KORKEAN LÄMPÖTILAN HUKKALÄMMÖN TALTEEONTTO TERMISISTÄ PROSESSEISTA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2025

Antti Pekka Pentikäinen

Tarkastaja: Dosentti Kari Myöhänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Antti Pekka Pentikäinen

Korkean lämpötilan hukkalämmön talteenotto termisistä prosesseista

Energiatekniikan kandidaatintyö

2025

33 sivua, 12 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastaja: Dosentti Kari Myöhänen

Avainsanat: Hukkalämpö, lämmöntalteenotto, terminen prosessi

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan korkean lämpötilan hukkalämmön talteenottoa termisistä prosesseista. Hukkalämmön talteenotto ja hyödyntäminen termisistä prosesseista on tärkeää, koska energian kulutus kasvaa globaalisti ja samalla ilmastonmuutoksen edetessä ihmisten toiminnasta syntyviä päästöjä pyritään vähentämään. Hukkalämpöä hyödyntämällä on mahdollista saada käytetystä primäärienergiasta enemmän hyötykäyttöön. Näin on mahdollista rajoittaa primäärienergian käytön kasvua ja tätä kautta vähentää päästöjä.

Terminen prosessi tarkoittaa prosessia, jossa lämpö on merkittävässä roolissa ja lämmön avulla voidaan pyrkiä saamaan eri aineissa haluttuja muutoksia. Esimerkkinä termisistä prosesseista voidaan käyttää erilaisia sulatusprosesseja tai polttoprosesseja. Työssä käydään läpi millaisia termisiä prosesseja teollisuuden eri aloilla on sekä millaisia vaatimuksia eri prosessit ja niiden mahdolliset erilaiset ominaisuudet asettavat talteenottotekniikoille. Läpi käydään myös, mitä tekniikoita teollisuudessa on käytössä.

Työn keskeisimmät havainnot ja tulokset ovat, että korkean lämpötilan hukkalämmön lähteitä on monilla eri teollisuuden aloilla ja hukkalämmön lämpötilat ja ominaisuudet vaihtelevat eri aloilla ja prosesseilla merkittävästi. Teollisuuden alat, jotka tuottavat korkean lämpötilan hukkalämpöä olivat metalliteollisuus, sementtiteollisuus, energiateollisuus ja lasiteollisuus. Hukkalämpöä syntyy myös tietynlaisten polttokennojen käytössä. Työssä tunnistettuja hukkalämmön talteenottokeinoja ovat jätelämpökattilat, lämmöntalteenottokattilat, lämpöakut ja lämpövarastot, TEG-moduulit sekä regeneratiiviset lämmönvaihtimet. Havaittiin myös, että talteenottotekniikan valinnassa täytyy ottaa huomioon monia tekijöitä. Esimerkkinä tekniikan valinnassa huomioon otettavista tekijöistä voidaan käyttää esimerkiksi hukkalämpövirran likaisuutta.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Antti Pekka Pentikäinen

High-temperature heat recovery from thermal processes

Bachelor's thesis

2025

33 pages, 12 figures and 2 tables

Examiners: Docent Kari Myöhänen

Keywords: Waste heat, heat recovery, thermal process

This bachelor's thesis examines high-temperature waste heat recovery from thermal processes. Recovering and utilizing waste heat from thermal processes is very important because energy consumption is increasing globally and as climate change is progressing, efforts are being made to reduce emissions caused by human actions. By utilizing waste heat, it is possible to get more use out of the used primary energy. This can lower the need to increase usage of primary energy which then lowers emissions.

Thermal process is a process in which temperature is used to make wanted changes to different materials. Smelting processes and combustion processes can be used as an example of thermal processes. This thesis investigates thermal processes from different industrial sectors and what requirements these processes and their characteristics have for the recovery methods used. Recovery methods in use are also studied.

The main findings and results of this thesis are that there are many industries with high-temperature waste heat sources and the temperatures and characteristics vary between industries and processes. Industries that were recognized to have waste heat sources were metal processing industry, cement industry, energy industry and glass industry. Also, some types of fuel cells create high temperature waste heat. Recovery methods recognized in the examination were waste heat boilers, waste heat steam generators, thermal energy storages, TEG-modules, and regenerative heat exchangers. It was also found that many factors have to be taken into consideration when deciding on the choice of used recovery method. An example of a factor that influences the recovery method selection is the contamination of the waste heat stream.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Alaindeksit

th	lämpöenergia

Lyhenteet

FC	Polttokenno (Fuel Cell)
HRSG	Lämmöntalteenottokattila (Heat Recovery Steam Generator)
LHTES	Latentti lämpöenergian varasto (Latent Heat Thermal Energy Storage)
MCFC	Sulakarbonaattipolttokenno (Molten Carbonate Fuel Cell)
PCM	Faasimuutosmateriaali (Phase Change Material)
TCES	Termokemiallinen lämpöenergian varasto (Thermochemical Energy Storage)
SHTES	Tuntuvan lämpöenergian varasto (Sensible Heat Thermal Energy Storage)
SOFC	Kiinteäoksidipolttokenno (Solid Oxide Fuel Cell)
TEG	Lämpösähköinen generaattori (Thermoelectric Generator)
TES	Lämpöakku / Lämpöenergian varasto (Thermal Energy Storage)
WHB	Jätelämpökattila (Waste Heat Boiler)
WHR	Hukkalämmön talteenotto (Waste Heat Recovery)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

Ilmoitukset

1 Johdanto ... 7
2 Hukkalämmön lähteet ja ominaisuudet ... 9
2.1 Hukkalämpöä tuottavat teollisuuden alat ... 9
2.2 Eri teollisuuden alojen hukkalämmön lähteet ja ominaisuudet ... 10
2.2.1 Metalliteollisuus ... 10
2.2.2 Sementtiteollisuus ... 12
2.2.3 Energiateollisuus ... 14
2.2.4 Lasiteollisuus ... 16
2.2.5 Polttokennot ... 17
3 Eri tekniikat hukkalämmön talteenottoon ... 19
3.1 Talteenottotekniikan valinta ja siihen vaikuttavat tekijät ... 19
3.2 Jätelämpökattilat ... 20
3.3 Lämmöntalteenottokattila ... 21
3.4 Lämpöakut ja lämpövarastot ... 23
3.5 TEG-moduulit ... 26
3.6 Regeneratiiviset lämmönvaihtimet ... 27
4 Mahdolliset talteenottoratkaisut eri kohteissa ... 28
4.1 Talteenottotekniikat eri kohteille ... 28
5 Johtopäätökset ... 30
Lähteet ... 31

ILMOITUKSET

Turnitin

Tämän opinnäytetyön alkuperäisyys on tarkistettu Turnitin – samankaltaisuuden tarkastuspalvelun avulla.

Tekoäly

Tämän opinnäytetyön kirjoittaja Antti Pekka Pentikäinen ei ole käyttänyt tekoälytyökaluja opinnäytetyön tekemisessä.

Vastuu

Kirjoittaja, Antti Pekka Pentikäinen, ottaa täyden vastuun tämän opinnäytetyön sisällöstä ja on tarkistanut ja muokannut mahdollisen tekoälytyökalujen käytön myötä syntyneen sisällön.

1 Johdanto

Monet termiset teollisuusprosessit tuottavat hyvin merkittäviä määriä hukkalämpöä, jota voidaan hyödyntää. Termiset prosessit ovat prosesseja, joissa lämpö on merkittävässä roolissa. Termisissä prosesseissa materiaalien lämpötiloja muutetaan ja saadaan näin aikaan toivottuja muutoksia materiaalissa ja sen ominaisuuksissa. Esimerkiksi sulatusprosessit, polttoprosessit ja lämpökäsittely voidaan katsoa termisiksi prosesseiksi. Prosesseissa muodostuvaa hukkalämpöä voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämpökäyttöön ja sähkön tuotantoon tai prosessin muiden vaiheiden tarkoituksiin. Hukkalämmön hyödyntäminen on erityisen tärkeää, koska yhteiskunnan nykyisen teknisen kehityksen sekä kulutuksen kasvun myötä, energiankulutus on kasvanut ja tulee kasvamaan myös tulevaisuudessa. Samanaikaisesti energian- ja sähköntuotannossa pyritään vähentämään siitä aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Tämän takia energian- ja sähköntuotantoon tai erilaisten prosessien vaiheiden käyttöön kelpaavaa hukkalämpöä olisi erittäin tärkeää pystyä hyödyntämään. On arvioitu, että jopa hieman yli 60 prosenttia maailman primäärienergian kulutuksesta menetetään häviöinä erilaisissa poltto- ja lämmönsiirtoprosesseissa (Forman et al. 2016). Häviöitä syntyy siis valtavia määriä. Syntyviä häviöitä hyödyntämällä olisi mahdollista saada pienennettyä kasvihuonekaasupäästöjä, sekä muunlaisia ympäristöpäästöjä. Päästöt pienenisivät, koska hyödyntämällä hukkalämpöä, primäärienergian kulutusta ei välttämättä tarvitse kasvattaa niin paljon, vaikka energiankulutus lisääntyy, koska samasta primäärienergian määrästä saadaan hyötykäytettyä suurempi osa.

Hukkalämpö voidaan jakaa kolmeen erilliseen kategoriaan lämpötilan perusteella. Nämä kategoriat ovat, korkean lämpötilan hukkalämpö, yli 500 °C, keskitason lämpötilan hukkalämpö, 200°C-500°C ja matalan lämpötilan hukkalämpö, alle 200°C. Lämpötiloja voidaan kategorisoida myös hieman eri tavalla, jolloin eri tason hukkalämpöjen rajalämpötilat voivat poiketa edellä mainitusta. Korkean lämpötilan hukkalämpöä syntyy erityisesti metalliteollisuudessa, sementti- ja lasiteollisuudessa, energiateollisuudessa ja myös tietyn tyyppisten polttokennojen käytössä. Tässä työssä metalliteollisuudella tarkoitetaan erityisesti metallien jalostusta, jossa erilaisista rikasteista tuotetaan puhtaita metalleja sulatoissa tai metalleja voidaan sulattaa uudelleen kierrätystä varten. Esimerkiksi metalliteollisuudessa sulatusprosessien lämpötilat voivat helposti ylittää 1000°C lämpötilan ja ne voivat nousta jopa hieman yli

1750°C (Krunniniva, 2012 ; Jouhara et al., 2018). Monien prosessien tuotantovolyymit ovat erittäin suuria ja näin ollen myös näissä prosesseissa korkean lämpötilan hukkalämpöä syntyy suuria määriä.

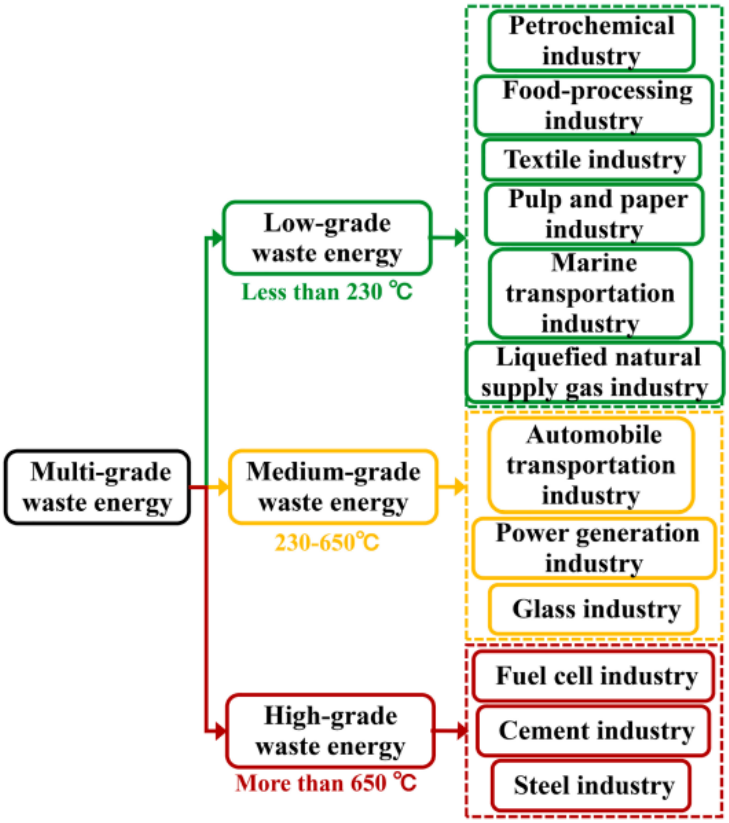
Tässä työssä selvitetään, millaisia termisiä prosesseja teollisuudessa on, joissa korkean lämpötilan hukkalämpöä syntyy ja perehdytään korkean lämpötilan hukkalämmön talteenottoon sekä hyödyntämiseen olemassa oleviin ratkaisuihin ja siihen millaisia mahdollisia rajoitteita eri menetelmillä on. Eri esimerkkiprosesseista esitetään myös yksinkertainen prosessikuvaus tarpeellisilta osin, jonka avulla voidaan paremmin ymmärtää, millaisia ominaisuuksia eri prosesseilla on ja miten ne vaikuttavat siihen, millaisia tekniikoita voidaan käyttää minkäkin termisen prosessin kanssa.

2 Hukkalämmön lähteet ja ominaisuudet

Tässä kappaleessa perehdytään erilaisiin hukkalämmön lähteisiin ja siihen millaisia erilaisia ominaisuuksia hukkalämmöllä voi olla. Kappaleessa esitetään myös eri teollisuuden aloilta esimerkkejä siitä, millaisissa prosessivaiheissa syntyy korkean lämpötilan hukkalämpöä ja käydään läpi olennaisia prosessien vaiheita.

2.1 Hukkalämpöä tuottavat teollisuuden alat

Hukkalämpöä syntyy todella monissa erilaisissa teollisuuden prosesseissa. Teollisuuden aloja, joissa syntyy hukkalämpöä, ja erityisesti korkean lämpötilan hukkalämpöä ovat esimerkiksi metalliteollisuus, sementtiteollisuus ja lasiteollisuus. Myös jotkin polttokennot voivat tuottaa korkean lämpötilan hukkalämpöä. Kuvassa 1 nähdään eräänlainen jako hukkalämmön lähteistä ja niiden hukkalämmön lämpötilasta. (Su et al. 2021)



Kuva 1. Teollisuuden hukkalämmön luokittelu (Su et al. 2021)

Kuten kuvasta 1 nähdään, korkean lämpötilan hukkalämpöä syntyy erityisesti teräs- ja sementtiteollisuudessa ja polttokennojen käytössä. Lisäksi sitä syntyy yleisesti metalliteollisuudessa, johon terästeollisuus kuuluu, sekä energiateollisuudessa sähkön- ja lämmöntuotannon erilaisissa prosesseissa. Kuvan 1 lämpötilajako poikkeaa jonkin verran työn alussa esitetystä jaosta, mutta se antaa hyvän kuvan siitä, millä eri teollisuuden aloilla korkean lämpötilan hukkalämpöä syntyy.

2.2 Eri teollisuuden alojen hukkalämmön lähteet ja ominaisuudet

Hukkalämpöä syntyy siis monilla eri teollisuuden aloilla, erilaisissa termisissä prosesseissa. Prosessit ovat erilaisia ja niissä syntyvä hukkalämpö on ominaisuuksiltaan erilaista. Alakappaleissa tullaan perehtymään eri teollisuuden alojen korkean lämpötilan hukkalämmön lähteisiin ja siihen, millaisia ominaisuuksia eri teollisuuden alojen prosessien hukkalämmöillä on. Alakappaleissa käydään läpi myös prosessiesimerkit eri aloilta.

2.2.1 Metalliteollisuus

Metalliteollisuudessa korkean lämpötilan hukkalämpöä syntyy paljon. Prosessien volyymit ovat suuria, ja lämpötilat hyvin korkeita. Metalliteollisuudessa hukkalämpöä syntyy esimerkiksi sulatusprosesseissa. Esimerkkejä sulatusprosesseista ovat kuparin, nikkelin ja teräksen valmistus. Esimerkkinä kuparin sulatusprosessin lämpötila on yleensä yli 1300 °C ja nikkelillä se on yli 1400 °C (Luomala 2023).

Kuparin sulatuksessa yleisimmin käytetty menetelmä on liekkisulatus (eng. Flash smelting), jossa syöttöseos, johon kuuluu kupariirikaste, kuonan muodostaja hiekka ja mahdollinen kuonarikaste, sulatetaan käyttämällä hyödyksi syöttöseoksessa olevaa rikkiä ja rautaa sekä happirikastettua prosessi-ilmaa. Rikki, rauta ja happirikastettu prosessi-ilma reagoivat keskenään. Reaktiossa vapautuva lämpö sulattaa rikasteen. Ulkoisen energian tarve sulatuksessa on erittäin pientä, sillä suuri osa energiasta saadaan rikasteen rikin, raudan ja happirikastetun prosessi-ilman reaktiosta. (Luomala 2023) Kuvassa 2 nähdään havainnekuva liekkusulatusuunista.

Kuva 2. Liekkisulatusuuni, muokattu kuva (Metso 2025)

Kuvassa 2 nähdään liekkisulatusuunin rakenne. Sulamisreaktio alkaa reaktiokuilulla, kun syöttöseoksen rikki ja rauta sekä happirikastettu prosessi-ilma reagoivat keskenään. Syöttöseos ja happirikastettu prosessi-ilma syötetään reaktiokuilun yläosassa olevasta rikastepolttimesta. Rikasteen sulaessa se putoaa alauuniin, jossa sulaan muodostuu kivi- ja kuonakerros. Kaasuvirta, johon hukkalämpö on sitoutunut matkaa nousukuilun kautta jätelämpökattilaan. Nousukuilulla ja alauunilla tapahtuu myös jälkihapetus. (Luomala 2023)

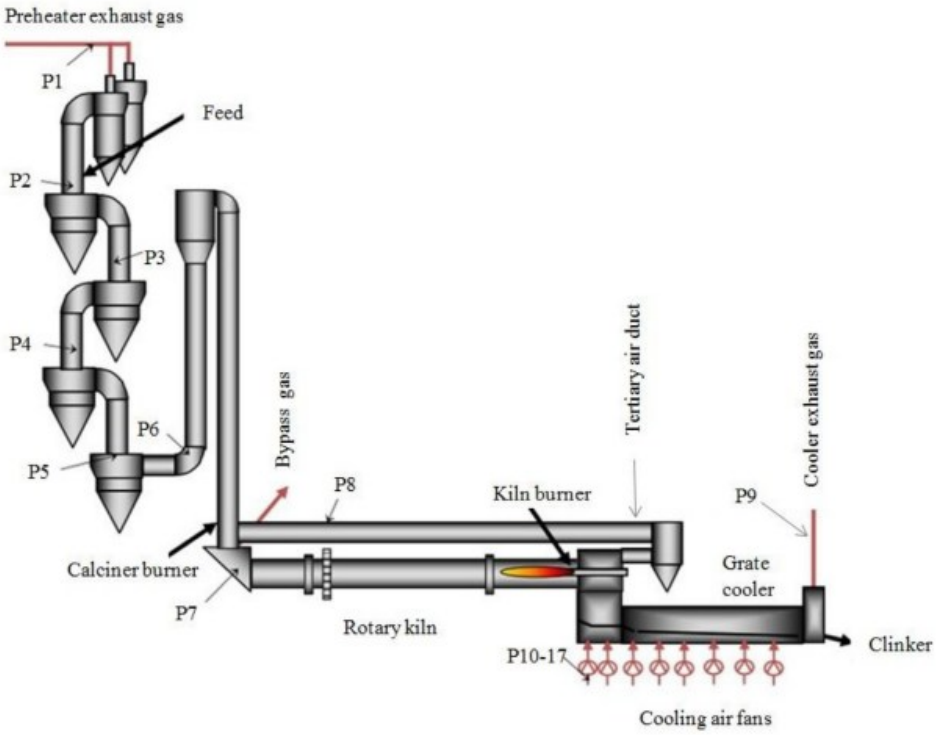
Kuparin tuotanto on jatkuvaa tuotantoa ja näin ollen hukkalämpöä syntyy koko ajan. Hukkalämmön syntymäärään vaikuttaa tuotannon sen hetkinen syöttö eli se tahti, jolla sulatusta tehdään. Kuparin sulatuksessa vapautuva hukkalämpö on sitoutunut kaasuvirtaan. Tuotannossa syntyvät kaasut ovat likaisia, sillä ne sisältävät joitakin määriä rikastetta, joka ei ole sulanut. Sulamatonta ja jätelämpökattilaan päätyvää rikastetta pyritään vähentämään jälkihapetuksen avulla. Jälkihapetuksesta huolimatta noin 3–15 prosenttia syötön rikastemäärästä päätyy jätelämpökattilaan kaasuvirran mukana (Schmidt et al. 2023; Miettinen 2008). Esimerkiksi 100 tonnin syötöllä kaasuvirran mukana jätelämpökattilaan voi päätyy noin 3000–15 000 kiloa rikastetta tunnissa. Kaasut sisältävät myös suuria määriä rikkidioksidia (SO_2), josta valmistetaan rikkihappoa (H_2SO_4) (Luomala 2023). Kaasuvirrasta täytyy kuitenkin saada poistettua lämpöä, jotta likainen kaasuvirta voidaan puhdistaa esimerkiksi sähkösuodattimen avulla, ennen kuin se voidaan johtaa rikkihapon tuotantoprosessiin. Koska

tuotanto on jatkuvaa tuotantoa, on myös kaasuvirta jatkuvaa tuotannon rikastesyötön pysyessä vakaana.

Kaikissa prosesseissa, kuten teräksen tuotantoprosessissa hukkalämpöä ei synny kokoaikaisesti, koska prosessit ovat eräprosesseja ja sulatusta tehdään panoksissa eli tietty määrä materiaalia sulatetaan kerralla. Kun sulatus on valmis, prosessiin tulee tauko, kun uusi panos valmistellaan sulatettavaksi. (Krunniva 2012) Eräprosessien hukkalämmön tuotanto on siis jaksoittaista ja tämä aiheuttaa joitakin ongelmia hukkalämmön hyödyntämisessä. Myös hukkalämmön kaasuvirran mahdollinen lika tuottaa ongelmia hukkalämmön hyödyntämiseen monessa prosessissa.

2.2.2 Sementtiteollisuus

Sementtiteollisuus on yksi suurista energian kuluttajista. Sementtiteollisuuden prosesseissa syntyy suuria määriä hukka energiaa. Jopa 40–60 % kokonaisenergiankäytöstä vapautuu ympäristöön hukkalämmön kautta (Su et al. 2021). Sementinvalmistusprosessi sisältää monia vaiheita. Valmistusprosessiin kuuluu raakamateriaalin valmistelu, esilämmitys, sementtiklinkkerin poltto, klinkkerin varastointi, sementin jauhatus ja sementin varastointi (Finnsementti 2025). Hukkalämmön ja sen hyödyntämisen kannalta prosessin tärkeimmät osat ovat esilämmitys ja sementtiklinkkerin poltto.



Kuva 3. Sementtiuuni ja esilämmitysosa (Ghalandari, 2022)

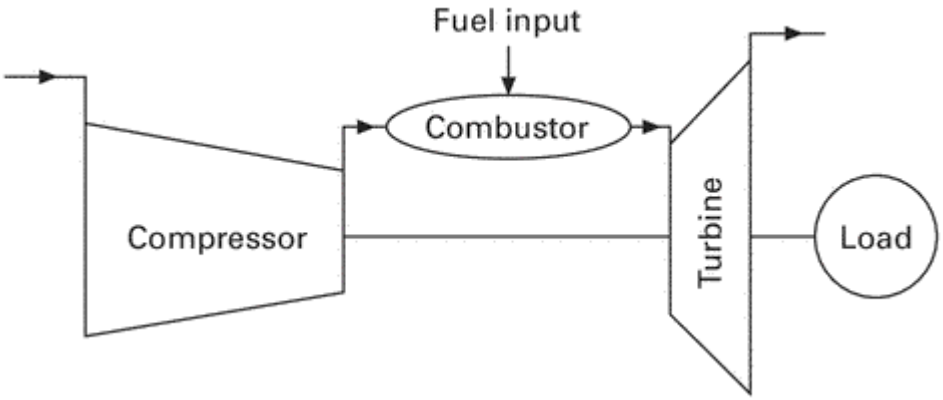
Kuvasta 3 nähdään kuinka esilämmityksessä esihomogenoitu ja raakajauhettu jauhe syötetään esilämmitysosaan, jossa se lämmitetään esilämmitysosan eri osissa, klinkkerin poltossa muodostuvien savukaasujen avulla. Klinkkerin poltto tapahtuu pitkässä putkimaisessa kiertouunissa. Uunissa lämpötila nousee jopa 1450 °C. Polton aikana esilämmitetty jauhe sulaa osittain, jolloin alkaa muodostua klinkkerimineraaleja. (Finnsementti 2025)

Tämä prosessi kuluttaa paljon energiaa ja siinä syntyvät savukaasut ovat korkeassa lämpötilassa. Polttoaineena voidaan käyttää esimerkiksi kivihiiltä, petrokoksia, SRF-kierrätyspolttoainetta tai autonrengas mursketta (Finnsementti 2025). Tämä polttoprosessi tuottaa siis savukaasuja, joihin on sitoutunut korkean lämpötilan hukkalämpöä. Muodostuvissa savukaasuissa tiedetään olevan merkittävää potentiaalia, jota voidaan hyödyntää (Su et al. 2021). Sementtiteollisuuden hukkalämmön hyödyntämistä onkin tutkittu laajasti ja monia erilaisia tekniikoita on ehdotettu juuri sementtiteollisuuden käyttötarkoituksiin. Yksi hukkalämmön käyttökohde onkin juuri savukaasujen käyttö esilämmitysosassa.

2.2.3 Energiateollisuus

Energiateollisuudessa lämmöntuotanto kattaa noin 77 prosenttia tuotetusta kokonaisenergiasta. Energiantuotantoprosesseissa käyttämättä jäänyt lämpö vapautetaan ympäristöön. Ympäristöön vapautetun energian määrä vastaa noin 20 prosenttia kokonaisenergiamäärästä. Energiantuotannossa myös syntyy myös kasvihuonekaasuja kuten hiilidioksidia. Päästöjen vähentämisen kannalta olisi hyvin tärkeää saada käytettyä kaikki mahdollinen prosesseissa vapautuva lämpöenergia hyödyksi, koska näin saadaan enemmän energiaa hyötykäytettyä samoilla päästömäärillä. (Su et al. 2021) Energiantuotanto perustuu nykyäänkin suurelta osin erilaisten polttoaineiden polttamiseen, joka vapauttaa lämpöä. Vuonna 2023 yli 80 prosenttia maailman energiankulutuksesta katettiin hiilellä, maakaasulla ja öljyllä (Energy Institute 2024). Lämmön avulla kiehutetaan vedestä höyryä ja höyryn avulla pyöritetään turbiinia, jolla tuotetaan sähköä. Höyryä voidaan käyttää myös kaukolämpöveden lämmittämiseen. Polttoaineita poltettaessa syntyvä savukaasu sisältää hukkalämpöä, jota voidaan hyödyntää. Hukkalämpöä syntyy myös erilaisissa kattiloissa, kuten esimerkiksi kuplapetikattiloissa ja kiertoleijukattiloissa. Myös kattilaprosesseista erovasta kaasuturbiiniprosessista syntyy hukkalämpöä, jota voidaan talteenottaa savukaasuista. Myös tuotetun vesihöyryn lämpöä ei aina hyödynnetä parhaalla mahdollisella tavalla, vaan sillä tuotetaan esimerkiksi vain sähköä tai kaukolämpöä. Yhteistuotannon avulla lämmöstä voidaan saada hyödyksi enemmän.

Esimerkkiprosessina energiateollisuuden hukkalämmön tuotannosta voidaan käyttää kaasuturbiiniprosessia. Kaasuturbiinissa polttokammioon syötetään ilmaa kompressorilla. Polttokammioon syötetään myös polttoainetta. Polttokammiossa palamisesta aiheutuu savukaasuja, jotka kulkevat kohti turbiinia. Savukaasut pyörittävät turbiinia, joka on kiinnitetty akseliin. Akseli pyörittää generaattoria, jonka avulla tuotetaan sähköä. Turbiinista poistuvan savukaasun lämpötilat lähtevät noin 400 °C ja voivat olla yli 600 °C (Breeze 2016).

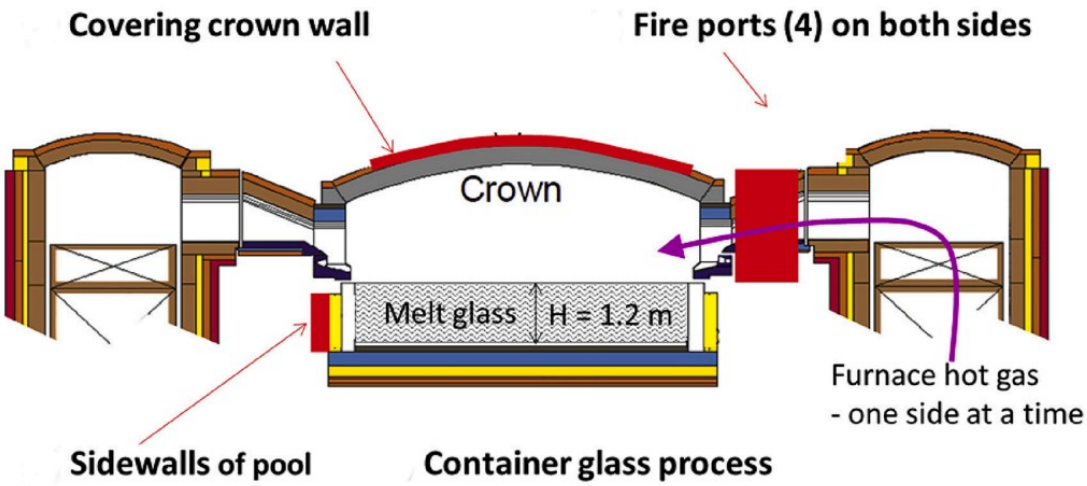


Kuva 4. Yksinkertainen avoin kaasuturbiini (Razak 2007)

Kuvassa 4 nähdään yksinkertainen avoin kaasuturbiiniprosessin havainnekuva. Kuvassa nähdään yksinkertaisen avoimen kaasuturbiinin osat, eli kompressori, polttokammio ja turbiini. Turbiinissa polttoaineen palaessa syntyvä hukkalämpö on sitoutunut turbiinin savukaasuihin. Jotta kaikki hyöty poltetusta polttoaineesta saadaan irti, tulee savukaasujen hukkalämpöä hyödyntää jollakin tavalla.

2.2.4 Lasiteollisuus

Lasiteollisuus on nykyisen elämäntavan kannalta tärkeä toimiala. Lasia tarvitaan todella moniin eri käyttötarkoituksiin. Lasiteollisuudessa käytetään paljon energiaa, josta suuri osa hukataan hukkalämmön mukana. Esimerkiksi kiinan lasiteollisuuden kaikesta käytetystä energiasta hukataan hukkalämpönä jopa 20–50 prosenttia. (Su et al. 2021) Lasiteollisuuden käyttämästä energiasta noin 80 prosenttia kuluu lasiuunien käytössä. Lasiuuneissa sulatetaan lasin eri raaka-aineet, joita ovat esimerkiksi piioksidi, alumiinioksidi, savi, sooda ja kalkkikivi. Lasiuunin lämpötila on noin 1380–1600 °C. (Colangelo 2024; El-Shafie et al. 2021) Uunista poistuvien savukaasujen lämpötila voi olla jopa korkeampi kuin itse sulan lasin lämpötila (Yazawa et al. 2017). Kuvassa 5 nähdään havainnekuva lasiuunin rakenteesta.

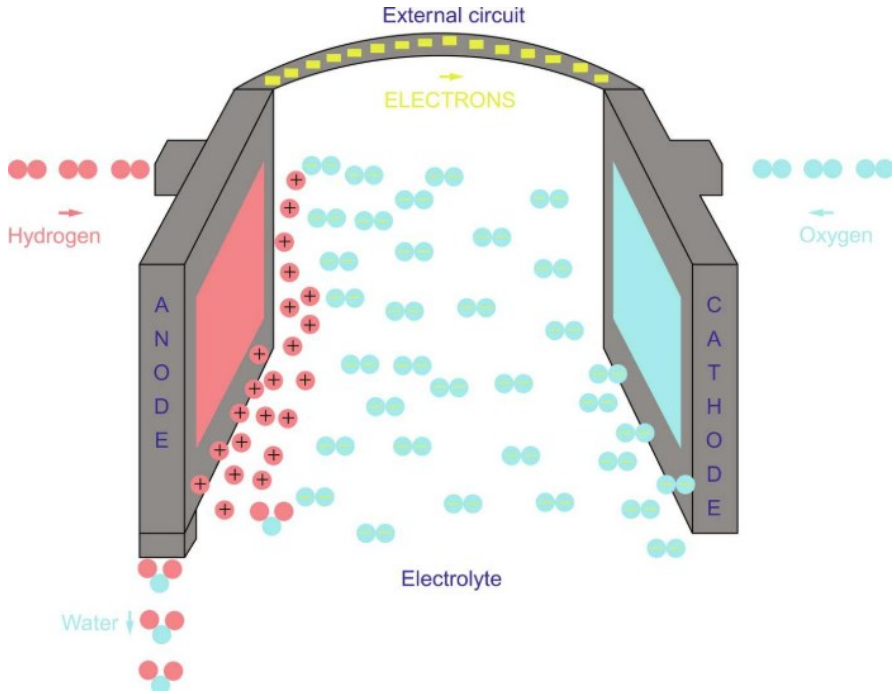


Kuva 5. Lasiuunin havainnekuva (Su et al., 2021)

Kuvassa 5 nähdään lasiuunin rakenne. Lasiuunin kuumasta kaasuvirrasta voitaisiin ottaa talteen hukkalämpöä, sekä myös uunin seinämät on havaittu kohteiksi, joista hukkalämpöä voitaisiin hyödyntää. (Yazawa et al. 2017)

2.2.5 Polttokennot

Polttokennot (Fuel Cell, FC) ovat yksi mahdollisista tulevaisuuden energiantuotanto tekniikoista. Polttokennot ovat sähkökemiallisia laitteita, jotka tuottavat sähköä suoraan kemiallisten reaktioiden kautta. Tämä pystytään tekemään ilman monimutkaisia energianmuuntoprosesseja. Sähkökemialliset reaktiot ovat energiatehokkain tapa muuntaa kemiallista energiaa sähköenergiaksi. (Shekhawat et al. 2011) Polttokennojen hyötysuhde on yleisesti 40–60 prosenttia. Suuri määrä energiaa menetetään siis häviöiden seurauksena hukkalämpönä. Polttokennojen hyötysuhdetta voitaisiin siis parantaa ottamalla talteen ja hyötykäyttämällä polttokennoprosessissa vapautuvaa hukkalämpöä. (Su et al. 2021) Polttokennot koostuvat yleisesti elektrolyyttikerroksesta, jonka eri puolilla on anodi- ja katodilevyt (Shekhawat et al. 2011). Polttokennon perusrakenne nähdään kuvasta 6.



Kuva 6. Polttokennon perusrakenne (Yahyaoui 2018)

Kuvasta 6 nähdään polttokennojen perusrakenne, joka koostuu neljästä eri osasta. Osat ovat anodi, katodi, elektrolyytti ja ulkoinen virtapiiri. Vaikka polttokennoja on montaa eri tyyppiä, niiden perusrakenne on samanlainen. Polttokennot voivat erota toisistaan, niissä käytettyjen erilaisten elektrolyyttien kautta.

Korkean lämpötilan hukkalämpöä vapautuu erityisesti kiinteäoksidipolttokennojen (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) toiminnassa. SOFC polttokennot toimivat noin 800–1000 °C lämpötilassa. Korkea lämpötila mahdollistaa yhteistuotannon, joka voi nostaa systeemin hyötysuhteen jopa 70 prosenttiin. Sulakarbonaattipolttokenno (Molten Carbonate Fuel Cells MCFC) on toinen polttokennotyyppi, jolla on korkea toimintalämpötila. Toimintalämpötila MCFC tekniikalla on hieman matalampi kuin SOFC tekniikalla, noin 600–700 °C. (Yahyaoui 2018)

Polttokennojen toiminnasta muodostuu savukaasuja, mutta ne poikkeavat polttamisessa muodostuvista savukaasuista. Ne sisältävät lähinnä vesihöyryä (Motiva 2025). Polttokennoissa voidaan käyttää myös muita polttoaineita, kuin vetyä. Polttoaineet, joita polttokennoissa voidaan myös käyttää ovat esimerkiksi bio- ja maakaasu. Tällöin polttokennojen savukaasuissa voi esiintyä myös hiilidioksidia, mutta se voidaan talteenottaa helposti. (Tony Leo 2023)

3 Eri tekniikat hukkalämmön talteenottoon

Tässä kappaleessa perehdytään tekijöihin, jotka vaikuttavat hukkalämmön talteenottotekniikan valintaan. Lisäksi perehdytään yksityiskohtaisemmin erilaisiin tekniikoihin, joilla korkean lämpötilan hukkalämpöä voidaan talteenottaa ja hyödyntää.

3.1 Talteenottotekniikan valinta ja siihen vaikuttavat tekijät

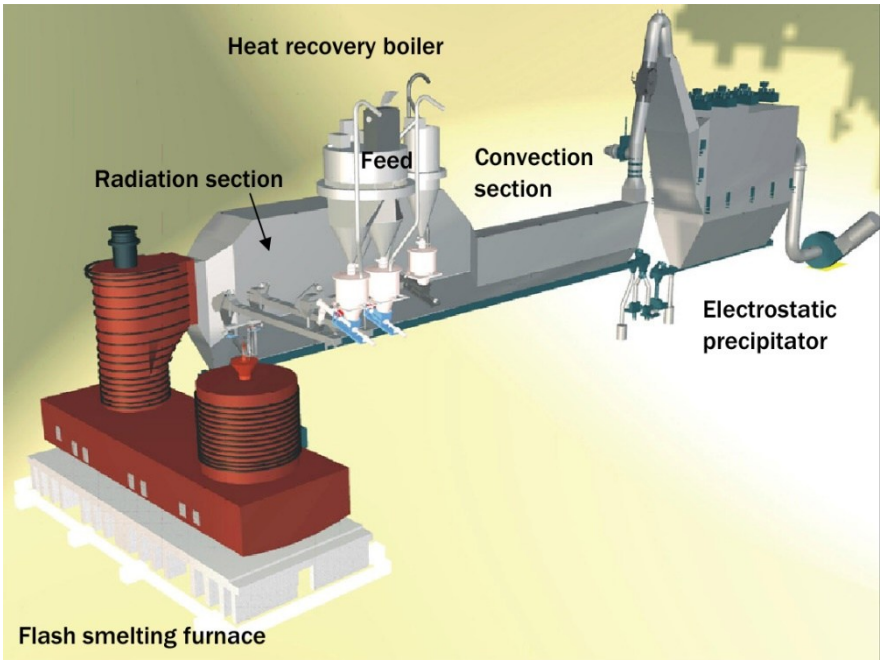
Prosessiteollisuuden termisissä prosesseissa hukkalämpöä muodostuu monissa erilaisissa kohteissa. Näin ollen kaikki talteenottotekniikat eivät ole sopivia jokaiseen käyttötarkoitukseen. Prosessiteollisuudessa voidaan ottaa lämpöä talteen esimerkiksi, jotta kuuma kaasuvirta saadaan viilennettyä, jotta se voidaan siirtää seuraavaan prosessin vaiheeseen tai ottaa talteen puhtaasti energiantuotannon tarpeisiin tai hyödyntää prosessin muiden eri vaiheiden tarkoituksiin. (Ganapathy 2003) On myös mahdollista, että lämpöä otetaan talteen molempia tarkoituksia varten samanaikaisesti. Valittavaan tekniikkaan vaikuttaa myös se, mihin talteen otettavaa lämpöenergiaa halutaan hyödyntää. Tätä lämpöenergiaa voidaan hyödyntää esimerkiksi prosessin muissa osissa tai siitä voidaan tehdä esimeriksi kaukolämpöä tai sähköä, jota voidaan myydä kuluttajille.

Kun tiedetään mihin hukkalämpöä halutaan hyödyntää, voidaan alkaa miettimään vaihtoehtoja sille, millä tekniikalla hukkalämpö saadaan hyödynnettyä haluttuun tarkoitukseen. Vaihtoehtoja rajaa kuitenkin muutama asia. Esimerkiksi, jos kaasuvirta, jonka mukana hukkalämpö tulee, on likaista, täytyy sitä puhdistaa tai hyödyntää talteenotossa sellaisia tekniikoita, jotka toimivat, vaikka kaasuvirta on likaista. Hukkalämpöä voidaan saada myös muista lähteistä kuin kuumista kaasuvirroista. Esimerkiksi uunien seinämistä voidaan kerätä talteen lämpöä. Eri hukkalämmön lähteet voivat vaatia erilaisen tekniikan, jotta lämpöä voidaan hyödyntää.

3.2 Jätelämpökattilat

Jätelämpökattilat tai hukkalämpökattilat (eng. Waste Heat Boiler, WHB), ovat kattiloita, jotka hyödyntävät esimerkiksi erilaisista uuneista, kuten sulatus- ja sementtiuuneista, ja eksotermisistä prosesseista vapautuvaa hukkalämpöä. Jätelämpökattilat poikkeavat siis huomattavasti perinteisistä kattiloista, joissa poltetaan polttoainetta lämmön tuottamiseksi. Jätelämpökattiloissa ei polteta mitään, vaan ne keräävät lämpöä talteen esimerkiksi poltto- ja sulatusprosessien prosessi- ja savukaasuvirroista. Jätelämpökattilat voivat tuottaa höyryä esimerkiksi lämmitystarkoituksiin tai turbiineille sähköntuotantoa varten. Jätelämpökattiloiden avulla voidaan myös tuottaa lämmintä vettä, jota voidaan käyttää esimerkiksi kaukolämpöverkon tarpeisiin. Jätelämpökattiloihin tulevat kaasuvirrat voivat sisältää likaa, ja jätelämpökattiloita käytetäänkin paljon juuri sellaisissa sovelluksissa, joissa kaasuvirrat sisältävät likaa. (Jouhara 2022)

Jätelämpökattilat koostuvat useista vesiputkista, jotka on aseteltu samansuuntaisesti toisiinsa nähden, hukkalämpöä sisältävän kaasuvirran virtaussuuntaa pitkin. Putket on sijoitettu virtaukseen nähden kohtisuoraan. On myös mahdollista, että putkissa virtaa jokin kaasu. Valtaosassa jätelämpökattiloista putkissa virtaava aine on kuitenkin vesi. (Jouhara 2022) Jätelämpökattiloita käytetään yleisesti metalliteollisuudessa, energiateollisuudessa ja sementtiteollisuudessa. Kuvassa 7 nähdään jätelämpökattila osana liekkisulatusprosessia.

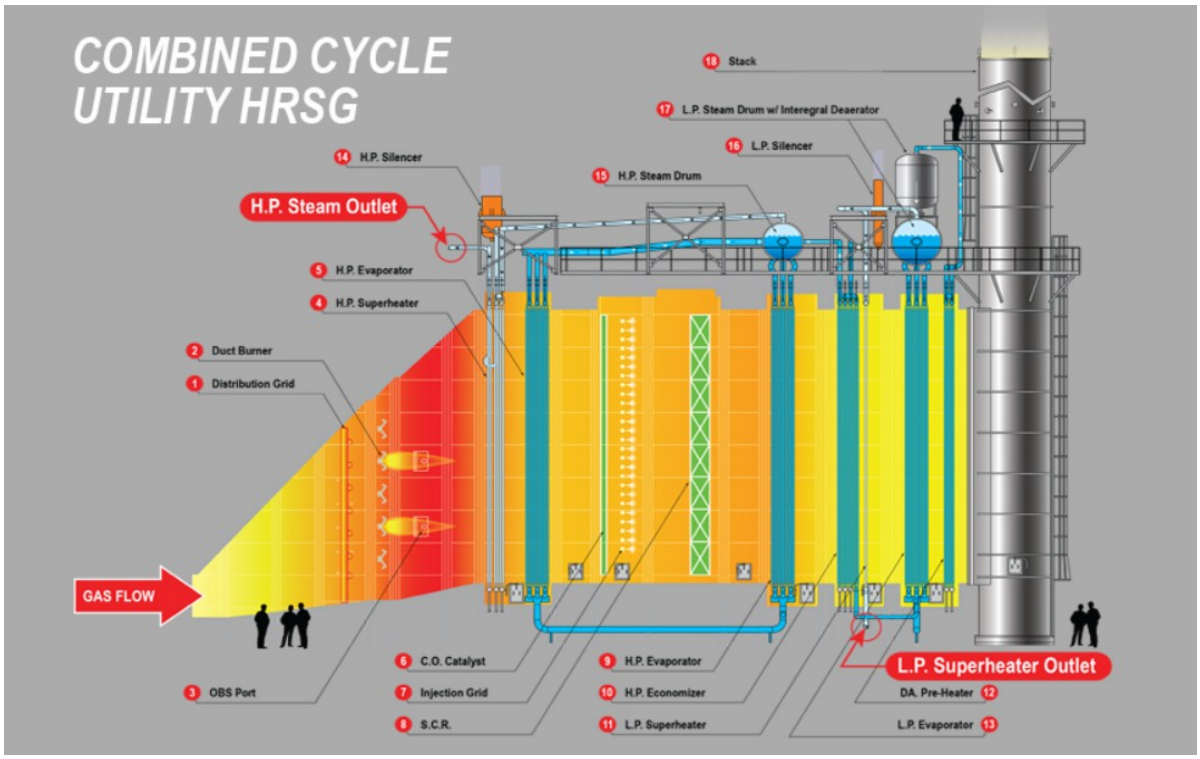


Kuva 7. Jätelämpökattila liekkisulatusprosessin osana (Miettinen, 2008)

Kuvasta nähdään myös, että jätelämpökattila jakautuu säteily- ja konvektio-osaan.

3.3 Lämmöntalteenottokattila

Lämmöntalteenottokattila (eng. Heat recovery steam generator, HRSG) on kattila, jota hyödynnetään tyypillisesti hukkalämmön talteenottoon kaasuturbiinin savukaasuista. HRSG:tä käytetään höyryntuotantoon, jonka avulla tuotetaan sähköä höyryturbiiniprosessin kautta. HRSG on monimutkaisempi ratkaisu, kuin WHB, sillä se voi sisältää jopa kaksi tai kolme painetasoa. HRSG ja WHB eroavat toisistaan myös niin, että HRSG:hen virtaavat savukaasut ovat tyypillisesti puhtaita, eivätkä ne likaa kattilaa samalla tavalla. HRSG:t ovat myös kooltaan isoja, kun niitä verrataan esimerkiksi jätelämpökattiloihin. Kuva 7 on havainnekuva lämmöntalteenottokattilasta.

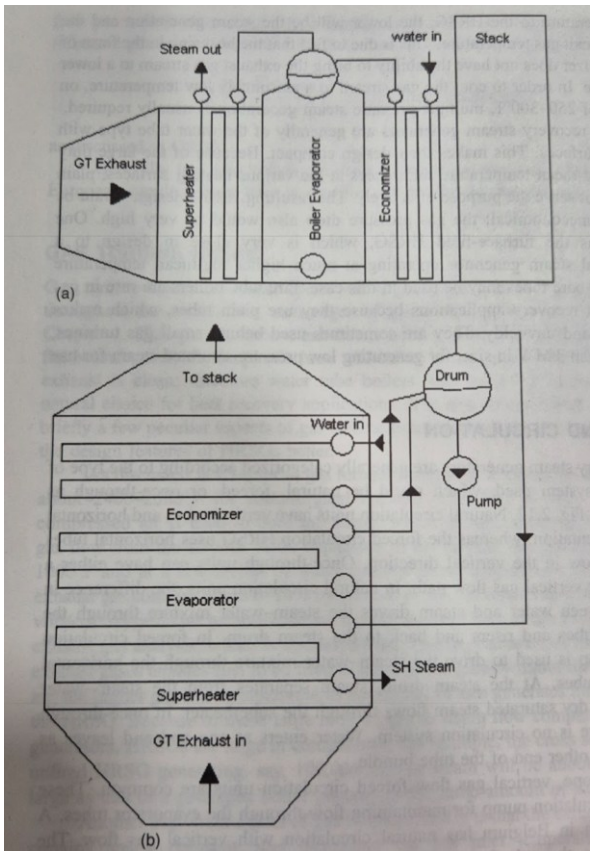


Kuva 8. Vaakamallisen lämmöntalteenottokattilan rakennekuva (Victory Energy 2025)

Kuvasta 8 nähdään lämmöntalteenottokattilan rakennetta ja sen eri osia. Kuvasta voidaan nähdä esimerkiksi se, että kattilassa on kaksi painetasoa, korkea- ja matalapainetaso. Painetasoja voi olla jopa kolme. Yleisimmin painetasoja on kolme. (Jouhara et al. 2018) Painetasojen avulla saadaan parannettua hyötysuhdetta. Kuvassa nähdään myös, että lämmöntalteenottokattila sisältää ekonomaiserin, höyrystimen ja tulistimen.

Lämmöntalteenottokattilan suuri koko tulee myös esille kuvassa 8, jossa kattilan kokoa on havainnollistettu ihmishahmojen avulla.

Lämmöntalteenottokattiloita on vaaka- ja pystymallisia. Lämmöntalteenottokattilat voidaan luokitella niiden kiertotapojen avulla. Mahdollisia kiertotapoja ovat luonnonkierto ja pakotettu kierto. Luonnonkiertoa käytettäessä lämmöntalteenottokattilan putket ovat pystysuunnassa, ja kaasuvirtaus kulkee putkien läpi vaakasuunnassa. Pakkokierrossa putket ovat vaakasuunnassa ja kaasuvirtaus kulkee pystysuunnassa putkien läpi. Luonnonkierrossa putkissa oleva veden ja höyryn seos liikkuu veden ja höyryn tiheyserojen avulla. Pakotetun kierron kattiloissa seosta pakotetaan liikkumaan pumpun avulla. (Ganapathy 2003) Kuvassa 9 nähdään esimerkki vaaka- ja pystymallisesta lämmöntalteenottokattilasta. Kuvan ylempi piirros a esittää vaakamallista ratkaisua ja alempi piirros b pystymallista ratkaisua.



Kuva 9. Vaaka- ja pystymallisten lämmöntalteenottokattiloiden esimerkkikuvat (Ganapathy 2003)

Kuvasta 9 nähdään myös, että vaakamallinen kattila on luonnonkiertokattila, jossa veden ja höyryn seos liikkuu tiheys- ja paine-erojen avulla ja pystymallinen pakkokiertokattila, jossa seos liikkuu putkissa pumpun avulla.

3.4 Lämpöakut ja lämpövarastot

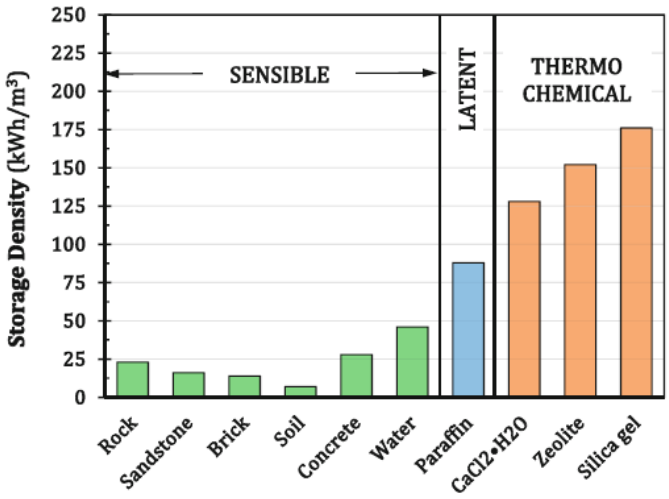
Lämpöakut ja lämpövarastot ovat yksi mahdollinen tekniikka, jolla voidaan talteenottaa korkean lämpötilan hukkalämpöä. Lämpövarastot (Thermal Energy Storage, TES) ovat hyödyllisiä, kun syntyvällä hukkalämmölle ei ole välitöntä käyttötarkoitusta tai tarvetta. Jos hukkalämmölle ei ole välitöntä tarvetta, voidaan se lämpövaraston avulla hyödyntää myöhemmin, kun tarvetta on. Näin saadaan parannettua erilaisten prosessien energiatehokkuutta ja vähennettyä päästöjä pienemmän primäärinenergian käytön kautta.

Lämpöakut ja lämpövarastot voidaan jakaa kolmeen osaan. Ne voivat varastoida lämpöä faasimuutoksen avulla ja vapauttaa lämmön, kun faasimuutos tapahtuu toiseen suuntaan. Lämpö voidaan myös varastoida niin, että varastointimateriaalien lämpötilaa kasvatetaan. On myös mahdollista varastoida lämpö termokemiallisesti endotermisissä reaktioissa syntyviin kemiallisiin sidoksiin. (Dincer & Ezan 2018)

Latenttilämmön varastot (Latent Heat Thermal Energy Storage LHTES) sisältävät faasimuutosmateriaaleja (Phase Change Material, PCM). Tällaisissa lämpövarastoissa lämpö varastoidaan hyödyntämällä palautuvaa faasimuutosta. Palautuva faasimuutos tarkoittaa sitä, että faasimuutos voidaan tehdä molempiin suuntiin useita kertoja. Faasimuutoksen aikana lämpöä voidaan varastoida tai vapauttaa. LHTES:n uskotaan olevan yksi lupaavimmista energian varastointitekniikoista, sen korkean energian varastointitiheyden ansiosta. LHTES pysyy myös vapauttamaan lämpöä tasaisesti. LHTES on ollut käytössä esimerkiksi metalliteollisuudessa jo 1970-luvulta lähtien korkean lämpötilan hukkalämmön varastoinnissa. (Xu et al. 2017)

Toinen keino eli tuntuvan lämpöenergian varasto (Sensible Heat Thermal Energy Storage, SHTES) Siinä lämpövarastomateriaalin lämpötilaa nostetaan. Varastoidun lämpöenergian määrä on suoraan verrannollinen varaston lämpötilaan. SHTES ratkaisut täytyy eristää hyvin, koska ympäristön ja lämpövaraston välinen lämpötilaero lisää häviöitä. SHTES tekniikassa varastointimateriaaleina voidaan käyttää erilaisia nesteitä, kuten vettä, öljyjä tai sulatettua suolaa. Myös kiinteitä aineita, kuten metalleja, voidaan käyttää varastointiaineena. (Dincer & Ezan 2018)

Kolmas vaihtoehto on termokemiallinen lämpöenergian varasto (Thermochemical Energy Storage, TCES) , jossa endotermisissä reaktiossa muodostuviin kemiallisiin sidoksiin voidaan sitoa energiaa. Endoterminen reaktio vaatii ulkopuolista lämpöenergiaa, joka voidaan saada termisistä prosesseista syntyvästä hukkalämmöstä. Reaktioissa syntyvät reaktiotuotteet varastoidaan eristettynä toisistaan ja ympäristöstä. Kun lämpöä halutaan hyödyntää, voidaan reaktio aikaansaada takaperin yhdistämällä syntyneet reaktiotuotteet, jolloin saadaan aikaan eksoterminen reaktio, jossa vapautuu lämpöä. Termokemiallisten varastojen energiatiheys on hyvin suuri ja hyötysuhde on myös korkea. Kun verrataan TCES tekniikkaa SHTES tekniikkaan, TCES tekniikan varastointitiheys voi olla jopa kymmenkertainen. (Dincer & Ezan 2018) Kuvassa 10 nähdään eri tekniikoiden energianvarastointitiheyksiä.



Kuva 10. Lämpöakkujen- ja varastojen varastomateriaalien varastointitiheyksiä (Dincer & Ezan 2018)

Kuvasta nähdään hyvin, että termokemiallisten varastojen varastointitiheydet ovat huomattavasti isompia kuin latentti- ja tuntuvan lämpöenergian varastojen materiaalien varastointitiheydet. Taulukossa 1 on koottu lämpövarasto- ja akkutekniikoiden tyypillisiä ominaisuuksia ja tunnuslukuja.

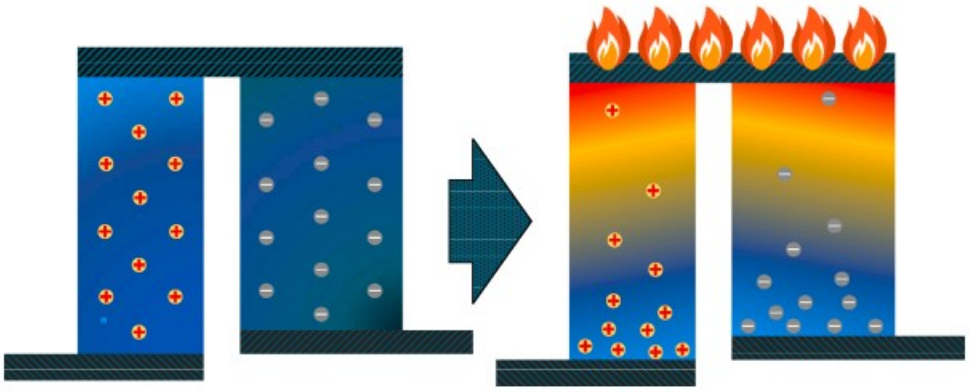
Taulukko 1. Lämpöakku- ja varastointitekniikoiden tunnuslukuja (Dincer & Ezan 2018)

Tekniikka	Teholuokka MW_{th}	Varastointiajanjakso	Hyötysuhde (%)
SHTES	0.001–10	Päivä-Kuukausi	50–90
LHTES	0.001–1	Tunti-Päivä	75–90
TCES	0.01–1	Tunti-Kuukausi	75–100

Taulukosta 1 nähdään, että TES tekniikoiden parhaat hyötysuhteet ovat TCES tekniikalla, mutta sen kapasiteetti on pienempi kuin esimerkiksi SHTES tekniikalla. Tätä eroa tasoittaa kuitenkin se, että TCES tekniikalla energiatiheys on huomattavasti parempi, niin kuin aikaisemmin todettiin, joten sama teho saadaan varastoitua pienempään tilaan. LHTES asettuu SHTES ja TCES tekniikoiden väliin. LHTES tekniikalla on hieman paremmat hyötysuhteet kuin SHTES tekniikalla, mutta sen varastointiajanjakso on huomattavasti lyhyempi.

3.5 TEG-moduulit

TEG-moduuli eli lämpösähköinen generaattori on laite, joka pystyy tuottamaan sähköä lämpötilaerojen avulla. TEG-moduulit hyödyntävät Seebeck'n ilmiötä. Seebeck'n ilmiö on lämpösähköinen ilmiö, joka tuottaa sähkömotorisen voiman ja saa aikaan sähkövirran. TEG-moduulit koostuvat kuumasta ja kylmästä puolesta. Kuuma ja kylmä puoli koostuvat eri johdemateriaaleista. Tällaista kutsutaan termiseksi pariksi. Kuvassa 9 nähdään havainnekuva termisestä parista ja siinä lämpötilaeron johdosta tapahtuvasta Seebeck'n ilmiöstä. (Tohidi et al. 2022)



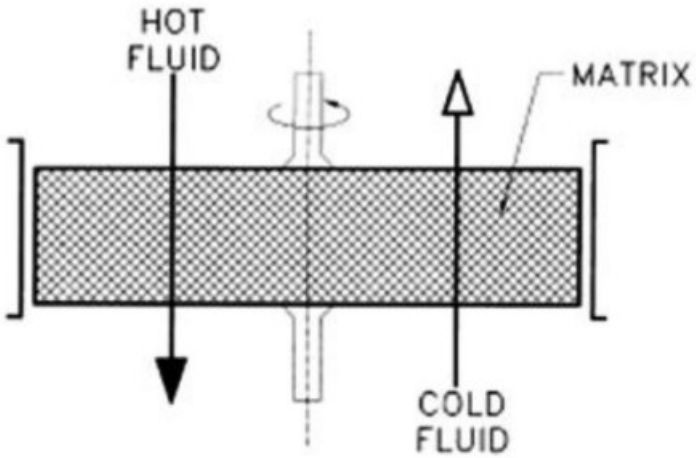
Kuva 11. Seebeck'n ilmiö termisessä parissa (Tohidi et al. 2022)

Kuvassa 11 nähdään miten lämpötilaeron vaikutuksesta termisen parin vapaat varauksen kuljettajat, aukot ja elektronit, (eng. holes and electrons), keskittyvät suurelta osin termisen parin kylmään päähän, joka saa aikaan jännite-eron parin avoimien päiden välillä. (Tohidi et al. 2022)

TEG-moduulien voidaan katsoa vielä olevan kehitysvaiheessa. TEG-moduulien ongelmana on esimerkiksi niiden alhainen hyötysuhde, joka on hankaloittanut niiden käyttöä laajassa mittakaavassa. TEG-moduulit voivat olla toimiva ratkaisu, jos hyötysuhteella ei ole niin suurta merkitystä, esimerkiksi juuri hukkalämpökäytössä, jolloin ilman hyödyntämistä kaikki lämpö menetetään ilman hyötyä. TEG-elementit ovat olleet viimevuosina lukuisten eri tutkimusten kohteena, ja niitä yritetään kehittää koko ajan. TEG-elementit voisivat siis tulevaisuudessa olla yksi mahdollinen hukkalämmön hyödyntämistapa. (Tohidi et al. 2022)

3.6 Regeneratiiviset lämmönvaihtimet

Regeneratiiviset lämmönvaihtimet tai toiselta nimeltään regeneraattorit ovat lämmönvaihtimia, joissa esimerkiksi savukaasuista hyödynnettävää lämpöä talteenotetaan ja varastoidaan väliaikaisesti lämmönsiirtimeen, ja sen jälkeen se vapautetaan esimerkiksi palamisilmaan. (Wärtsilä 2025) Esimerkkinä voidaan käyttää pyörivää regeneratiivista lämmönvaihdinta, joka nähdään kuvassa 12.



Kuva 12. Pyörivän regeneratiivisen lämmönvaihtimen havainnekuva (Hajabdollahi & Shafiey 2020)

Kuvasta nähdään, että lämmönvaihdin on pyörivä kiekko, jonka eri puolilla sen läpi virtaa kuuma ja kylmää fluidia. Kiekko varaa lämpöä itseensä kuumasta fluidivirrasta ja pyöriessään se vapauttaa sen kylmään fluidivirtaan. Regeneratiivisia lämmönvaihtimia voi esimerkiksi käyttää palamisilman esilämmitykseen. Lämpö voidaan ottaa palamisesta vapautuvista savukaasuista ja johtaa regeneratiivisen lämmönvaihtimen läpi. Palamisilma johdetaan saman lämmönvaihtimen läpi, joka vapauttaa lämmön palamisilmaan.

4 Mahdolliset talteenottoratkaisut eri kohteissa

Tässä kappaleessa käydään läpi esitetyille hukkalämmön lähteille tekniikoita, joilla niistä muodostuvaa korkean lämpötilan hukkalämpöä on mahdollista hyödyntää. Vaihtoehtoja on esitelty taulukkomuodossa.

4.1 Talteenottotekniikat eri kohteille

Taulukossa 2 esitellään eri talteenottotekniikoita jo aiemmin esitellyille teollisuuden alojen korkean hukkalämmön tuotannon kohteille. Taulukossa kerrotaan hyödynnettävä tekniikka, mistä hukkalämpö talteenotetaan, ja onko hukkalämpövirta likaista vai puhdasta. Taulukko on koottu kappaleiden 2. ja 3. tietojen perusteella.

Taulukko 2. Eri käyttökohteille mahdollisia hukkalämmön talteenottotekniikoita ja tekniikoille sopivat hukkalämmön ominaisuudet.

Tekniikka	Käyttökohteet	Hukkalämmön lähde	Hukkalämmön ominaisuudet
Jätelämpökattila	Sulatus- ja sementtiuunit	Savukaasut, prosesikaasut	Lika
Lämmön talteenottokattila	Kaasuturbiinit	Savukaasut	Puhtaus
Lämpöakut- ja varastot	Metalliteollisuus	Savukaasut, prosessikaasut	Lika tai puhtaus
TEG-moduulit	Uunien seinämät	Kaasu- ja nestevirrat, uunien seinämät	Lika tai puhtaus
Regenratiiviset lämmönvaihtimet	Polttokattilat	Savukaasut	Puhtaus

Taulukosta 1 nähdään, että jätelämpökattilat sopivat likaisiin sovelluksiin kuten erilaisille sulatus uuneille sekä sementtiuuneille. Saman tyyliset, mutta monimutkaisemmat lämmöntalteenottokattilat sopivat kaasuturbiineille, koska kaasuturbiinien savukaasut ovat puhtaita. Lämpöakut- ja varastot sopivat yleisesti moniin metalli- ja energiateollisuuden sovelluksiin, joissa esiintyy likaisia tai puhtaita sovelluksia. Myös muut alat, joilla esiintyy termisiä prosesseja ovat mahdollisia hyödynnyskohteita, esimerkiksi polttokennojen savukaasuista olisi mahdollista varastoida lämpöä lämpöakkuihin- ja varastoihin. TEG-moduuleita voidaan hyödyntää hyvin monissa erilaisissa tilanteissa ja paikoissa, kuten uunien seinämissä. Mahdollisia käyttökohteita on erittäin paljon. Regeneratiiviset lämmönvaihtimet sopivat erilaisten kattiloiden savukaasujen hukkalämmön hyödyntämiseen. Ne vaativat kuitenkin yleensä puhtaan savukaasun toimiakseen. Tässä kappaleessa esitettyjen kohteiden lisäksi löytyy muitakin termisiä prosesseja, joiden hukkalämmön hyödyntämiseen esitellyt tekniikat ovat soveltuvia.

5 Johtopäätökset

Korkean lämpötilan hukkalämmön talteenotto termisistä prosesseista on hyvin tärkeä aihe nykypäivänä. Sen avulla voidaan edistää ilmastonmuutoksen hillitsemistä, koska näin voidaan vähentää primäärienergian käyttöä, kun saadaan käytetystä energiasta enemmän hyödyksi, tai ainakin vähentää energian käytön kasvutarvetta. Tämä taas vähentää energiankulutuksesta aiheutuvia päästöjä. Hukkalämmön hyödyntäminen tulee tulevaisuudessa todennäköisesti olemaan hyvin suosittua, koska sen avulla voidaan parantaa energiatehokkuutta ja pienentää päästöjä. Jotkin päästöt maksavat päästökaupan myötä ja näin ollen päästökaupan piiriin kuluvien päästöjen pienentäminen voi olla kannattavaa. Päästövähennystavoitteet ja päästöoikeuksien hinnan nousu todennäköisesti lisäävät hukkalämmön hyödyntämistä, koska mainitulla energian kulutuksen mahdollisella vähentämisellä ja paremmalla hyötykäytöllä voidaan päästöoikeuksien ostoa minimoida.

Monet jo mainitut hukkalämmön erilaiset ominaisuudet vaikuttavat kuitenkin sen hyödyntämiseen monella tavalla. Esimerkiksi hukkalämmön kaasuvirtojen likaisuus rajaa mahdollisia käytettäviä tekniikoita pois, koska lika voi aiheuttaa eri tekniikoille toimintavaikeuksia, kuten virtauskanavien tukkeutumista esimerkiksi regeneratiivisten lämmönvaihdinten tapauksessa. Myös lämmönsiirtopintojen likaantuminen tulee ottaa huomioon, koska likaantuminen huonontaa tunnetusti lämmönsiirtotehoa. Osan tekniikoita voi rajata ulos niiden kokoluokka. Esimerkiksi lämmöntalteenottokattilat ovat yleensä erittäin isoja ja vaativat paljon tilaa, jota kaikilla jo valmiiksi olemassa olevilla teollisuusalueille ei välttämättä ole paljoa tarjolla. Myös se onko hukkalämmön tuotanto jaksoittaista vai tapahtuuko sitä jatkuvasti, voi vaikuttaa tekniikoiden valintaan. Eräprosessien hukkalämmön hyödyntämiseen hyviä ratkaisuita voisivat olla esimerkiksi lämpövarastot.

Lähteet

Breeze, P.A. 2016 Gas-Turbine Power Generation. Amsterdam, Netherlands, Academic Press. Saatavissa:https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780128040058/gas-turbine-power-generation

Colangelo, S. 2024 Reducing the environmental footprint of glass manufacturing. International Journal of Applied Glass Science 15(4): 350–366. Saatavissa: https://doi.org/10.1111/ijag.16674

Dincer, I. et al. 2018. Heat Storage: A Unique Solution for Energy Systems. Cham: Springer International Publishing. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91893-8

El-Shafie, M. et al. 2021. Design of a heat recovery unit using exhaust gases for energy savings in an absorption air conditioning unit. Applied Thermal Engineering 194: 117031. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117031

Energy Institute. 2024. Statistical Review of World Energy. [Verkkoaineisto] [Viitattu 20.3.2025] Saatavissa: https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/az/pdf/2024/Statistical-Review-of-World-Energy.pdf

Finnsementti. 2025. Sementin valmistuksen prosessi. [Verkkoaineisto] [Viitattu 13.3.2025]

Saatavissa: https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/sementin_valmistus_NETTI.pdf

Forman C, et al. B 2016 Estimating the global waste heat potential. Renewable & Sustainable Energy Reviews 57: 1568–1579. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192

Ganapathy, V. 2003. Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators: Design, Applications, and Calculations. New York: Dekker.

Ghalandari, V. 2022 A comprehensive study on energy and exergy analyses for an industrial-scale pyro-processing system in cement plant. Cleaner Energy Systems 3: 100030. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100030

Hajabdollahi, H., Shafiey, D.M. 2020. Rotary regenerator: Constructal thermoeconomic optimization. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 113: 231–240. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.08.020

Jouhara, H. 2022. Waste Heat Recovery in Process Industries. Weinheim, Germany: Wiley-VCH. Saatavissa: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt013EHQI1/waste-heat-recovery-in/thermodynamic-cycles

Jouhara, H. et al. 2018. Waste heat recovery technologies and applications. Thermal Science and Engineering Progress 6: 268–289. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017

Krunniva, M (2012) AOD-Prosessin 4-Vaiheen Puhalluksen Optimointi. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/40863/Krunniniva_Miika.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Luomala, M. 2023 Kuparin Ja Nikkelikiven Valmistus Boliden Harjavallassa. [Verkkoaineisto] [Viitattu 13.3.2025] Saatavissa: https://cc.oulu.fi/~kamahei/m/477427A/2023/KLTP2023-Luomala.pdf.

Metso, 2025. Flash Smelting Process. [Verkkoaineisto] [Viitattu 13.3.2025] Saatavissa: https://www.metso.com/portfolio/flash-smelting-process/.

Miettinen, E. 2008 Thermal Conductivity and Characteristics of Copper Flash Smelting Flue Dust Accretions. [Verkkoaineisto] [Viitattu 14.3.2025] Saatavissa: https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-22-9562-3

Motiva. 2025. Polttokennoauto. [Verkkoaineisto] [Viitattu 15.3.2025] Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/autotyyppi/polttokennoauto.

Schmidt, A. et al. 2023. Flue Dust Reactions and Sticking Mechanisms in a Copper Flash Smelting Furnace Waste Heat Boiler: A Sampling Study. Journal of Sustainable Metallurgy 9(2): 848–859. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/s40831-023-00691-4

Shekhawat D. et al. 2011. Fuel Cells: Technologies for Fuel Processing. Amsterdam The Netherlands. Elsevier. Saatavissa: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00BIPZ12/fuel-cells-technologies/introduction-fuel-processing

Razak AMY (2007) Industrial Gas Turbines : Performance and Operability. Boca Raton, Florida ;: CRC Press. Saatavissa: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00C6R9G4/industrial-gas-turbines/introduction

Su, Z. et al. 2021. Opportunities and strategies for multigrade waste heat utilization in various industries: A recent review. Energy Conversion and Management 229: 113769. Saatavissa: https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1016/j.enconman.2020.113769

Tohidi, F. et al. 2022. Thermoelectric Generators: A comprehensive review of characteristics and applications. Applied Thermal Engineering 201: 117793. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117793

Tony, Leo. 2023 Benefits of Fuel Cells in Energy Efficient Power Generation. [Verkkoaineisto] [Viitattu 15.3.2025] Saatavissa: https://www.fuelcellenergy.com/blog/benefits-of-fuel-cells.

Victory Energy. 2025. Combined Cycle Utility HRSG. [Verkkoaineisto] [Viitattu 15.3.2025] Saatavissa: https://victoryenergy.com/heat-recovery/gt-hrsg-power-utility/

Wärtsilä. 2025. Regenerative Heat Exchanger. [Verkkoaineisto] [Viitattu 12.4.2025] Saatavissa: https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/regenerative-heat-exchanger.

Xu, H. et al. 2017. Application of material assessment methodology in latent heat thermal energy storage for waste heat recovery. Applied Energy 187: 281–290. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.070

Yahyaoui, I. 2018. Advances in Renewable Energies and Power Technologies. Biomass, Fuel Cells, Geothermal Energies, and Smart Grids Elsevier Science. Saatavissa: https://www-vlebooks-com.ezproxy.cc.lut.fi/Product/Index/1310248

Yazawa, K. et al. 2017. Thermoelectric heat recovery from glass melt processes. Energy Oxford 118: 1035–1043. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.136