	GFR	Helium	Yhdysvallat	General Atomics
4S	10	LMFR (allas)	Natrium	Japani	Toshiba
Mic-roURANUS	20	MR	Lyijy-vismutti	Etelä-Korea	UNIST
SVBR-100	100	LMFR	Lyijy-vismutti	Venäjä	JSC EDB
SEALER-55	55	LMFR	Lyijy	Ruotsi	LeadCold
IMSR400	195	MSR	Sulasuola	Kanada	Terrestrial Energy Inc.
CMSR	100	MSR	Sulasuola	Tanska	Seaborg Techno-logies ApS
SSR-U	16	MSR	Sulasuola	Iso-Britannia	Moltex Energy

SMR-teknologioiden laaja kirjo ja samanaikainen kehitystyö aiheuttaa epävarmuutta niiden tulevasta kaupallisesta läpimurrosta. Tämän vuoksi investointien tekeminen on haastavaa, mikä voi hidastaa teknologian laajempaa käyttöönottoa. Yksi merkittävimmistä esteistä kaupallistamiselle on se, että ei ole selvää, mitkä teknologiat lopulta saavuttavat markkinoilla hyväksynnän. Lisäksi kansainvälisten sääntely- ja lupaprosessien yhteensovittaminen on vielä kesken, joka vaikeuttaa uusien reaktorimallien hyväksyntää ja hidastaa niiden

käyttöönottoa monilla markkina-alueilla (OECD, NEA 2023). Näihin haasteisiin palataan tarkemmin työn luvussa 5.

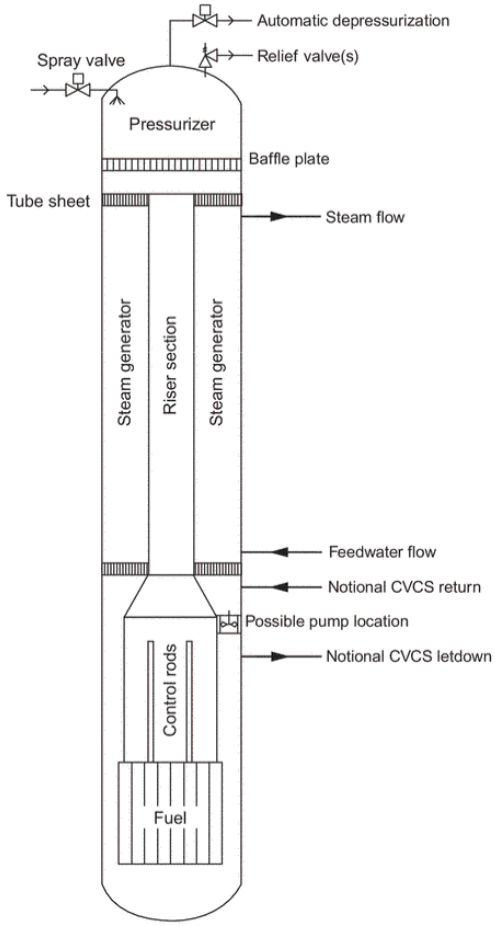
2.1 Vesijäähdytteiset reaktorit

Valtaosa maailman toimivista ydinreaktoreista on vesijäähdytteisiä, mikä tekee tästä teknologialuokasta selvästi yleisimmän ja parhaiten tutkituimman. Suurin osa SMR-projekteista perustuu kevytvesijäähdytykseen, koska sen toimintaperiaatteet ja turvallisuusratkaisut tunnetaan hyvin laajasta kokemuksesta suurissa paine- ja kiehutusvesireaktoreissa. (Ingersoll & Carelli 2021.) Kevytvesi toimii sekä jäähdytysaineena että neutronien hidastajana, mikä tekee siitä teknisesti ja taloudellisesti houkuttelevan valinnan. Raskasvettä hyödyntävät ratkaisut ovat sen sijaan harvinaisempia, sekä perinteisten että kehitettävien reaktorien osalta. (IAEA 2022.)

Vaikka jäähdytysaineena käytetään samaa materiaalia, yksittäisten vesijäähdytteisten SMR-reaktoreiden rakenteissa on huomattavia eroja. Yleisesti käytössä olevat rakenteet voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin: perinteinen kiertopiirisuunnittelu, jossa höyrystimet liitetään reaktoripaineastiaan ulkoisilla putkilla; kompakti kiertopiirisuunnittelu, jossa höyrystin on liitetty suoraan paineastiaan ja integroitu painevesireaktori (iPWR), jossa primääripiirin kaikki keskeiset osat on sijoitettu samaan reaktoriastiaan. (Ingersoll & Carelli 2021.) Taulukosta 1 voidaan huomata, että suurimmassa osassa suunnitteilla olevista vesijäähdytteisistä SMR-reaktoreista käytetään PWR-teknologiaa ja vain murto-osassa hyödynnetään BWR-teknologiaa.

iPWR-teknologia on noussut merkittävään asemaan SMR-kehityksessä. Reaktori on suunniteltu siten, että kaikki tärkeimmät jäähdytysjärjestelmän osat – kuten höyrystin ja paineistin – sisältyvät paineastiaan. Tämä rakenneratkaisu mahdollistaa suuremman jäähdytysvesimäärän suhteessa laitoksen lämpötehoon verrattuna perinteisiin suuriin PWR-laitoksiin. Suurempi vesivolyymi edistää passiivista turvallisuutta, vähentää tarvetta monimutkaisille aktiivisille turvajärjestelmille sekä lisää ohjaushenkilökunnan reagointiaikaa häiriötilanteissa. (Ingersoll & Carelli 2021.)

Yleinen iPWR-pohja ja pääkomponentit ovat esitettynä kuvassa 1.



Kuva 1. Yleiset iPWR komponentit (Ingersoll, Carelli 2021, 97.)

Suunnittelullisesti iPWR-reaktoreissa säilytetään monia samoja periaatteita kuin suurissa painevesireaktoreissa, kuten polttoainekokoonpanot, säätösauvat ja vesikierron järjestelmä. Rakenne kuitenkin optimoidaan pienempään kokoon siten, että paineastian tilavuus on pienempi, mutta korkeus–halkaisija-suhde suurempi (yleisesti 4–7 verrattuna suurien PWR-laitosten 2–2,5 arvoon). Tämä edistää luonnollista kiertoa ja voi joissain malleissa mahdollistaa jopa passiivisen jäähdytyksen normaalikäytön aikana. (Ingersoll & Carelli 2021.)

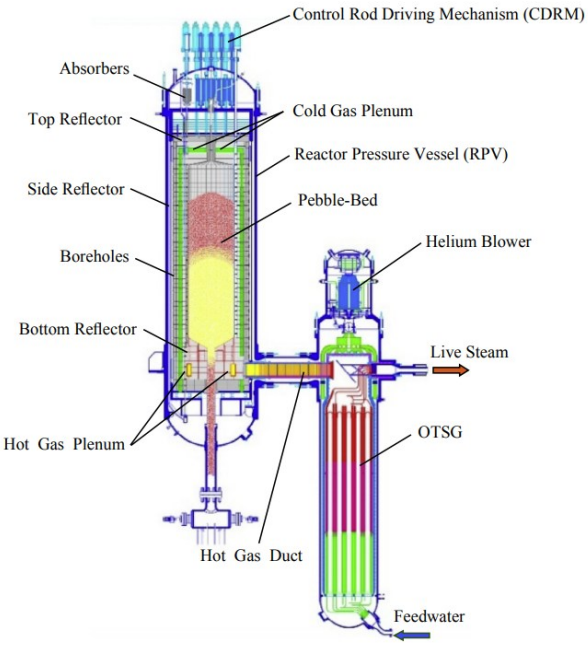
Kokonaisuudessaan vesijäähdytteiset pienreaktorit edustavat teknologisesti kypsintä ja kaupallisesti lähimpänä käyttöönottoa olevaa SMR-ryhmää. Niiden kehityksessä yhdistyy hyväksi todettu teknologia, vuosikymmenten käyttökokemus ja nykyteknologian mahdollistamat turvallisuusparannukset.

2.2 Kaasujäähdytteiset reaktorit

Modulaarinen korkean lämpötilan kaasujäähdytteinen reaktori (MHTGR) edustaa pienreaktoriteknologiaa, jossa yhdistyvät alhainen tehotiheys, suuri lämpökapasiteetti ja yksinkertainen rakenteellinen toteutus. Näiden ominaisuuksien ansiosta reaktori kykenee passiiviseen lämmönhallintaan ja luontaisesti turvalliseen toimintaan. MHTGR-reaktoreiden tehotiheys on tyypillisesti noin 3 MW/m³, ja niiden suunnittelussa on pyritty rajoittamaan inhimillisten virheiden vaikutuksia käyttämällä selkeää geometriaa ja vähentämällä järjestelmien monimutkaisuutta. (Dong et al. 2018.)

Reaktorin ytimen rakenne perustuu TRISO-partikkelipolttoaineeseen, joka kestää hyvin korkeita lämpötiloja, ja sen jäähdytysaineena käytetään heliumia. Grafiittia hyödynnetään sekä neutronien hidastimena että rakenteellisena materiaalina. Heliumin kemiallinen inerttiys ja grafiitin lämpökestävyys tekevät reaktorista erityisen soveltuvan korkealämpöisiin käyttötarkoituksiin. Useasta MHTGR-yksiköstä voidaan rakentaa niin kutsuttu multimodulaarinen ydinvoimalaitos, jossa useat reaktorimoduulit syöttävät lämpöä yhdelle turbiini-generaattorijärjestelmälle. Moduuleja kutsutaan NSSS moduuleiksi. Tämä mahdollistaa sekä skaalautuvuuden että redundanssin hyödyntämisen laitoksen suunnittelussa. (Dong et al. 2018.)

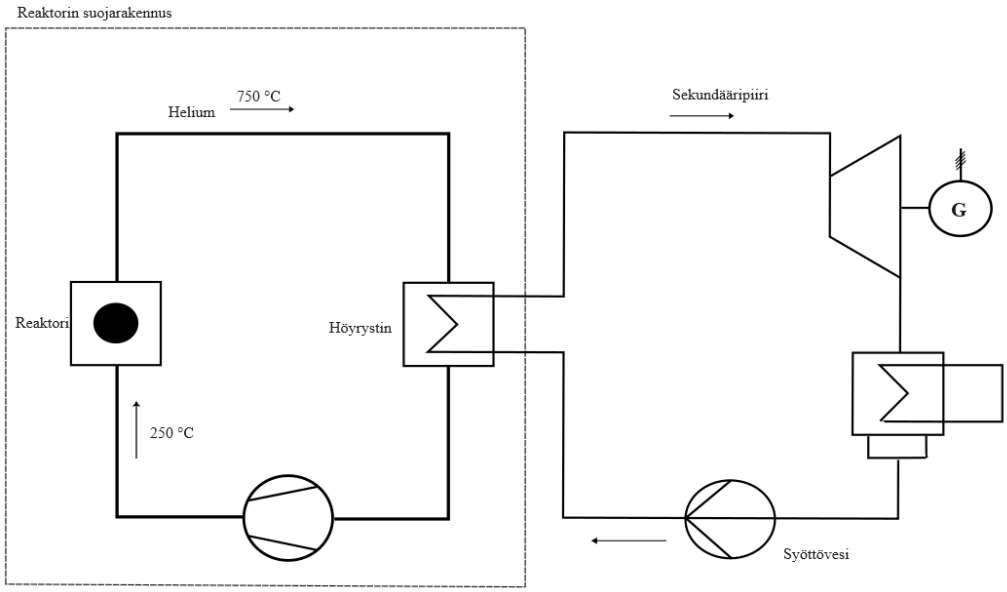
NSSS-moduuli esitetty kuvassa 2. (Dong, et al. 2018.)



Kuva 2. NSSS moduuli (Dong, et al. 2018, 972.)

Korkean lämpötilan reaktorit (HTGR) ovat kehitetty tuottamaan sähköä tehokkaasti ja mahdollistamaan ydinprosessilämmön käyttö korkean lämpötilan teollisissa sovelluksissa. Tyypillisesti helium virtaa reaktorin läpi noin 10–30 MPa paineessa ja kuumenee asteittain kulkiessaan alas ytimen läpi. Höyrygeneraattoreilla varustetuissa laitoksissa ytimessä saavutetaan yleensä 250–750 °C lämpötilat, mutta joissain kaasuturbiini- ja teollisuusprosessisovelluksissa ulostulolämpötila voi nousta jopa 950–1000 °C asteeseen. (Kugeler & Zhang 2019.)

HTGR:n ydinrakenne on sijoitettu metalliseen tukikehikkoon, jonka sisäosat on suojattu termisellä säteilysuojauksella. Lämpö siirtyy höyrystimeen, jossa se hyödynnetään syöttöveden esilämmittämiseen, höyrystämiseen ja tulistetun höyryn tuottamiseen. Lämpötilagradientti ytimessä vastaa aksiaalista tehotiheyden jakautumista, mikä auttaa optimoimaan energiankäytön eri laitostyypeissä. (Kugeler & Zhang 2019.)



Kuva 3. Korkean lämpötilan reaktorin jäähdytyspiiri (Kugeler & Zhang 2019, 6.)

2.3 Nestemetallijäähdytteiset reaktorit

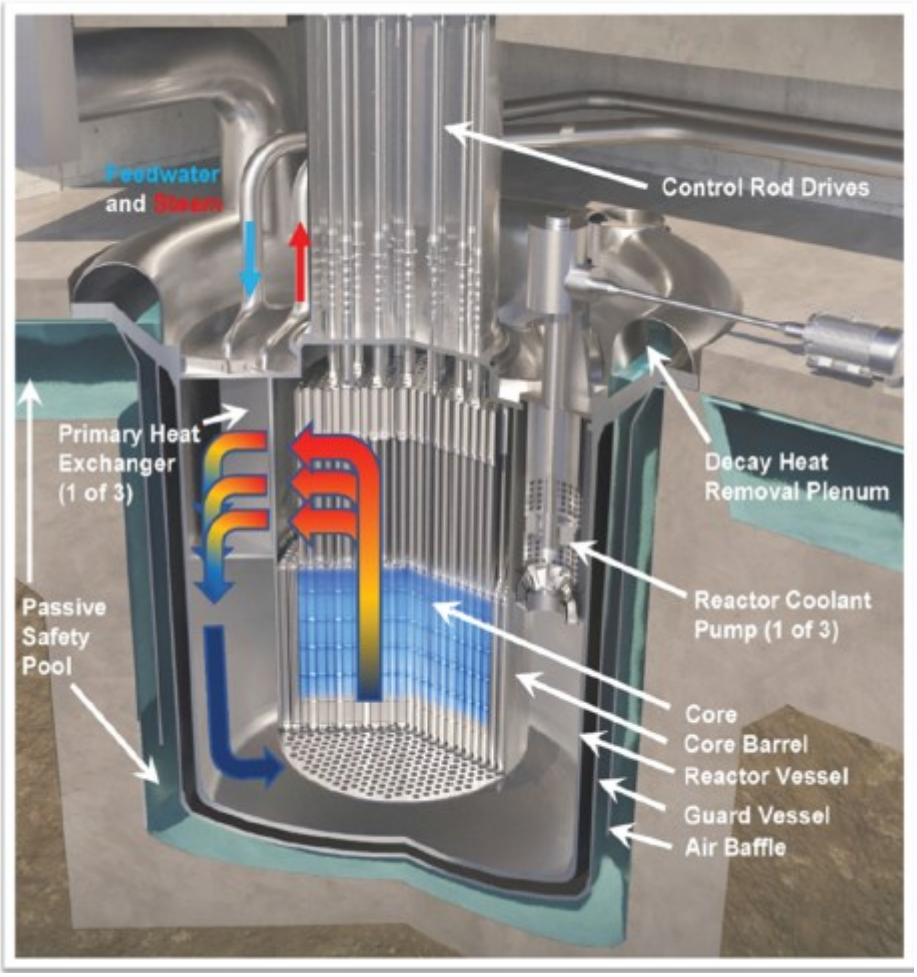
Nestemetallijäähdytteisten nopeiden reaktoreiden (LMFR) kehitystyö ulottuu yli 60 vuoden taakse, ja tähän mennessä teknologiaa on käytetty yhteensä lähes 310 reaktorivuoden ajan (IAEA 2012). Näiden reaktoreiden suunnittelu on perustunut erityisesti niiden

matalapaineiseen toimintaympäristöön, korkeaan lämpöhitauteen ja negatiivisiin tehoreaktiokertoimiin, jotka parantavat passiivista turvallisuutta. Esimerkiksi Generation IV -reaktorikonseptiin kuuluva lyijyjäähdytteinen nopea reaktori (LFR) toimii ilmakehän paineessa ja kestää korkeita lämpötiloja, mikä mahdollistaa korkean termodynaamisen hyötysuhteen ja turvallisen toiminnan ilman merkittäviä jäähdytysaineen menetysonnettomuuksia. (Lee, Bae & Dhar 2024.)

Yleisimmin nestemetallijäähdyttimissä käytetyt aineet ovat natrium, lyijy ja lyijy-vismuttikylmäseos seos (LBE), joilla kaikilla on omat vahvuutensa ja haasteensa (IAEA 2012). Alkuperäisissä nopeissa reaktoreissa suosittiin natriumia sen parempien lämmönsiirto-ominaisuuksien vuoksi, mutta nykyaikaiset tutkimus- ja kehityshankkeet, erityisesti Euroopassa ja Yhdysvalloissa, ovat keskittyneet nestemäiseen lyijyyn sen kemiallisen stabiilisuuden ja korkeiden kiehumispisteiden vuoksi. (Lee, Bae & Dhar 2024.)

Nestemäisellä lyijyllä on useita ydinreaktoreille suotuisia ominaisuuksia: se ei reagoi ilman tai veden kanssa, sillä on erinomainen lämmönsiirtokyky ja se vaimentaa huonosti neutroneja, mikä mahdollistaa laajemman polttoainekokoonpanojen suunnittelun. Sen suuri lämpökapasiteetti tasaa lämpötilanvaihteluita ja parantaa reaktorin vakautta alasajotilanteissa. Toisaalta merkittävin tekninen haaste LFR-teknologialle on lyijyn syövyttävä luonne, erityisesti korkeissa lämpötiloissa, joissa esimerkiksi nikkelin liukoisuus kasvaa merkittävästi, aiheuttaen rakenneaineiden, kuten terästen, korroosiota. (Lee, Bae & Dhar 2024.)

Materiaalien yhteensopivuuden varmistamiseksi LFR-teknologia edellyttää tarkkaa happipitoisuuden sääntelyä ja virtausnopeuksien hallintaa. Esimerkiksi University of Pittsburghin kehittämässä uusimmassa testauslaitteistossa testataan rakenteellisten materiaalien korroosio- ja eroosiokestävyyttä jopa 600 °C lämpötilassa ja korkeilla virtausnopeuksilla. Tällaiset tutkimuslaitteistot ovat keskeisiä kehitettäessä kestäviä materiaaleja ja sensoreita tulevaisuuden LFR-laitoksiin. (Lee, Bae & Dhar 2024.)



Kuva 4. LFR primäärijäähdytteen virtaus (Bae, Dhar, Lee 2024, 773.)

Vaikka nestemetallijäähdytys tarjoaa huomattavia teknisiä etuja, sen toteuttaminen edellyttää edelleen materiaalien ja laitteistojen kehitystä sekä pitkäaikaisia testauksia. Yliopistojen, tutkimuslaitosten ja teollisuuden yhteistyöllä pyritään ratkaisemaan nämä haasteet, ja samalla edistetään LFR-teknologian kaupallistamista ja turvallista käyttöönottoa.

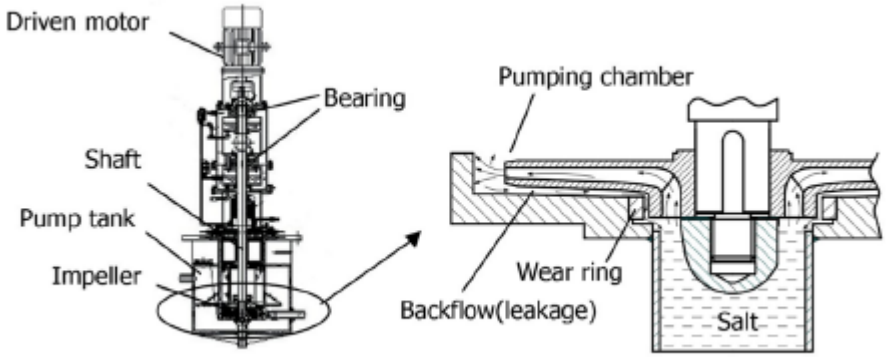
2.4 Sulasuola reaktorit

Sulasuolareaktorit (MSR) edustavat kehittynyttä ydinreaktoriteknologiaa, jossa käytetään jäähdytysaineena sulassa olomuodossa olevia suoloja, kuten fluoridi- tai kloridipohjaisia suoloja. Näitä käytetään niiden sulamispisteen yläpuolella kiinteytymisen estämiseksi ja kiehumispisteen alapuolella haihtumishäviöiden minimoimiseksi. Sulasuolareaktorit voivat olla joko lämpö- tai nopeatyyppisiä: lämpöreaktoreissa käytetään grafiittia neutronien

hidastamiseen, kun taas nopeat reaktorit hyödyntävät suoraan fissioneutroneja. MSR-teknologia voidaan jakaa neljään päätyyppiin: terminen kiinteäpolttoaineinen, terminen nestepolttoaineinen, nopea nestepolttoaineinen sekä vakaan suolan nopea reaktori. (Dolan 2021.)

MSR-reaktoreiden etuihin kuuluvat muun muassa tehokas polttoaineen hyödyntäminen, alhaisemmat toimintapaineet, korkea hyötysuhde sekä mahdollisuus vähentää pitkäikäisen ydinjätteen määrää. Lisäksi niiden passiiviset turvallisuusominaisuudet, kuten sulasuolan laajenemiseen perustuva negatiivinen reaktiivisuusvaste, tekevät niistä turvallisuudeltaan houkuttelevan vaihtoehdon. Teknologian käyttöönottoa hidastavat kuitenkin haasteet, joihin kuuluu muun muassa korkeiden käyttölämpötilojen aiheuttama materiaalien rasitus sekä radioaktiivisten aineiden hallinta ja säteilyvaurioiden vaikutukset komponentteihin. (Dolan 2021.)

Yksi merkittävistä MSR-kehityshankkeista on Kiinan tiedeakatemian torium-pohjainen sulasuolareaktorijärjestelmä, joka hyödyntää sulasuolaa sekä jäähdytysaineena että reaktioväliaineena (Shen, Fu & Zhang 2022). Tällaisessa järjestelmässä sulasuolan kierrätys on ratkaisevassa asemassa, ja tämä toteutetaan erityisesti korkean lämpötilan sulasuolapumpuilla, joiden toimintalämpötila voi nousta jopa 700 °C:een mikropositiivisessa paineessa. Yleisesti käytetty materiaaliratkaisu tällaisissa pumpuissa on austeniittinen ruostumaton teräs, jonka on kestettävä sekä mekaanisia että kemiallisia rasituksia. (Shen, Fu & Zhang 2022.)



Kuva 5. Korkean lämpötilan sulasuolapumpun mallikaavio (Shen, Fu, Zhang 2022, 2.)

Korkean lämpötilan sulasuolapumput ovat rakenteeltaan pystysuuntaisia keskipakopumppuja, joissa moottori on sijoitettu laitteen yläosaan ja akselijärjestelmää tukevat kaksi laakeriryhmää. Pumppausprosessi perustuu keskipakovoimaan, joka syntyy juoksupyörän pyörimisestä ja siirtää sulasuolan alapuolelta pumppauskammioon. Sulasuolan taso yltää noin kahteen kolmasosaan säiliön korkeudesta, ja juoksupyörä on kokonaan upotettu suolaan, mikä mahdollistaa tehokkaan lämmönsiirron ja virtaustehon säilyttämisen korkeissa lämpötiloissa. (Shen, Fu & Zhang 2022.)

Vaikka sulasuolareaktorit tarjoavat potentiaalin tulevaisuuden ydinenergiajärjestelmäksi, ne vaativat edelleen merkittäviä materiaaliteknisiä ja järjestelmällisiä tutkimuksia ennen laajamittaista käyttöönottoa.

3 Teräksen tuotanto

Teräs on muokattavissa oleva rautapohjainen metalliseos, jonka hiilipitoisuus jää alle 2,06 massaprosentin, useimmiten alle yhden prosentin. Kun hiilipitoisuus ylittää tämän rajan, puhutaan valuraudasta. Teräksen ominaisuuksia säädellään lisäämällä siihen muita metalli- ja epämetallielementtejä, jolloin voidaan parantaa esimerkiksi teräksen korroosionkestävyyttä, lujuutta ja hitsattavuutta. (Schlegel 2023.)

Nykyään ensisijainen menetelmä teräksen valmistamiseksi rautamalmista on masuunin ja konvertterin yhdistetty käyttö. Toinen teräksen tuotantotapa on niin sanottu sähköuuniteräksentuotanto, jonka perusteet olivat tunnettuja jo yli 100 vuotta sitten. Menetelmässä romuteräs sulatetaan valokaaren avulla, ja prosessin kehitti vuonna 1904 ranskalainen insinööri Paul-Louis Heroult. Vasta sähköntuotannon kehittymisen ja riittävän kapasiteetin saatavuuden myötä sähköenergialla tapahtuva metallien sulatus yleistyi teolliseen käyttöön 1900-luvun alussa. (Schlegel 2023.)

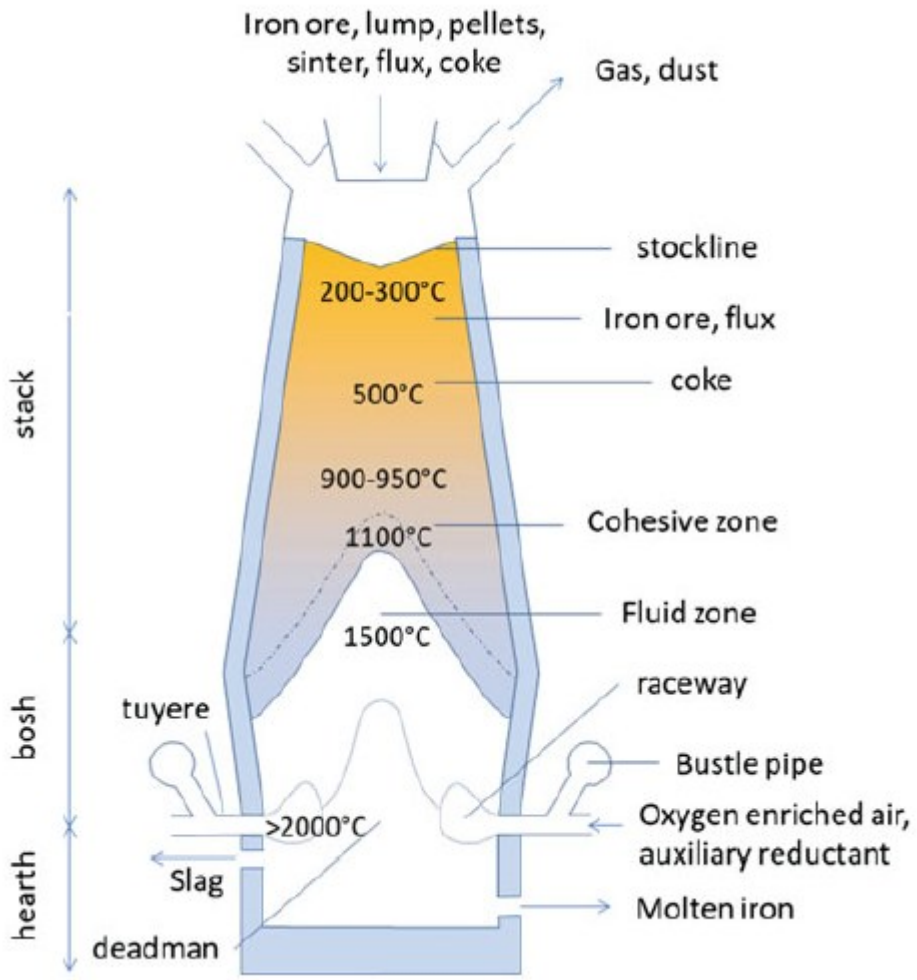
Teräksenvalmistus voidaan karkeasti määritellä kuumametallin puhdistamiseksi masuunissa tai vastaavassa prosessissa, tai vaihtoehtoisesti romun ja muiden raudan muotojen sulattamiseksi sähköuunissa. Nykyisin suurin osa maailman kuumametallista puhdistetaan happipuhallusmasuunikaasu-prosessissa (OSM), jossa tärkeimpänä tavoitteena on hiilen poistaminen hapettamalla se hiilimonoksidiksi. Samalla prosessissa poistetaan myös muita epäpuhtauksia, kuten piitä, fosforia, rikkiä ja mangaania, jotka siirtyvät kuonavaiheeseen. Valokaariuuniprosessissa tapahtuvat kemialliset reaktiot ovat samankaltaisia, mutta usein suppeampia riippuen sulatettavasta raaka-aineesta. (Fruehan 1998.)

3.1 Masuuni

Masuuniprosessi alkaa, kun esilämmitettyä ilmaa niin kutsuttua kuumaa puhallusta johdetaan masuunin alaosaan läpivirtaussuuttimien kautta. Ilman lämpötila voi olla jopa 1250 °C. Kuuma puhallus kaasuunnuttaa koksin sekä suuttimien kautta injektoidun hiilen, jolloin syntyy erittäin kuuma liekki, joka muodostaa niin sanotun palo-onkalon (engl. raceway). Tämä liekki toimii keskeisenä lämmönlähteenä raudan pelkistyksessä ja sulattamisessa. Palo-

onkalo on rakenteeltaan banaanin muotoinen ja sen pituus on tyypillisesti noin 1,8 metriä. Sen alaosaan muodostuu vakaa rakenne pienten koksihiukkasten ansiosta, kun taas yläosassa koksi liikkuu jatkuvasti eikä vakiintunutta rakennetta synny. (Geerdes, Chaigneau & Lingiardi 2020.)

Samalla kun lämpö tuottaa sulatusolosuhteet, kuuman puhalluksen happi reagoi syntyneen hiilimonoksidin kanssa ja pelkistää rautaoksideja. Vetyä muodostuu injektoiduista polttoaineista sekä kuuman puhalluksen kosteudesta. Nämä pelkistimet hiilimonoksidi ja vety mahdollistavat hapen poistumisen rautaoksideista ja muuttavat ne metalliseksi raudaksi. Tätä kutsutaan pelkistysprosessiksi, joka on masuunin keskeinen kemiallinen tapahtuma. (Geerdes, Chaigneau & Lingiardi 2020.)



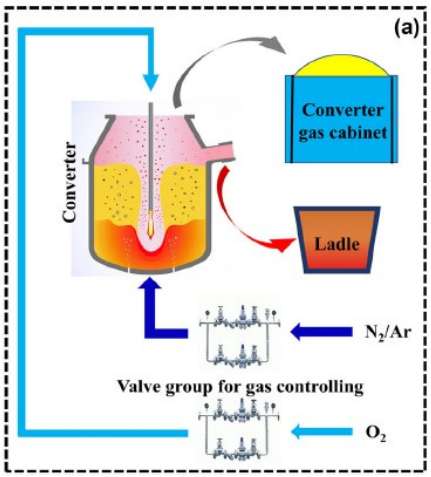
Kuva 6. Masuunilaitos (Cavaliere 2019, 168.)

Masuunien tilavuudet vaihtelevat 100–5000 m³ välillä ja ne vastaavat noin 70 prosentista maailman terästuotannosta. Rautamalmia, sinteriä tai pellettiä, koksia sekä kalkkikiveä syötetään masuunin yläosasta, ja raaka-aineet laskeutuvat hitaasti kohti pohjaa 6–8 tunnin aikana. Alhaalla ne muuttuvat nestemäisiksi tuotteiksi: kuona kelluu nestemäisen raudan pinnalla ja molemmat kerätään erikseen. Mikäli raudan rikkipitoisuus on liian korkea, se käsitellään erillisessä rikinpoistoyksikössä ennen jatkokäsittelyä (Cavaliere 2019.)

Masuunin yläosasta poistuvat kuumat jätekaasut puhdistetaan ja jäähdytetään, minkä jälkeen niitä käytetään uudelleen masuunilaitoksen ilmalämmittimissä tai hyödynnetään paikallisesti höyryn ja sähkön tuotannossa. Joissain tapauksissa ylimääräinen kaasu myydään energiaksi. Masuuniprosessin ominaisenergiankulutus on noin 11,6 GJ tuotettua kuumaa metallitonnia kohden, mikä tekee siitä energiaintensiivisimmän vaiheen integroidussa terästuotannossa. Tämä johtuu erityisesti korkeasta pelkistysaineiden syöttötarpeesta (Cavaliere 2019.)

3.2 Konvertteri

Perusidea konvertteriteräksenvalmistusprosessissa on muuttaa hiilipitoinen nestemäinen masuunista saatu kuuma metalli vähähiiliseksi teräkseksi. Käytössä on erilaisia konsepteja, kuten BOP (basic oxygen process), BOS (basic oxygen steelmaking) ja BOF (basic oxygen furnace). Käytännössä nämä tarkoittavat samaa asiaa, mutta rajoittavat alan nykyaikaisiin konvertteriprosesseihin, jotka käyttävät perusuunin vuorausta ja kuonaa sekä happea hiilen hapettamiseen, mikä erottaa ne vanhemmista prosesseista, joissa käytettiin ilmaa. (Seetharaman, et al. 2014.)



Kuva 7. Konvertteriteräksenvalmistusprosessi (Han, et al. 2024, 1097.)

Kuvassa 7 on esitettynä yhdistetty puhallusprosessi, joka ottaa huomioon ylä- ja alapuolisen puhalluksen edut. Konvertteriprosessi käynnistyy, kun sula rauta siirretään uuniin ja siihen puhalletaan ylhäältä happea. Samalla alhaalta syötetään inerttiä kaasua, kuten typpeä tai argonia, konvertterin pohjan läpi. Tässä niin sanotussa yhdistetyssä puhallusprosessissa yhdistyvät ylä- ja alapuhalluksen edut: yläpuhallus tehostaa hapettumista ja mahdollistaa suuremman romun käytön, kun taas alapuhallus parantaa metallin ja kuonan sekoittumista, nopeuttaa reaktioita ja vähentää metallihävikkiä kuonaan. (Oghbasilasie & Holappa 1995.)

3.3 Valokaariuuni

Konvertteriteräksenvalmistusprosessin keskeinen tavoite on muuntaa masuunista saatu hiilipitoinen nestemäinen rauta vähähiiliseksi teräkseksi. Prosessissa käytetään useita samankaltaisia teknologioita ja nimityksiä, kuten BOP (Basic Oxygen Process), BOS (Basic Oxygen Steelmaking) ja BOF (Basic Oxygen Furnace). Nämä kaikki viittaavat moderneihin konvertterimenetelmiin, joissa hyödynnetään perusuunin vuorausta, kuonaa ja puhdasta happea hiilen hapettamiseen. Tämä erottaa ne aiemmista menetelmistä, joissa käytettiin pelkästään ilmaa hapettamiseen. (Seetharaman et al. 2014.)

Yleisin nykyaikainen konvertteriprosessi perustuu niin kutsuttuun yhdistettyyn puhallukseen, jossa metallisula puhalletaan ylhäältä hapella ja samanaikaisesti alhaalta inertillä kaasulla – tyypillisesti typellä tai argonilla. Yläpuolinen hapenpuhallus suoritetaan erityisen suuttimen kautta ja mahdollistaa suuremman romumetallimäärän käytön sulatuksessa. Alhaalta tuleva puhallus tapahtuu kaasunläpäisevien tiilien läpi, mikä tehostaa sulan ja kuonan sekoittumista, edistää kemiallista tasapainoa ja nopeuttaa reaktioita. (Oghbasilasie & Holappa 1995.)

Konvertteriprosessin yhteydessä muodostuu myös sivutuotteita, kuten kuumaa kaasua ja kuonaa, joiden lämpöenergiaa pyritään hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti. Esimerkiksi konvertterikaasun taltiointi ja käyttö energiantuotannossa parantaa prosessin kokonaisenergiatehokkuutta. Uudemmissa tutkimuksissa on selvitetty jopa CO_2–O_2-seospuhallustekniikan mahdollisuuksia energiansäästöön, mikä voisi jatkossa vähentää sekä energiankulutusta että kasvihuonekaasupäästöjä. (Han et al. 2024.)

4 SMR:n mahdolliset hyödyntämistavat terästeollisuudessa

Seuraavassa kappaleessa käsitellään, kuinka SMR-teknologiaa voidaan hyödyntää teräksen tuotannossa energian tuotannon sekä prosessilämmön hyödyntämisen näkökulmasta. Lisäksi tehdään laskelmia, onko SMR:n käyttöönotto taloudellisesti kannattavaa. Laskelmat tehdään muutamille eri reaktoreille, jotka on valittu niiden tehon ja ”The NEA Small Modular Reactor Dashboard” -kirjassa esitetyn kehityksen perusteella. Mitä enemmän reaktoria on kehitetty, sitä enemmän siitä löytyviin tietoihin voi luottaa (OECD, 2023).

4.1 Energian tuotanto

Kappaleessa 3 käsiteltiin teräksen tuotantoa ja huomattiin, että varsinkin valokaariuuni- ja konvertteriprosessit vaativat huomattavan määrän sähköenergiaa. Esimerkiksi Tornion terästehdas kuluttaa vuodessa noin 3–3,5 TWh sähköä. SMR-teknologia voisi olla tehokas ratkaisu tähän tarpeeseen, sillä sen avulla voitaisiin tuottaa iso osa terästehtaan tarvitsema sähköenergiasta.

Eniten tutkittu teknologia on kevytvesi-SMR, kuten kappaleessa 2.1 mainittiin. Yksi laitos, jonka kehittäminen on edennyt melko pitkälle, olisi korealainen SMART, joka hyödyntää kappaleessa 2.1 esiteltyä iPWR-tekniikkaa.

4.2 Prosessilämpö

David Carlsénin pro gradu -tutkielmassa Integration of SMRs with Steel Industry (2022) tarkasteltiin, kuinka SMR:n tuottamaa kuumaa höyryä voidaan hyödyntää fossiilivapaan teräksentuotannon prosesseissa. Erityisesti tutkielmassa keskityttiin suoraan lämpöintegraatioon, jossa SMR:n tuottama höyry johdetaan suoraan vedyn ja synteesikaasun (H_2 ja CO) tuotantoon kiinteäoksidielektrolyysillä SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell) sekä edelleen rautamalmin pelkistämiseen DRP (Direct Reduction Plant). Tällainen lähestymistapa mahdollistaa merkittävän energiatehokkuuden parantamisen, koska vältetään energiahäviöitä, joita syntyisi höyryn muuntamisesta sähköksi ja takaisin lämmöksi. (Carlsén, 2022.)

Tutkielmassa esitetty järjestelmä osoittaa, että SMR:n höyryä voidaan käyttää reaktioiden lämpölähteenä sekä kierrätettyjen pelkistyskaasujen uudelleenlämmittämiseen ennen niiden paluuta pelkistysprosessiin. Tämä vähentää sähköntarvetta elektrolyysissä ja koko tuotantoketjussa. Mallinnuksen perusteella osoitetaan, että suora lämpöintegraatio voi laskea primäärienergiankulutusta verrattuna pelkästään sähköön perustuvien järjestelmien, kuten HYBRI-Tin, energiatarpeeseen. (Carlsén, 2022.)

4.3 Talouslaskenta

Lasketaan nykyarvomenetelmää käyttämällä, kuinka kannattavaa olisi ostosähkön korvaaminen SMR-laitoksella. Nykyarvomenetelmä on määritetty yhtälön 1 mukaisesti

$$NA = \sum_{t=1}^{n} \frac{S_t}{(1+i)^t} - (I - \frac{JA_n}{(1+i)^n}) \geq 0 \tag{1}$$

Jossa i on laskentakorko 5 %, n on pitoaika vuosissa, S_t on investoinnilla saavutettava vuotuinen nettotulo tai nettosäästö [€/a], I on investointi [€] ja JA_n on jäännösarvo, joka voidaan olettaa olevan nolla. (Ranta, 2025.)

Nettosäästö on vuosittain yhtä suuri, joten nettosäästöjen nykyhetkeen diskontattu tekijä voidaan kirjoittaa muotoon

$$A = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} * s = a_{n/i} * s \tag{2}$$

Jossa $a_{n/i}$ on jaksollisten maksujen nykyarvotekijä ja s on nettosäästö vuodessa. Nykyarvolauseke voidaan kirjoittaa muotoon

$$NA = a_{n/i} * s - I \tag{3}$$

Laskenta suoritetaan käyttämällä muutamaa esimerkkireaktoria, jotka käyttävät eri jäähdytysmenetelmää. Esimerkkinä käytetään Tornion terästehdasta. Laskelmat pätevät vastaaviin laitoksiin. Kuten aiemmin mainittiin Tornion terästehdas kuluttaa sähköä 3–3,5 TWh vuodessa. Energiaviraston tilastojen mukaan sähkön keskihinta vuonna 2023 oli 56,5 €/MWh (Energiateollisuus). Tornion terästehtaan vuotuinen ostosähkön kustannus on 169,5–197,75 M€/a.

Ensimmäisenä esimerkkireaktorina käytetään taulukossa 1 esitelty kevytvesireaktori SMR-300. SMR-300 sähköteho on 300 MW. Kyseisen reaktorin kehitys on vielä alkuvaiheessa, mutta se voisi olla hyvin pätevä tähän tarkoitukseen. SMR-laitoksen käyttöaste on noin 83 %, jonka avulla saadaan laskettua vuosittaiseksi käyttöasteeksi 7270 h/a (Rahmanta, Al Hasibi, et al. 2024). Tällöin laitos tuottaa sähköä 2,2 TWh/a. SMR:n rakennuskustannukset voisivat olla niinkin alhaisia kuin 2744 €/kW. Täten 300 MW:n projekti voisi maksaa 823 miljoonaa euroa (Walton 2022). Käyttö- kunnossapitokustannukset keskimäärin noin 30 €/MWh (Weimar, Zbib, et al. 2021). Polttoainemaksu 6,23 $/MWh. Euroopan keskuspankin tilastojen mukaan dollarin valuuttakurssi on keskimäärin 1 € = 1,09 $ (ECB, 2024). Käytetään tätä kurssia, valuuttojen muutoksissa. Polttoainemaksu euroissa on 5,73 €/MWh. Laskenta on suoritettu liitteessä 1.

Lisäksi lasketaan kannattavuus SMART, EM2 ja SEALER-55-reaktoreille. Lähtöarvot ovat esitettynä taulukossa 2 ja laskenta suoritettu liitteissä 1–4.

Taulukko 2. Esimerkkireaktorien lähtöarvot

Reaktori-tyyppi	Käyttöikä (vuotta)	Vuosittainen sähköntuotanto (TWh/a)	Rakennus-kustannukset (€)	Polttoaine-maksu (€/MWh)	Käyttö- ja kunnos-sapitokustannukset	Lähteet
SMR-300	80	2,2	1,1 mrd.	5,73	30 €/MWh	Rahmanta, Al Hasibi, et al. 2024. Walton 2022. Weimar, Zbib, et al. 2021.
SMART	60	0,8	1,1 mrd.	4,89	8,2 €/MWh (laskettu lähteessä ilmoitetusta arvosta 59 823 €/MW)	Stewart, 2022.
EM2	60	2,3	1,2 mrd.	17,75	11,1 €/MWh (laskettu lähteessä ilmoitetusta arvosta 95 993 €/MW	Steigerwald, 2023.
SEALER-55	25	0,4	217 milj.	14,0	19,9 €/MWh	Tassone F., et al. 2024.

Kappaleessa 2.4 mainittujen haasteiden sekä sulasuolajäähdytteisten reaktorien kehitys ollessa vielä melko varhaisessa vaiheessa, niiden toteutus vaatisi paljon suunnittelua ja olisi melko epävarmaa. Jätetään ne huomioimatta tästä syystä.

5 Kannattavuus

Tässä kappaleessa pohditaan SMR-teknologia kannattavuutta terästeollisuuden näkökulmasta kappaleessa 4 tehtyjen havaintojen perusteella sekä paneudutaan SMR teknologian turvallisuuteen ja sen mahdollisesti tuottamiin haasteisiin.

5.1 Talous

Liitteissä suoritetussa laskennassa arvioitiin neljän eri esimerkkireaktorihankkeen kannattavuutta nykyarvomenetelmällä. Tulokset ovat esitettynä taulukossa 2.

Taulukko 3. Esimerkkihankkeiden kannattavuuslaskelmat

Reaktorin malli	Vuosittainen sähköntuotanto	Investointi	Vuotuinen bruttosäästö	Vuosittaiset kustannukset	Vuotuinen nettosäästö	Hankkeen nykyarvo	Kannattavuus
-	TWh	M€	M€/a	M€/a	M€/a	M€	+/-
SMR-300	2,2	823	124,3	78,6	45,7	72,4	+
SMART	0,8	1000	45,2	10,5	34,7	-343,0	-
EM2	2,3	1100	130,0	66,3	63,7	105,5	+
SEALER-55	0,4	199	24,5	14,7	9,8	-60,8	-

Analyysin perusteella voidaan todeta, että SMR-300 ja EM2 reaktoreilla olisi kannattavaa tuottaa sähköä terästehtaan tarpeeseen. SMART-reaktorihankkeen nykyarvo oli negatiivinen, joten kyseinen hanke ei olisi kannattava. SMART-reaktorin kannattamattomuus selittyy sen korkeilla rakennuskustannuksilla. Suoritettu laskenta oli yksinkertaistettu, eikä siinä oteta huomioon hinnanvaihtelua sekä käyttö- ja kunnossapitokustannusten vaihtelua tai yllättäviä isoja menoeriä esimerkiksi, jonkin komponentin rikkoutuessa.

Vaikka näiden laskelmien perusteella SMR-projekti olisi kannatta, liittyy projektin toteuttamiseen lukuisia taloudellisia riskejä, sillä SMR-teknologia on vielä melko uusi eikä kovin useaa SMR-laitosta ole rakennettu. Näitä taloudellisia riskejä pystytään minimoimaan, jos hankkeelle saadaan jokin ulkopuolinen rahoittaja, jolloin oman investoinnin määrä pienenee.

5.2 Ympäristövaikutukset ja turvallisuus

Isoimmat ympäristövaikutukset muodostunevat teräksentuotannon hiilidioksidipäästöistä. Artikkelissa ”Optimization of energy efficiency, energy consumption and CO2 emission in typical iron and steel manufacturing process” Hongming et al. (2022) tarkastelivat teräksentuotannon hiilidioksidipäästöjä ja sitä, kuinka teräksentuotannon prosesseja voitaisiin tehostaa. Tutkimuksessa kehitettiin optimointimalli, joka maksimoi teräksentuotannon energiatehokkuuden sekä analysoi sen vaikutuksia energiankulutukseen ja CO_2-päästöihin. Tutkimuksen keskeisimmät tulokset ovat seuraavat: energiatehokkuus parani 64 %:sta 68,2 %:iin, energiankulutus laski alkuperäisestä 15,76 GJ/$t_{teräs}$ lopulta 12,31 GJ/$t_{teräs}$ ja CO_2-päästöt vähenivät alkuperäisestä 1215,2 kg/$t_{teräs}$ lopulta 815,3 kg/$t_{teräs}$. Tuotettaessa vaadittava energia SMR:llä voidaan se tuottaa täysin ilman CO_2-päästöjä. (Hongming et al. 2022.)

Vuoden 2024 helmikuusta eteenpäin STUK:en määräyksestä ei enää määrätä ydinvoimalaitosten ympärille viiden kilometrin etäisyydelle ulottuvaa suojavyöhykettä eikä 20 kilometrin etäisyydelle ulottuvaa varautumisaluetta. Määräyksen voimaantultua uusien ydinvoimalaitosten tulee erikseen osoittaa valvovalle viranomaiselle millaisia suojavyöhykkeitä ja varautumisalueita turvallisuuden takaamiseen tarvitaan. Pienydinvoimaloiden kohdalla tämä merkitsee sitä, että jos turvallisuus pystytään osoittamaan, laitoksia voitaisiin rakentaa lähemmäs asutusta tai tässä tapauksessa lähemmäs teräslaitosta. (STUK 2024.)

Ydinreaktorirakenteissa on kehitetty aktiivisten järjestelmien lisäksi useita painovoimaan ja luonnolliseen kiertoon perustuvia passiivisia järjestelmiä, jotka on suunniteltu reaktorin käyttöturvallisuuden parantamiseksi (Hidayatullah, et al. 2015).

5.3 Haasteet

Kuten kappaleessa 2 mainittiin, suurimmat haasteet SMR-reaktorien kehittämisessä liittyvät teknologian valintaan, lupaprosesseihin, toimitusketjuihin ja yhteiskunnalliseen hyväksyntään. Teknologian valintaan vaikuttaa useita tekijöitä, mutta suurimpia siihen vaikuttavia tekijöitä on rahoitus, jota käsiteltiin aiemmassa kappaleessa. Yksi iso haaste tähän liittyen on myös, kuinka hukkalämpö saataisiin hyödynnettyä, sillä perinteisten ydinvoimalaitosten ja myös SMR-laitoksien hyötysuhteet ovat suhteellisen huonot noin 30–40 %. Tässä työssä käsiteltiin ainoastaan SMR-laitosten hyödyntämistä energian tuotantoon ja kuinka sitä voi

hyödyntää konvertteriprosessissa, jota käytetään esimerkiksi Outokummun Tornion terästehtaalla teräksen sulatusprosessissa.

Yhteisön hyväksynnällä on keskeinen rooli, sillä SMR-reaktorit on suunniteltu sijoitettavaksi lähelle asutuskeskuksia ja tämän työn tilanteessa lähelle terästehdasta. Tehtaan yhteyteen rakennettavalle reaktorille voi olla helpompi saada yhteisön hyväksyntä, sillä se ei ole niin lähellä asutusta. SMR-reaktorin rakennuttaminen terästehtaan yhteyteen vaatisi joka tapauksessa aktiivista viestintää sen turvallisuus- ja hyötytekijöistä yhteisön suuntaan luottamuksen lisäämiseksi. Näiden haasteiden ratkaiseminen edellyttää tiivistä yhteistyötä hallitusten, sääntelijöiden ja teollisuuden kesken, jotta SMR-teknologia voi saavuttaa laajamittaisen käyttöönoton.

6 Yhteenveto

Työssä tarkasteltiin pienten modulaaristen reaktorien soveltuvuutta terästeollisuuden energiatarpeiden ratkaisemiseksi. Erityisesti työssä keskityttiin eri SMR-teknologioiden taloudelliseen kannattavuuteen ja niiden mahdollisuuksiin vähentää hiilidioksidipäästöjä sekä edistää terästeollisuuden energiaomavaraisuutta. Kannattavuuslaskelmat tehtiin useille eri reaktorityypeille, kuten vesijäähdytteisille, kaasujäähdytteisille ja nestemetallijäähdytteisille reaktoreille. Laskenta osoittaa, että pitkälle kehitetyt vesijäähdytteiset reaktorit, kuten SMR-300, ovat taloudellisesti kilpailukykyisiä. Niiden kehitystyö on edennyt pidemmälle ja ne hyötyvät laajasta aiemmasta tutkimustyöstä. Kaasujäähdytteiset ja nestemetallijäähdytteiset reaktorit tarjoavat lupaavia ominaisuuksia, kuten korkeampia lämpötiloja ja tehokkaampaa polttoaineenkäyttöä, mutta ne ovat vielä kehitysvaiheessa ja niihin liittyy merkittäviä taloudellisia riskejä. SMR-teknologian kaupallinen menestys riippuu suurelta osin rahoituksen saatavuudesta ja riskienhallinnasta. Erityisesti uudemmat teknologiat vaativat huomattavia investointeja ja yhteiskunnallista tukea. SMR-reaktoreiden integrointi terästeollisuuteen voisi vähentää merkittävästi hiilidioksidipäästöjä, erityisesti korvaamalla fossiilisiin polttoaineisiin perustuvaa energian tuotantoa.

Tutkimus tarjoaa kattavan tarkastelun SMR-teknologioiden taloudellisesta ja teknologisesta potentiaalista terästeollisuuden energiantarpeisiin. Tulokset korostavat vesijäähdytteisten reaktorien valmiutta kaupalliseen käyttöön ja nostavat esiin tarpeen jatkaa uudemman teknologian kehittämistä. Työn tuloksia voidaan hyödyntää arvioitaessa SMR-teknologioiden soveltuvuutta muihin teollisiin sovelluksiin.

Tämän tutkimuksen rajoitteisiin kuuluu laskelmien yksinkertaistaminen, kuten kiinteät oletukset rakennuskustannuksista ja käyttöasteista. Lisäksi prosessilämmön käyttöä ei tarkasteltu täysin kattavasti. Jatkossa tutkimusta tulisi suunnata uudemman SMR-teknologian, kuten kaasujäähdytteisten reaktorien, mahdollisuuksien selvittämiseen korkeampien lämpötilojen saavuttamiseksi. SMR-reaktoreiden integrointi vedyn tuotantoon terästeollisuuden yhteydessä sekä yhteiskunnallisen hyväksynnän ja rahoitusmallien vaikutusten analysointi tarjoavat lupaavia tutkimusaiheita.

SMR-teknologia tarjoaa lupaavan ratkaisun terästeollisuuden energiantarpeisiin ja hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Kuitenkin teknologian laajempi käyttöönotto edellyttää niin teknologisia innovaatioita kuin yhteiskunnallista ja taloudellista tukea. Tämä tutkimus muodostaa pohjan tuleville selvityksille ja edistää keskustelua SMR-teknologian mahdollisuuksista teollisuuden vihreän siirtymän tukemisessa.

Lähteet

Ahonen, E., Heinonen, J., Lahtinen, N., Tuomainen, M. 2019. Edellytykset pienreaktorien turvalliselle käytölle – lupajärjestelmän ja valvonnan kehitysnäkymiä. STUK.

Carlsén, D. 2022. Integration of SMRs with Steel Industry. Lund University. Saatavissa: https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9104120

Cavaliere, P. 2019. Clean Ironmaking and Steelmaking Processes: Efficient Technologies for Greenhouse Emissions Abatement. Springer eBooks.

Dolan, T. 2021. Molten Salt Reactors. TechRxiv. Julkaistu 4.5.2021. Viitattu 18.6.2025. Saatavissa: https://www.techrxiv.org/doi/full/10.36227/techrxiv.14501706.v1

Dong, Z., Pan, Y., Zhang Z., Dong, Y., Huang, X. 2018. Dynamical modeling and simulation of the six-modular high temperature gas-cooled reactor plant HTR-PM600. Energy (Oxford). Vol. 155. 971–991

European Central Bank (ECB). 2024. US Dollar exchange rate. [Tilasto]. Viitattu 7.11.2024. Saatavissa: https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/eurofxref-graph-usd.en.html

Fruehan, R. 1998. Overview of steelmaking processes and their development. The making, Shaping and Treating of Steel: Steelmaking and Refining. Vol. 2-3. Saatavilla: https://www.steelfoundation.org/publications/chapter1.pdf

Geerdes, M., Chaigneau, R., Lingiardi, O. 2020. Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction (Fourth Edition, 2020). IOS Press, Incorporated.

Han, B., Gao, C., Li, Y., Liu, D., Wei, G., Zhu, R. 2024. Energy saving analysis for CO2-O2 mixed injection technology in converter steelmaking. Journal of iron and steel research, international. 2024-05. Vol. 31. 1095-1103

Hidayatullah, H., Susyadi, S., Subki, M. 2015. Design and technology development for small modular reactors - Safety expectations, prospects and impediments of their deployment. Progress in nuclear energy (New series). Vol. 79. s. 127-135.

Hwang, D., Hong, S. 2021. Transition cycle analysis of light water-cooled SMR core loade with MOX (TRU) and FCM (TRU) fueled PWR assemblies. Nuclear engineering and design. Vol. 375. 111103

IAEA. 2012. Liquid Metal Coolants for Fast Reactors (Reactors Cooled by Sodium, Lead and Lead-bismuth Eutectic). IAEA nuclear energy series.

IAEA. 2022. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. 2022 Edition.

Ingersoll, D. T., Carelli, Mario D. 2021. Handbook of small nuclear reactors (2nd Edition). Duxford, United Kingdom: Woodhead Publishing, an imprint of Elsevier.

Kugeler, K., Zhang, Z. 2019. Modular High-temperature Gas-cooled Reactor Power Plant. Tsinghua University Press. Springer eBooks.

Lee, J., Bae, S., Dhar, S. 2024. Versatile Testing Facility for Heavy Liquid Metal-Cooled Fast Reactor at the University of Pittsburgh. Nuclear technology, 2024-04. Vol. 210. 772-780

Liou J. 2023. What are Small Modular Reactors (SMRs)? IAEA Office of Public Information and Communication. [artikkeli] Julkaistu 13.9.2023. Viitattu 16.05.2025. Saatavissa: https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs

Oghbasilasie, H., Holappa, L. 1995. Current status of converter steelmaking. Helsinki University of Technology.

Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), Nuclear Energy Agency (NEA). 2021. Small Modular Reactors Challenges and Opportunities. Paris: OECD Publishing.

Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). 2023. The NEA Small modular Reactor Dashboard. Volume II. Paris, France: Organization for Economic Co-operation and Development OECD Publishing.

Rahmanta, M., Hasibi, R., Tambunan, H., Ruly, Syamsuddin, A., Aditya, I., Susanto, B. 2024. Towards a Net Zero-Emission Electricity Generation System by Optimizing Renewable Energy Sources and Nuclear Power Plant. Energies. Julkaistu 19.4.2024. Viitattu 17.10.2024. Saatavissa: https://www.mdpi.com/1996-1073/17/8/1958

Ranta, T. 2025. Energiatalouden johdantokurssi. LUT-yliopisto kurssimateriaali.

Schlegel, J. 2023. The World of Steel: On the History, Production and Use of a Basic Material. Springer Engineering eBooks.

Seetharaman, Se., McLean, A., Guthrie, R., Seetharaman, Sr. 2014. Treatise on process metallurgy. Volume 3, Industrial processes. Oxford: Elsevier.

Shen, X., Fu, Y., Zhang, J. 2022. Study on the effect of thermal deformation on the liquid seal of high-temperature molten salt pump in molten salt reactor. Nuclear science and techniques. Vol. 34. 128-138. Article 27.

Steigerwald, B., Weibezahn, J., Slowik, M., Hirschhausen, C. 2023. Uncertainties in estimating production costs of future nuclear teghnologies: A model-based analysis of small modular reactors. Energy (Oxford). Vol. 281. 128204

Stewart, W.R, Shirvan, K. 2022. Capital cost estimation for advanced nuclear power plants. Renewable & sustainable energy reviews. Vol. 155. 111880

STUK. 2024. Ydinvoimalaitosten suojavyöhyke ja varautumisalue määritellään STUKin uuden määräyksen mukaan tapaus kerrallaan. [uutinen] Julkaistu 26.1.2024. Viitattu 27.6.2024. Saatavissa: https://stuk.fi/-/ydinvoimalaitosten-suojavyohyke-ja-varautumisalue-maaritellaan-stukin-uuden-maarayksen-mukaan-tapaus-kerrallaan

Tassone, F., Ricotti, M., Lorenzi, S., Locatelli. 2024. Economics and finance of lead fast reactors: A systematic literature review. Progress in Nuclear Energy. Vol. 174. 105298

Toulouevski, Y., Zinurov, I. 2017. Fuel Arc Furnace (FAF) for Effective Scrap Melting From EAF to FAF. Springer eBooks.

Walton, R. 2022. GE Hitachi Nuclear delivers BWRX-300 Small Modular Reactor application to British regulators. [artikkeli] EnergyTech. Julkaistu 22.12.2022. Viitattu 16.06.2025. Saatavissa: https://www.energytech.com/energy-efficiency/article/21256882/ge-hitachi-nuclear-delivers-bwrx-300-small-modular-reactor-application-to-british-regulators

Wei, G., Zhu, R. 2024. Electric Arc Furnace Steelmaking with Submerged Mixed Injection. Springer eBooks, Signapore.

Weimar, M., Zbib, A., Todd, D., Buongiorno, J., Shirvan, K. 2021. Techno-sconomic Assessment for Generation III+ Small Modular Reactor Deployments in the Pacific Northwest. [artikkeli] U.S. Department of Energy. Julkaistu 4.2021. Viitattu 16.06.2025. Saatavissa:

https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/PNNL%20report_Techno-economic%20assessment%20for%20Gen%20III%2B%20SMR%20Deployments%20in%20the%20PNW_April%202021.pdf

Xi, H., Wu, X., Chen, X., Sha, P. 2021. Artificial intelligent based energy scheduling of steel mill gas utilization system towards carbon neutrality. Applied energy. Vol. 295. 117069

Liite 1. SMR-300 hankkeen kannattavuus

Käyttämällä SMR-300 laitosta voidaan tuottaa 2,2 TWh sähköä itse kantaverkosta ostamisen sijaan. Tällöin säästöä sähkön ostamiseen verrattuna tulee

$$2{,}2\ TWh * 56{,}5 \frac{€}{MWh} = 124\ 300\ 000€$$

Käyttö- ja kunnossapitokustannukset

$$2{,}2\ TWh * 30 \frac{€}{MWh} = 66\ 000\ 000€$$

Polttoainemaksu

$$2{,}2\ TWh * 5{,}73 \frac{€}{MWh} = 12\ 606\ 000€$$

Vuotuiset kustannukset

$$66\ 000\ 000€ + 12\ 606\ 000€ = 78\ 606\ 000€$$

Vuotuinen nettosäästö

$$124\ 300\ 000€ - 66\ 000\ 000€ - 12\ 606\ 000€ = 45\ 694\ 000€$$

Hankkeen nykyarvoksi saadaan

$$\frac{(1 + 0{,}05)^{80} - 1}{0{,}05(1 + 0{,}05)^{80}} * 45\ 694\ 000€ - 823\ 000\ 000€ = 72\ 440\ 665€$$

Tulos on positiivinen, joten hanke on kannattava.

Liite 2. SMART-reaktorin kannattavuus

Käyttämällä SMART-reaktoria voidaan tuottaa 0,8 TWh sähköä itse kantaverkosta ostamisen sijaan. Tällöin säästöä sähkön ostamiseen verrattuna tulee

$$0{,}8\,TWh * 56{,}5\,\frac{€}{MWh} = 45\,200\,000€$$

Muutetaan ensin arvo, jolla lasketaan käyttö- ja kunnossapitokustannukset yksiköstä €/MW yksikköön €/MWh

$$\frac{59\,823\,\frac{€}{MW} * 110\,MW}{0{,}8\,TWh} = 8{,}2\,€/MWh$$

Näillä arvoilla saadaan käyttö- ja kunnossapitokustannukseksi

$$8{,}2\,\frac{€}{MWh} * 2{,}2\,TWh = 6\,580\,530€$$

Polttoainekustannukset

$$0{,}8\,TWh * 4{,}89\,\frac{€}{MWh} = 3\,912\,000€$$

Vuotuiset kustannukset

$$6\,580\,530€ + 3\,912\,000€ = 10\,492\,530$$

Vuotuinen nettosäästö

$$45\,200\,000€ - 6\,580\,530€ - 3\,912\,000€ = 34\,707\,470€$$

Hankkeen nykyarvoksi saadaan

$$\frac{(1+0{,}05)^{60}-1}{0{,}05(1+0{,}05)^{60}} * 34\,707\,470€ - 1\,000\,000\,000€ = -343\,012\,252€$$

Tulos on negatiivinen, joten hanke ei ole kannattava.

Liite 3. EM2-reaktorin kannattavuus

Käyttämällä yhtä SMR laitosta voidaan tuottaa 2,3 TWh sähköä itse kantaverkosta ostamisen sijaan. Tällöin säästöä sähkön ostamiseen verrattuna tulee

$$2{,}3\ TWh * 56{,}5 \frac{€}{MWh} = 129\ 950\ 000€$$

Muutetaan ensin arvo, jolla lasketaan käyttö- ja kunnossapitokustannukset yksiköstä €/MW yksikköön €/MWh

$$\frac{95\ 993 \frac{€}{MW} * 265\ MW}{2{,}3\ TWh} = 11{,}1\ €/MWh$$

Näillä arvoilla saadaan käyttö- ja kunnossapitokustannukseksi

$$11{,}1 \frac{€}{MWh} * 2{,}3\ TWh = 25\ 438\ 145€$$

Polttoainekustannukset

$$2{,}3\ TWh * 17{,}75 \frac{€}{MWh} = 40\ 825\ 000€$$

Vuotuiset kustannukset

$$25\ 438\ 145€ + 40\ 825\ 000€ = 66\ 263\ 145€$$

Vuotuinen nettosäästö

$$129\ 950\ 000€ - 25\ 438\ 145€ - 40\ 825\ 000€ = 63\ 686\ 855€$$

Hankkeen nykyarvoksi saadaan

$$\frac{(1 + 0{,}05)^{60} - 1}{0{,}05(1 + 0{,}05)^{60}} * 63\ 686\ 855€ - 1\ 100\ 000\ 000€ = 105\ 546\ 917€$$

Tulos on positiivinen, joten hanke on kannattava.

Liite 4. SEALER-55 reaktorin kannattavuus

Käyttämällä SEALER-55 reaktoria voidaan tuottaa 0,434 TWh sähköä itse kantaverkosta ostamisen sijaan. Tällöin säästöä sähkön ostamiseen verrattuna tulee

$$0{,}434\ MWh * 56{,}5 \frac{€}{MWh} = 24\ 521\ 000€$$

Käyttö- ja kunnossapitokustannukset

$$0{,}434\ TWh * 19{,}9 \frac{€}{MWh} = 8\ 638\ 600\ €$$

Polttoainekustannukset

$$0{,}434\ TWh * 14{,}0 \frac{€}{MWh} = 6\ 076\ 000€$$

Vuotuiset kustannukset

$$8\ 638\ 600\ € + 6\ 076\ 000€ = 14\ 714\ 600€$$

Vuotuinen nettosäästö

$$24\ 521\ 000€ - 8638\ 600€ - 6\ 076\ 000€ = 9\ 808\ 400€$$

Hankkeen nykyarvoksi saadaan

$$\frac{(1 + 0{,}05)^{25} - 1}{0{,}05(1 + 0{,}05)^{25}} * 9\ 808\ 400€ - 199\ 082\ 569€ = -60\ 843\ 523€$$

Tulos on negatiivinen, joten hanke ei ole kannattava.