Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Kemian tekniikan kandidaattiohjelma

Raudan ja teräksen valmistuksessa syntyvien kuonien kuivagranulointi

Janette Krekola

Kandidaatin tutkielma
2025

Copyright ©2025 Janette Krekola

Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Tekijä Janette Krekola

Työn nimi Raudan ja teräksen valmistuksessa syntyvien kuonien kuivagranulointi

Koulutusohjelma Kemian tekniikan kandidaattiohjelma

Pääaine CHEM3050 Kemian tekniikka ja prosessit

Valvoja TkT Jari Aromaa

Työn ohjaaja(t) TkT Marko Kekkonen

Päivämäärä 22.12.2025 **Sivumäärä** 37 **Kieli** suomi

Tiivistelmä

Raudan ja teräksen tuotannossa syntyy paljon sivutuotteita, joista suurin osa on kiinteää kuonaa. Kuonan hyödyntäminen muilla teollisuuden aloilla vähentää luonnonvarojen kulutusta ja CO_2-päästöjä sekä parantaa terästeollisuuden materiaalitehokkuutta. Rauta- ja teräskuonien käyttömahdollisuudet riippuvat prosessista, jossa kuonaa syntyy, kemiallisesta koostumuksesta ja kuonien jäähdytystavasta. Hitaasti ilmajäähdytetty kuona kiteytyy, jolloin sen käyttömahdollisuudet ovat rajalliset. Granuloinnilla kuona voidaan jäähdyttää nopeasti, jolloin sen kiinteä rakenne on enimmäkseen amorfista. Amorfista, lasimaista kuonaa voidaan hyödyntää mahdollisesti esimerkiksi sementin valmistuksessa.

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan kuivagranuloitujen rauta- ja teräskuonien soveltuvuutta sementin valmistuksen lisäaineeksi. Työn tavoitteena on selvittää olemassa olevan kirjallisuuden avulla, mitä mahdollisuuksia kuivagranulointi tarjoaa kuonien jäähdytysmenetelmänä ja voiko se olla parempi vaihtoehto verrattuna laajasti käytettyyn märkägranulointiin. Kirjallisuuskatsauksen perusteella kuivagranuloitua masuunikuonaa voidaan hyödyntää sementin valmistuksessa, kun taas konvertteri- ja valokaariuunikuonien soveltuvuutta ei voida varmuudella todeta.

Avainsanat kuivagranulointi, masuunikuona, konvertterikuona, valokaariuunikuona

Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Author Janette Krekola

Title of thesis Dry granulation of slags generated in iron and steel production

Programme Bachelor's Programme in Chemical Engineering

Major CHEM3050 Chemical Engineering and Processes

Thesis supervisor D.Sc. Jari Aromaa

Thesis advisor(s) D.Sc. Marko Kekkonen

Date 22.12.2025 **Number of pages** 37 **Language** Finnish

Abstract

Iron and steel production generates a significant amount of co-products, most of which are solid slags. The utilization of these iron and steel slags in other industrial sectors can reduce natural resource consumption, lower CO_2 emissions, and improve material efficiency in the steel industry. The potential applications of iron and steel slag depend on production process and the chemical composition of the slag. The cooling method of molten slag affects its suitability for different uses. Slow air-cooling allows crystallization of mineral phases, resulting in a low-value product with limited applications. Rapid cooling through granulation can generate a mostly amorphous, glassy structure, that could make the slag suitable for utilization in cement production.

This bachelor's thesis is a literature review that examines the suitability of dry-granulated iron and steel slags for use in cement production. It presents research on various dry granulation techniques and briefly discusses the widely used wet granulation method. The aim of the thesis is to investigate what possibilities dry granulation offers as a slag cooling method and what advantages it could have over wet granulation. Based on the literature, dry granulated blast furnace slag could be utilized in cement production. The suitability of converter and electric arc furnace slags was not reliably determined.

Keywords dry slag granulation, blast furnace slag, converter slag, electric arc furnace slag

Sisällys

1 Johdanto 6
2 Rauta- ja teräskuonat 8
2.1 Masuunikuona 10
2.2 Teräskuonat 12
2.2.1 Konvertterikuona 13
2.2.2 Valokaariuunikuona 14
3 Kuonien jäähdytysmenetelmät 15
3.1 Ilmajäähdytys 15
3.2 Pelletointi 15
3.3 Granulointi 16
4 Kuivagranulointi 18
4.1 Ilmapuhallus 19
4.1.1 Masuunikuona 20
4.1.2 Konvertterikuona 21
4.1.3 Valokaariuunikuona 22
4.2 Pyörivä rumpu 23
4.3 Pyörivä levy/kuppi 23
4.3.1 Masuunikuona 24
4.3.2 Teräskuonat 26
4.4 Teräskuulia hyödyntävä menetelmä 26
4.5 Kuivagranulointimenetelmien vertailu 28
5 Yhteenveto 29
Lähteet 31

1 Johdanto

Teräksen tuotannossa syntyy noin 200–400 kilogrammaa sivutuotteita jokaista tuotettua terästonnia kohden. Sivutuotteista noin 90 massaprosenttia koostuu kiinteästä kuonasta, ja loput muodostuvat pölystä, lietteestä ja muista aineista. Vuosittain rauta- ja teräskuonaa syntyy sivutuotteena yli 400 miljoona tonnia. Kuonien hyödyntäminen muilla teollisuuden aloilla säästää luonnonvaroja ja vähentää hiilidioksidipäästöjä sekä prosesseista jäljelle jäävää jätettä. (World Steel Association 2021.) Terästeollisuudessa syntyvien sivutuotteiden talteenotto ja hyödyntäminen yhdistettynä luonnonvarojen vastuulliseen hallintaan ovat osaltaan nostaneet terästuotannon materiaalitehokkuuden jopa 98 prosenttiin vuonna 2023 (World Steel Association 2024).

Teräksen tuotannolla on merkittävä ympäristövaikutus, koska se kuluttaa paljon energiaa sekä tuottaa hiilidioksidipäästöjä. Teollisuuden aloihin kohdistuu jatkuvasti painetta vähentää kokonaispäästöjään ilmastonmuutoksen vuoksi (Conejo ym. 2020). Tämän vuoksi tulisi kehittää tapoja tehostaa teräksen tuotantoa, mutta myös varmistaa, että siitä sivutuotteena syntyvät kuonat kierrätetään mahdollisimman hyvin.

Terästeollisuuden kuonat koostuvat pääosin kalsium-, pii-, magnesium-, alumiini- ja rautaoksideista. Kuonan mahdollinen käyttökohde riippuu prosessista, jossa kuonaa syntyy sekä sen kemiallisesta koostumuksesta ja jäähdytysmenetelmästä. (World Steel Association 2021.)

Raudan ja teräksen valmistuksessa käytetään tyypillisesti pyrometallurgisia korkealämpötilaprosesseja. Näistä sivutuotteena saatavien sulien kuonien jäähdytystapa vaikuttaa siihen, minkälaiseen jatkokäyttöön kuonat soveltuvat. Ilmajäähdytys, jossa kuonamassojen annetaan jäähtyä luonnollisesti, tapahtuu hitaasti. Hitaasti jäähtyessä kuonan rakenne kiteytyy, jolloin sen käyttökohteet ovat rajatumpia. Kiteisellä kuonalla on myös alhaisempi taloudellinen arvo. (Barati & Jahanshahi 2020.) Granuloinnilla sula kuona-aines on mahdollista jäähdyttää nopeasti, jolloin sen rakenne jää amorfiseksi. Nopeasti jäähdytettyä lasimaista kuonaa voidaan hyödyntää esimerkiksi sementin valmistuksessa. (Smith 2017.)

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan kuivagranuloinnin soveltuvuutta rauta- ja teräskuonien jäähdytysmenetelmäksi sementin valmistuksessa. Sementin valmistuksen CO_2-päästöjä voidaan vähentää korvaamalla osa portlandklinkkeristä terästeollisuuden kuonilla. Kuuma sula kuona täytyy jäähdyttää ennen sen jatkokäyttöä, ja tässä tutkielmassa paneudutaan erityisesti kuivagranulointiin jäähdytysmenetelmänä sen potentiaalisen kustannus- ja energiatehokkuuden takia. Tutkielman tavoite on aiheesta löytyvän

kirjallisuuden avulla vertailla eri kuivagranulointimenetelmiä ja selvittää, mitä tutkimusta aiheesta on tehty. Märkägranulointi käsitellään lyhyesti, sillä se on jo laajamittaisesti käytössä etenkin masuunikuonan jäähdytyksessä.

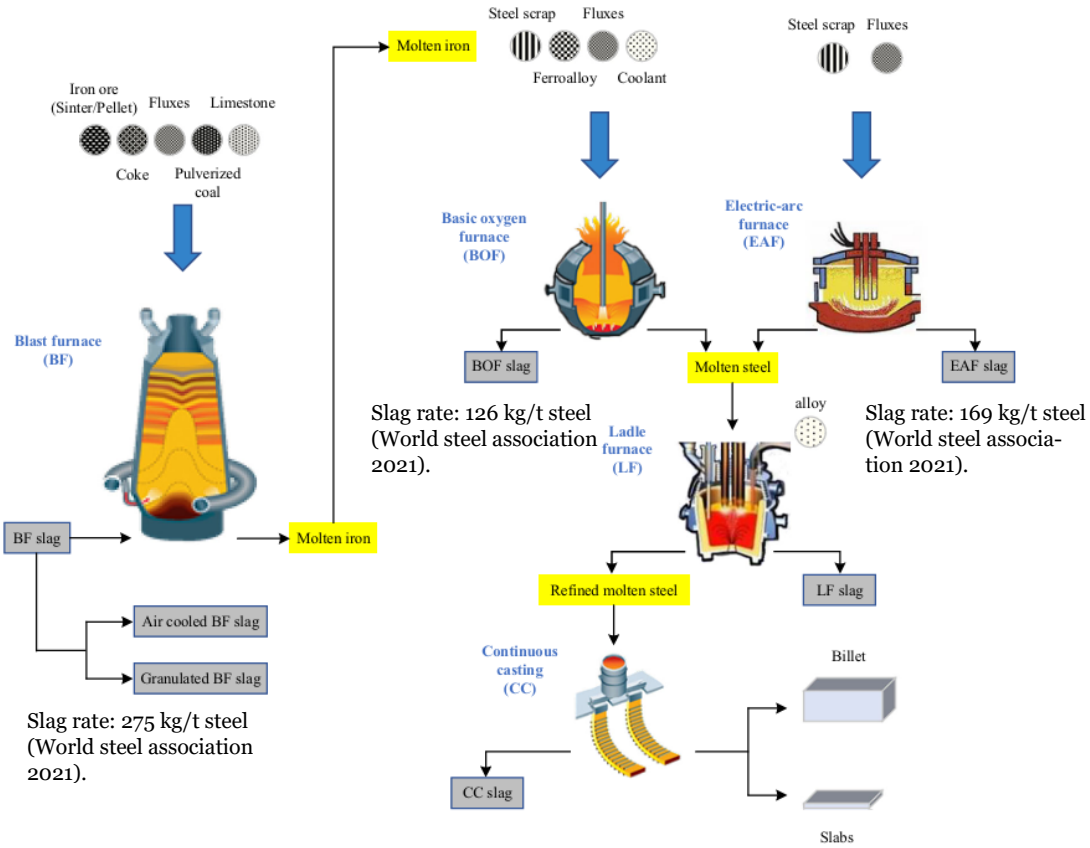
Tutkielmassa pohjustetaan ensin aiheen taustaa hyödyntämällä olemassa olevaa kirjallisuutta. Työssä selvitetään teorian avulla luvussa 2, mitä rauta- ja teräskuonat ovat ja mitä käyttökohteita niillä on. Tämän jälkeen esitetään rauta- ja teräskuonien mahdollisia jäähdytysmenetelmiä luvussa 3. Jäähdytysmenetelmistä kuivagranuloinnin eri tapoihin keskitytään luvussa 4. Luvussa 5 kootaan yhteen kirjallisuuskatsauksen keskeiset havainnot.

Tämä on Aalto-yliopiston kemian tekniikan korkeakoulun kandidaatintutkielma aiheesta raudan ja teräksen valmistuksessa syntyvien kuonien kuivagranulointi. Tutkielma on kirjallisuuskatsaus painottuen rauta- ja teräskuonien kuivagranulointiin ja niiden hyödyntämiseen sementin valmistuksessa.

2 Rauta- ja teräskuonat

Metallurgiset kuonat ovat metallien ja metalliseosten tuotantoprosessien eri vaiheissa muodostuvia sivutuotteita, kuten raudan ja teräksen valmistuksessa syntyvät rauta- ja teräskuonat (Matinde 2024). Suurin osa teräksestä valmistetaan malmipohjaisilla prosesseilla. Malmipohjainen teräksen tuotanto tapahtuu pääasiassa kahdella eri tuotantoreitillä: (1) raudan valmistus masuunissa, jonka jälkeen terästä valmistetaan konvertterissa tai (2) raudan valmistus suorapelkistyksen avulla, jota seuraa teräksen valmistus valokaariuunissa. Sekundäärinen teräksen tuotantotapa perustuu teräsromun sulattamiseen valokaariuunissa. (World of Steel Association 2021.) Prosessin eri vaiheissa syntyvät kuonat ovat tyypillisesti yli 1200 celsiusasteen lämpötilassa ja sisältävät runsaasti lämpöenergiaa.

Kuva 1 esittää raudan- ja teräksentuotantoprosessin ja sen eri vaiheista syntyvät kuonat ja kuonamäärät. Masuunissa (engl. blast furnace) raaka-aineen sisältämät rautaoksidit pelkistetään hiilipitoiseksi sulaksi raakaraudaksi. Raaka-aineen sisältämät sivukivioksidit puolestaan muodostavat yhdessä koksin tuhkan ja kuonanmuodostajien kanssa sulan kuonan. Tämän jälkeen konvertterissa (engl. basic oxygen furnace) masuunilta tulevan raakaraudan hiilipitoisuus alennetaan halutulle tasolle sulaan puhallettavan happikaasun avulla. Samalla hapettuu myös osa raakarautaan liuenneista epäpuhtauksista, jotka yhdessä kuonanmuodostajien kanssa muodostavat konvertterikuonan. Kierrätysteräspohjaisessa teräksen valmistuksessa teräsromua sulatetaan valokaariuunissa (engl. electric arc furnace). Tästä prosessivaiheesta saadaan valokaariuunikuonaa. (Ryu ym. 2024.)



Kuva 1. Keskeisimmät tuotantoreitit raudan ja teräksen valmistuksessa sekä niistä syntyvät kuonat (mod. Luo & He 2021).

Terästuotannosta arvioidaan syntyvän noin 200–400 kilogrammaa sivutuotteita tuotettua terästonnia kohden. Tästä noin 90 massaprosenttia on kiinteää kuonaa. Vuosittain rauta- ja teräskuonaa syntyy sivutuotteena yli 400 miljoona tonnia. (World Steel Association 2021.) Rauta- ja teräskuonia on mahdollista käyttää raaka-aineina ulkoisiin sovelluksiin tai kierrättää takaisin terästuotantoon (Montequin & Oliveira 2024, s. 302). Kuonien jatkokäyttö raaka-aineena muilla teollisuuden aloilla säästää luonnonvaroja ja vähentää hiilidioksidipäästöjä (World Steel Association 2021). Kuonan hyödyntäminen muihin käyttötarkoituksiin tulisi aina olla ensisijainen vaihtoehto verrattuna sen loppusijoitukseen kaatopaikalle.

Kuonan jäähdytystapa vaikuttaa siihen, minkälaisia fysikaalisia ominaisuuksia sillä on (Sadek 2014). Kuonan fysikaaliset ominaisuudet ja kemiallinen koostumus vaikuttavat suoraan sen mahdollisiin käyttökohteisiin. Masuunikuonien hyödyntämisaste on lähes 100 prosenttia ja teräskuonien noin 80 prosenttia (World Steel Association 2021). Lin ym. (2022) mukaan rauta- ja teräskuonien hyödyntämisaste on kuitenkin ollut arviolta 66 %. Ristiriitaa voi aiheuttaa mahdollisesti se, mitkä kuonat lukuihin lasketaan. Tiedossa

kuitenkin on, että etenkin Kiinassa teräskuonien hyödyntämisessä on ollut haasteita (Guo ym. 2018).

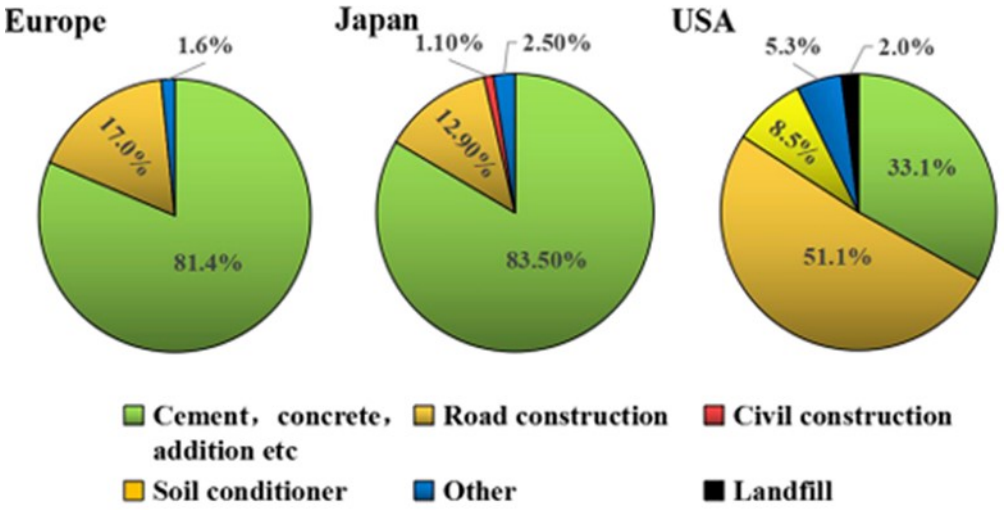
Rauta- ja teräskuonat nimetään viitaten prosessivaiheeseen, missä niitä syntyy. Tässä tutkielmassa keskitytään masuunikuonaan, konvertterikuonaan ja valokaariuunikuonaan, koska niitä syntyy rauta- ja terästeollisuudessa eniten. Tutkielmassa käytetään enimmäkseen rautakuonasta termiä masuunikuona. Teräskuonalla tarkoitetaan sekä konvertteri- että valokaariuunikuonaa, ellei niitä ole erikseen eritelty.

2.1 Masuunikuona

Masuunikuonaa muodostuu teräksen valmistusprosessin alkuvaiheessa, kun rautaraaka-ainetta, kuonanmuodostajia (esimerkiksi $CaCO_3$, SiO_2 ja MgO) ja koksia syötetään masuuniin. Kalsiumoksidi ja magnesiumoksidi lisätään uuniin mm. kuonan sulamispisteen ja viskositeetin säätämiseksi. Piidioksidi ja alumiinidioksidi ovat peräisin rautamalmin sivukivestä ja koksin tuhkasta. (Montequin & Oliveira 2024, s. 303.) Masuunissa raaka-aineen sisältämät rautaoksidit pelkistetään hiilen, hiilimonoksidin ja vedyn avulla sulaksi raudaksi, joka laskeutuessaan masuunin pesän pohjalle liuottaa itseensä hiiltä. Raaka-aineen sisältämät sivukivioksidit puolestaan muodostavat yhdessä koksin tuhkan ja kuonanmuodostajien kanssa sulan kuonan, joka raakarautaa kevyempänä kerääntyy sen pinnalle. (Ryu ym. 2024.)

Masuunikuonaa syntyy World Steel Associationin (2021) mukaan keskimäärin 275 kilogrammaa jokaista tuotettua terästonnia kohden. Se koostuu enimmäkseen kalsiumoksidista (CaO, 30–45 %), piidioksidista (SiO_2, 28–40 %), alumiinioksidista (Al_2O_3, 8–24 %) ja magnesiumoksidista (MgO, 1–18 %). Mangaanioksidia ja rautaoksidia on painoprosentillisesti vähän (MnO, <2 %, FeO, <1 %). (Yang ym. 2022.)

Raudantuotannosta syntyvä masuunikuona hyödynnetään maailmanlaajuisesti lähes kokonaan. Masuunikuonaa voidaan käyttää sen jäähdytystavan mukaan erilaisissa rakennus- ja teollisuussovelluksissa, kuten betonissa, asfaltissa, täytemateriaalina ja kevytkiviaineena sekä sementtiä korvaavana materiaalina. (World Steel Association 2021.) Kuva 2 esittää masuunikuonan käyttökohteita Euroopassa, Japanissa ja Yhdysvalloissa (Lin ym. 2022). Euroopassa ja Japanissa masuunikuonaa käytetään pääasiassa sementin ja betonin valmistukseen, kun taas Yhdysvalloissa se hyödynnetään ensisijaisesti tienrakennuksessa.



Kuva 2. Masuunikuonan käyttökohteet Euroopassa, Japanissa ja Yhdysvalloissa (Lin ym. 2022).

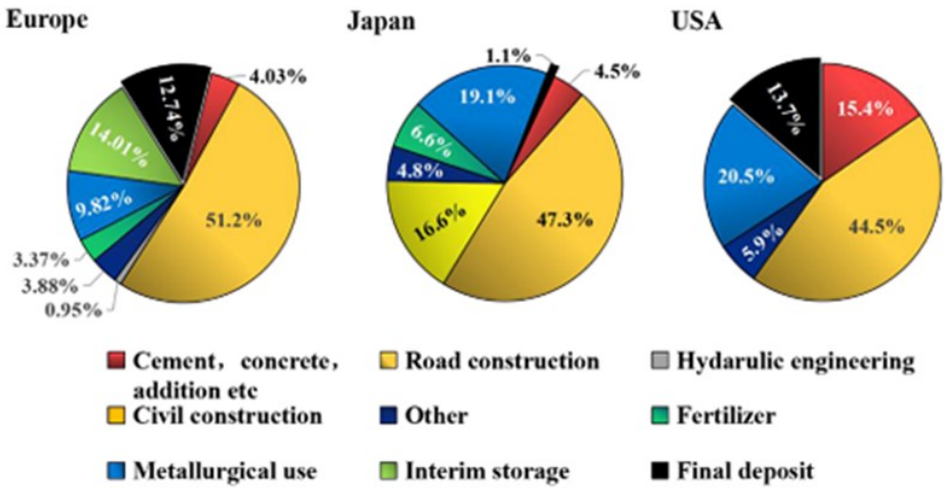
Kuonan jäähdytystapa vaikuttaa sen fysikaalisiin ominaisuuksiin. Sulan kuonan nopealla jäähdytyksellä voidaan saada rakenteeltaan rakeista ja lasimaista kuonaa, kun massa ei ehdi kiteytyä jähmettyessään. Nopeasti jäähdytetty masuunikuona on yleensä rakenteeltaan amorfista ja sillä on paremmat sementin kaltaiset ominaisuudet. Jäähdytetty masuunikuona voidaan murskata tai jauhaa haluttuun hiukkaskokoon jatkokäytön tarpeiden mukaan. (Montequin & Oliveira 2024, s. 304.) Hitaasti jäähdytetty masuunikuona on tyypillisesti rakenteeltaan ei-amorfista ja saattaa sisältää useita kiteisiä faaseja, kuten merwiniittiä, gehleniittiä ja åkermaniittia. Joskus kuonassa saattaa olla $2CaO{\cdot}SiO_2$, jolloin kuona ei sovellu rakennusmateriaaliksi mahdollisen hajoamisriskin takia. (Montequin & Oliveira 2024, s. 305.)

Yleinen tapa jäähdyttää masuunikuona nopeasti on granuloida eli rakeistaa se veden avulla, mutta myös ilmaa tai ilman ja veden yhdistelmää voidaan käyttää. Vedellä granuloitu masuunikuona voi korvata sementin valmistuksessa tyypillisesti käytetystä Portlandin klinkkeristä noin 60–70 %. Sementillä, jonka valmistukseen on käytetty granuloitua masuunikuonaa, on verrattain hyvät ominaisuudet rakennusmateriaalina. (Montequin & Oliveira 2024, s. 306.) Korvaamalla osan portlandsementistä masuunikuonalla voidaan vähentää betonin valmistuksen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä, sillä suurin osa päästöistä on peräisin portlandsementin pääraaka-aineena käytettävän kalkkikiven kalsinoinnista. Joissakin maissa jopa 80 % sementeistä sisältää granuloitua masuunikuonaa. (Montequin & Oliveira 2024, s. 306.) Vaikka masuunikuona hyödynnetään pääosin hyvin, etenkin Kiinan hyödyntämisprosentti on ollut muita alhaisempi. Kiinassa vuosina 2009–2016 noin 18 % masuunikuonasta jäi hyödyntämättä (Lin ym. 2022).

2.2 Teräskuonat

Teräskuonaa syntyy teräksen valmistus- ja raffinointiprosesseissa ja se on yksi yleisimmistä teollisuuden sivutuotteista. Sitä syntyy noin 120–170 kg per tuotettu tonni terästä teräksen koostumuksesta ja tuotantoprosessista riippuen. (World Steel Association 2021.) Teräskuonille on tyypillistä suuret kalkki-, pii- ja rautaoksidipitoisuudet (Jiang ym. 2018). Teräskuonien koostumuksen vuoksi niitä voidaan käyttää sisäisesti terästuotannossa raaka-aineena korvaamaan dolomiittia/kalkkikiveä. Lisäksi niitä voidaan hyödyntää rakennusaineena ja maataloudessa. (Montequin & Oliveira 2024, s. 313.) Teräskuonat nimetään sen mukaan, missä prosessivaiheessa niitä syntyy. Teräksen valmistuksessa syntyy pääasiassa konvertterikuonaa, valokaariuunikuonaa ja senkkakuonaa. Tässä työssä keskitytään näistä konvertteri- ja valokaariuunikuonaan. Senkkakuonan koostumus voi poiketa niistä merkittävästi sekä sitä syntyy suhteessa vähemmän (Jiang ym. 2018), jonka vuoksi sitä ei käsitellä tässä tutkielmassa.

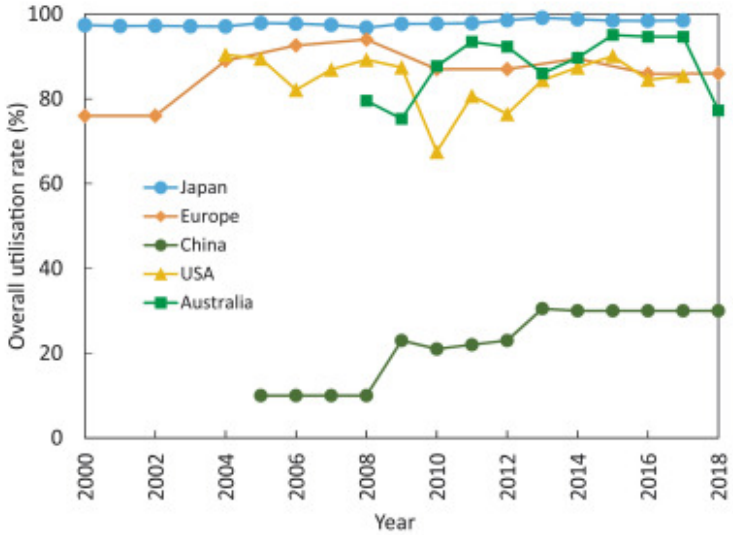
Teräskuonat jäähdytetään pääasiallisesti ilmajäähdytyksellä. Teräskuonien mahdollisesti vaihteleva koostumus hankaloittaa niiden jatkokäyttöä verrattuna masuunikuonaan. Osa talteenotetusta kuonasta käytetään sisäisesti kuonanmuodostajana. Suurin osa päätyy rakennusmateriaaliksi esimerkiksi tienrakennukseen. Yksi teräskuonien hyödyntämisen suurimmista esteistä on niiden sisältämän vapaan kalsiumoksidin määrä. (World Steel Association 2021.) Kuva 3 esittää teräskuonan käyttökohteet Euroopassa, Japanissa ja Yhdysvalloissa.



Kuva 3. Teräskuonien käyttökohteita Euroopassa, Japanissa ja Yhdysvalloissa (Lin ym. 2022).

Teräskuonien arvo on alhaisempi kuin granuloidun masuunikuonan. Teräskuonasta on vaikeampaa saada rakenteeltaan lasimaista, vaikka se

jäähdytettäisiinkin nopeasti. (Zhang ym. 2013.) Teräskuonien hyödyntämisaste on pienempi kuin masuunikuonan (World Steel Association 2021). Kuva 4 esittää teräskuonien käyttöasteet vuosilta 2000–2018 Japanissa, Yhdysvalloissa, Euroopassa, Australiassa ja Kiinassa. Kuvasta huomaa, että kehittyneissä maissa kuonasta hyödynnetään noin 80–90 %. Kiinassa on raportoitu käyttöasteen jäävän vain noin 20 prosenttiin. Kiina tuottaa noin puolet kaikesta maailman teräksestä (O'Connor ym. 2021). Suuri teräksen tuotantomäärä ja siitä syntyvän kuonan matala hyödyntämisaste huomioiden, olisi aiheellista kehittää teräskuonan jatkokäytön mahdollisuuksia.



Kuva 4. Teräskuonan käyttöasteet vuosina 2000–2018 Japanissa, Euroopassa, Kiinassa, Yhdysvalloissa ja Australiassa. Australian data sisältää rauta- ja teräskuonat. (O'Connor ym. 2021.)

2.2.1 Konvertterikuona

Konvertterikuonaa muodostuu, kun masuunista saatavaa raakarautaa muunnetaan teräkseksi LD-konvertterissa. Prosessissa käytetään happea sitomaan epäpuhtauksia, kuten hiiltä, piitä, mangaania ja fosforia. (Montequin & Oliveira 2024, s. 307.) Konvertterikuonaa tuotetaan keskimäärin 126 kg per tonni raakaterästä (World Steel Association 2021). Konvertterikuona sisältää pääosin kalsiumoksidia (CaO, 45–60 %) sekä vaihtelevia määriä piidioksidia (SiO_2, 10–15 %), alumiinioksidia (Al_2O_3, 1–5 %), rautaoksideja (Fe_2O_3, 3–9 %, FeO, 7–20 %), magnesiumoksidia (MgO, 3–13 %) sekä fosforipentoksidia (P_2O_5, 1–4 %) (Xuequan ym. 1999).

Konvertterikuona sisältää usein erilaisia mineraalifaaseja, riippuen jäähdytystavasta ja kemiallisesta koostumuksesta. Osa näistä faaseista voi olla epästabiileja ja alttiita sään vaikutuksille. Konvertterikuonan

mineraalifaasien mahdolliset reaktiot voivat aiheuttaa tilavuuden kasvua. Esimerkiksi vapaan kalsiumoksidin täydellinen hydratoituminen veden kanssa voi aiheuttaa kuonan tilavuuden kasvamista jopa 100 %. Mahdollinen laajeneminen ja tästä seuraava aineksen hajoaminen on otettava huomioon kuonan käytössä rakennusmateriaalina. (Montequin & Oliveira 2024, s. 309.) Konvertterikuonan jatkokäsittelyyn on kehitetty toimenpiteitä, joilla sen stabiiliutta voidaan parantaa. Konvertterikuonasta jopa 25 % kierrätetään sisäisesti. Muita käyttökohteita ovat teiden rakennusmateriaali, maaperän stabilointi ja parannusaine, betonituotteet, jätevedenkäsittely sekä klinkkerin ja sementin valmistus. (Montequin & Oliveira 2024, s. 313.)

2.2.2 Valokaariuunikuona

Kierrätyspohjaisessa teräksen valmistuksessa panos on yleensä rautaromua tai koostuu muista rautametallilähteistä, eli valokaariuuniprosessia käytetään enimmäkseen romumetallin kierrätykseen ja uudelleen käyttöön. Epäpuhtauksien poistoon käytetään happea. Kiinteän metallisen panoksen sulamisen aikana kalkkikiveä tai dolomiittia lisätään prosessiin, jotka yhdessä piidioksidin kanssa muodostavat kuonaa. (Montequin & Oliveira 2024, s. 308.)

Valokaariuunikuonaa (engl. electric arc furnace slag) muodostuu keskimäärin 169 kilogrammaa valmistettua terästonnia kohden (World Steel Association 2021). Kuona sisältää enimmäkseen kalsiumoksidia (CaO, 20–50 %), piidioksidia (SiO_2, 10–40 %) ja rautaoksideja (FeO_x, 5–30 %). Lisäksi se koostuu pienemmistä määristä alumiinioksidia (Al_2O_3, 5–15 %), magnesiumoksidia (MgO, 5–15 %) sekä kromioksidia (Cr_2O_3, 0,5–5 %). (Mombelli ym. 2016.) Vaihtelevia kemiallisia koostumuksia esitetään kuitenkin kirjallisuudessa (Jiang ym. 2018). Valokaariuunikuonan kemiallinen koostumus riippuu metallisten raaka-aineiden laadusta teräksen valmistuksessa (Montequin & Oliveira 2024, s. 309).

Valokaariuunikuonaa käytetään vastaavilla tavoin kuin aiemmassa alaluvussa 2.2.1 esitettyä konvertterikuonaa. Sen käyttöön liittyy kuitenkin tiettyjä rajoituksia sen alhaisemman emäksisyyden takia. Pääkäyttökohteet ovat: tien rakennusmateriaalit, vesirakentaminen, maanrakenteiden pengerrys sekä betonituotteet. (Montequin & Oliveira 2024, s. 313.) Valokaariuunikuonalla on monesti alhaisempi kalsiumoksidipitoisuus, minkä takia sen käyttö sementin kaltaisena materiaalina on vähäisempää (Ryu ym. 2024).

3 Kuonien jäähdytysmenetelmät

Rauta- ja teräskuonat ovat peräisin korkean lämpötilan prosesseista, jonka vuoksi sulat kuonamassat tulee jäähdyttää ennen niiden käyttöä. Käytetyimmät tavat ovat ilmajäähdytys, pelletointi ja granulointi (Barati & Jahanshahi 2020). Jotta kuonat soveltuisivat sementin valmistukseen, ne täytyy saada jäähdytettyä nopeasti, jolloin kuonaan jää korkeampi lasipitoisuus (Smith 2017). Lasimainen rakenne on olennaista kuonan hydraulisen reaktiivisuuden kannalta, mutta korkea lasipitoisuus ei automaattisesti takaa erittäin reaktiivista kuonaa. Täten ei voida asettaa yksiselitteistä vähimmäislasipitoisuuden rajaa kuonalle, vaikka yli 90 %:n lasipitoisuuden on yleensä havaittu soveltuvan. (Pal ym. 2003.) Hitaasti jäähtyessään kuona-aines kiteytyy. Suurin osa hitaasti jäähdytetyistä kuonista käytetään edullisina rakennusmateriaaleina tai ne joutuvat kaatopaikalle. (Barati & Jahanshahi 2020.)

3.1 Ilmajäähdytys

Perinteinen tapa jäähdyttää kuonia on ollut sen hidas jäähdytys kuonapadassa tai -kuopassa. Prosessia saatetaan tehostaa suihkuttamalla kuonaan myös vettä. (Barati & Jahanshahi 2020). Menetelmää on käytetty laajasti sekä masuunikuonalle että teräskuonille (Faucher ym. 2016).

Kuonan jäähtyminen luonnollisesti voi viedä useita päiviä (Faucher ym. 2016). Hitaasti jäähtyminen johtaa yleensä mineraalifaasien kiteytymiseen ja kuonan heikompaan rakenteeseen. Näin jäähdytetyllä kuonalla on alhaisempi taloudellinen arvo. (Barati & Jahanshahi 2020.) Ilmajäähdytteisestä kuonasta ei myöskään ole mahdollista ottaa talteen lämpöenergiaa, koska lämpö menetetään ympäristöön (Faucher ym. 2016). Ilmajäähdytteistä masuunikuonaa voidaan käyttää rakennuskiviaineksena, sillä se on kovaa ja tiivistä ainesta. Sitä voidaan käyttää myös betonissa, asfaltissa, teiden päällysteissä ja maanparannusaineena. (Montequin & Oliveira 2024, s. 306.)

3.2 Pelletointi

Pelletoinnista rauta- ja teräskuonien jäähdytysmenetelmänä löytyy vain vähän tietoa. Syynä tähän on luultavasti sen vähäinen käyttö. Menetelmässä yhdistyy sekä kuonan jähmettyminen pelleteiksi veden ja ilman avulla, että sen hajoaminen pienemmiksi partikkeleiksi pyörivässä rummussa/sylinterissä. (Wang 2016, kappale 5.3.4.) Rummun pyörimisnopeutta lisäämällä voidaan pienentää partikkelikokoa ja nopeuttaa kuonan jäähtymistä (Barati & Jahanshahi 2020). Pelletoidun kuonan rakenne on yleensä huokoista ja sitä käytetään enimmäkseen kevyenä kiviaineksena. Hienoksi jauhettuna

sillä voi olla myös sementin kaltaisia ominaisuuksia. (World Steel Association 2021.)

3.3 Granulointi

Granulointi tarkoittaa sulan kuonan hajottamista pieniksi 1–5 millimetrin kokoisiksi kiinteiksi partikkeleiksi mekaanisen iskun tai korkeapaineisen veden tai ilman avulla. Granulointimenetelmiä on erilaisia ja ne voidaan luokitella märkä- ja kuivagranulointiin. (Barati & Jahanshahi 2020).

Granulointi mahdollistaa hyvän jäähdytysnopeuden, jonka seurauksena kuona lasittuu ja sen kiinteä rakenne on tyypillisesti yli 90 % amorfinen. (Barati & Jahanshahi 2020.) Kuonan lasimainen amorfinen rakenne on keskeistä kuonan reaktiivisuuden ja kuonahiekan laadun kannalta. Lasimaisuudella on vaikutusta kuonasta valmistetun sementin ominaisuuksiin. Korkea lasipitoisuus saavutetaan yleensä kuitenkin vain, jos kuona saadaan jäähdytettyä nopeasti yli 900 astetta muutoslämpötilan alapuolelle. (Smith 2017.) Tämä luo haasteen jäähdytysmekanismeille.

Yleisin granulointimenetelmä on jäähdytys veden avulla, mutta jäähdytykseen voi käyttää myös ilmaa tai ilman ja veden yhdistelmää (Montequin & Oliveira 2024, s. 305). Yksi tapa granuloida kuumaa kuonamassaa veden avulla on johtaa se korkeapaineisen vesivirran läpi, jonka jälkeen se upotetaan vesisäiliöön 10–30 sekunnin ajaksi. Vesi jäähdyttää kuonamassan, joka hajoaa pienemmiksi kiinteiksi kappaleiksi. Granuloitu kuona kuljetetaan laskeutumissäiliöihin, joissa se kuivataan kosteuspitoisuuteen 12–15 %. (Montequin & Oliveira 2024, s. 305.)

Vedellä jäähdytys on nopeaa ja aikaansaa pozzolaanista materiaalia, joka sopii sementin valmistukseen, sillä se kovettuu veden ja liukoisen kalsiumhydroksidin avulla (Rankin 2011, s. 350; Betonitieto 2025). Prosessi kuluttaa kuitenkin runsaasti vettä ja energiaa (Rankin 2011, s. 350). Vettä tarvitaan yleensä vähintään saman verran, kuin käsiteltävää kuonaa on (Lin ym. 2022).

Erityisesti märkägranuloitu masuunikuona soveltuu yleensä hyvin sementin ja muiden rakennusmateriaalien raaka-aineeksi. Perinteisen portlandsementin valmistus tuottaa suuria määriä hiilidioksidipäästöjä, joita voidaan vähentää, jos osa valmistusmateriaaleista korvataan granuloidulla masuunikuonalla. Märkägranulointia voidaan käyttää sekä masuunikuonalle että teräskuonille, mutta käsittely eroaa hieman erilaisten ominaisuuksien vuoksi. (Lin 2022.) Teräskuonissa on monesti suurempi määrä vapaata kalsiumoksidia, joka voi olla epästabiili ja yhdistettynä veteen voi laajentua (Norval & Oberholster 2011). Tossavainen ym. (2007) mukaan

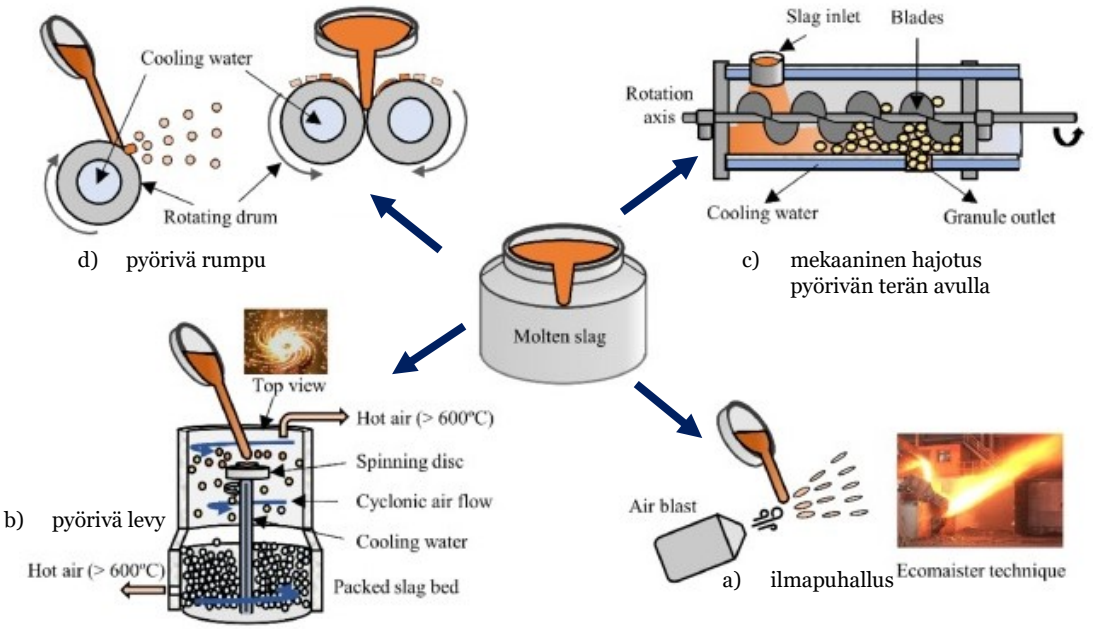
märkägranuloinnilla ei saada konvertteri- ja valokaariuunikuonasta tarpeeksi lasimaista, jotta sitä voitaisiin helposti hyödyntää sementin valmistuksessa (Tossavainen ym. 2007).

Märkägranuloinnin haittana on pidetty runsasta veden kulutusta, mutta se aiheuttaa myös jonkin verran haitallisia kaasuja, kuten H_2S ja SO_x. Myös prosessissa vapautuvan lämmön talteenotto on alhaista. (Lin ym. 2022.) Märän granuloidun kuonan kuivaaminen aiheuttaa myös lisäkustannuksia ja hiilidioksidipäästöjä (Barati & Jahanshahi 2020). Märkägranulointiin sisältyy myös turvallisuusriskejä yhdistettäessä vettä ja sulaa kuumaa kuonaa (Faucher ym. 2016).

1900-luvun lopulla kehittyvissä maissa on märkägranuloinnin rinnalle alettu tutkia mahdollisuutta suorittaa rauta- ja teräskuonien granulointi vaihtoehtoisesti. Ilman avulla tapahtuva aktiivinen jäähdytys kuivagranuloimalla vähentää vedenkulutusta sekä ympäristöön vapautuvia haitallisia kaasuja. Kuivagranuloinnin avulla voidaan parantaa myös hukkalämmön talteenottoa. (Lin ym. 2022.) Luku 4 ja sen alaluvut käsittelevät eri kuivagranulointimenetelmiä.

4 Kuivagranulointi

Kuivagranulointi terminä on esitetty jo 1970-luvulla (Barati & Jahanshahi 2020). Kuivagranuloinnissa käytetään yleensä joko korkeapaineista ilmaa, mekaanista voimaa tai pyöriviä alustoja. Ilmapuhalluksessa (vapaa suomennos, engl. air blasting) kuona hajotetaan korkeapaineisella ilmalla, jolloin kuonamassa jähmettyy rakeiksi jäähtyessään. Mekaanisessa granuloinnissa sula kuona jäähdytetään ja hajotetaan käyttämällä esimerkiksi pyörivää säiliötä, teriä tai kuulia. Keskipakoisvoimaa hyödyntävässä menetelmässä sula kuona sinkoutuu pyörivältä alustalta, jolloin se hajoaa ja jähmettyy pieniksi rakeiksi. (Faucher ym. 2016.) Kuva 5 esittää eri menetelmiä sulan kuonan kuivagranulointiin.



Kuva 5. Kuivagranulointimenetelmiä (mod. Yang ym. 2022).

Aihetta on tutkittu paljon ja jotkin menetelmät painottavat hukkalämmön talteenottoa prosessista. Painotuksen takia, lopputuotteena saatu granuloitu kuona ei ole välttämättä vastannut vaatimuksia, jotta kuonaa voisi käyttää rakennusmateriaalina. Ne ovat saattaneet sisältää suuria hiukkasia ja niiden rakenne ei ole ollut lasimaista. Betonin ja sementin valmistukseen näin granuloitu kuona olisi hyvä käsitellä vielä uudelleen eri prosessissa jauhamalla tai murskaamalla. (Lin ym. 2022.)

Kuivagranuloinnin etuina voidaan pitää, että se ei käytä suuria määriä makeaa vettä, siinä on mahdollista ottaa talteen kuonan lämpöenergiaa ja prosessin aikana ei vapaudu juuri lainkaan haitallisia kaasuja. Toimivan menetelmän tulisi täyttää nämä vaatimukset, mutta samalla tuottaa laadultaan

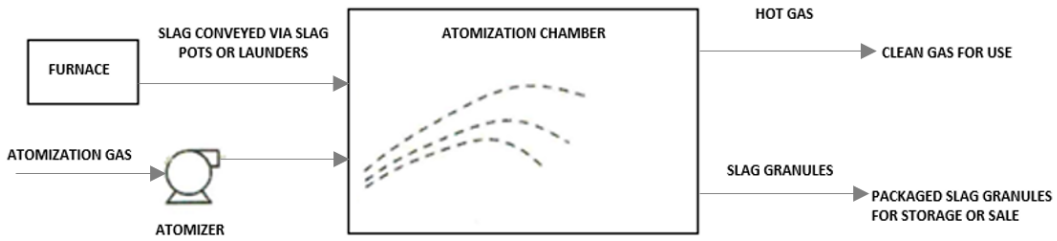
märkägranulointia vastaavaa amorfista kuonaa kohtuullisilla kustannuksilla. (Hu ym. 2025.)

Kirjallisuuden mukaan eniten tutkittuja menetelmiä ovat (1) ilmapuhallus, (2) rumpumenetelmä (vapaa suomennos, engl. rotating drums) ja (3) pyörivä kiekko/kuppi (vapaa suomennos, engl. spinning disc/cup). Neljäs tapa on myös kehitetty äskettäin, jossa lasketaan pieniä teräskuulia kuona-ainekseen, jotka absorboivat lämpöä kuonasta. (Barati & Jahanshahi 2020.) Seuraavissa alaluvuissa esitellään olemassa olevan tutkimustiedon avulla, miten edellä mainittuja menetelmiä on testattu masuuni- ja teräskuonien jäähdytykseen.

4.1 Ilmapuhallus

Barati ja Jahanshahi (2020) ovat esittäneet, että ilmapuhallusmenetelmä kuonan granulointiin on kehitetty 1970–1980 luvulla Mitsubishi Heavy Industriesin ja JFE:n (entinen Nippon Kokan KK) yhteistyönä. Prosessissa sula kuona kaadetaan kontrolloidusti kouruun, jossa kuonavirta leviää ohuemmaksi kalvoksi. Kuona hajotetaan sumuttamalla ilmaa alhaalta päin sen läpi. Kourussa olevat ylä- ja sivusuuttimet säätelevät pisaroiden leviämistä, ja ilmaan sinkoutuvat kuonahiukkaset kerätään lämmönvaihtokammioon. Menetelmässä sula kuona hajotetaan pieniksi pisaroiksi ilmasumutuksen avulla, mikä vaatii paljon paineilmaa ja energiaa. Menetelmä ei ole paras talteenottamaan prosessissa vapautuvaa lämpöä, sillä suuri paineilman käyttö aiheuttaa sen, että ilman poistumislämpötila on toivottua alhaisempi. Prosessia on testattu melko onnistuneesti teollisessa mittakaavassa sekä masuuni- että teräskuonille. (Barati & Jahanshahi 2020.)

Vaikka menetelmä on jo useita vuosikymmeniä vanha, näyttää että se on vasta viimevuosina onnistuttu kaupallistamaan. Faucher ym. (2016) mukaan Ecomaister-Hatchin ilmapuhallusmenetelmä on kaupallistettu ainakin 19 tehtaassa. Näissä tehtaissa käsitellään useita miljoonia tonneja kuonaa vuosittain. Näistä hukkalämmön talteenotto on otettu käyttöön kahdessa ei-rautametallien tehtaassa. Prosessissa saavutetaan noin 50 %:n lämmöntalteenotto. (Faucher ym. 2016.) Kuva 6 esittää Ecomaister-Hatchin ilmapuhallusmenetelmää.



Kuva 6. Yksinkertaistettu prosessikaavio Ecomaister-Hatchin ilmapuhallusmenetelmästä (mod. Faucher ym. 2016).

Seuraavissa alaluvuissa 4.1.1–4.1.3 perehdytään kirjallisuuteen, jota löytyy masuuni-, konvertteri- ja valokaariuunikuonan granuloinnista ilmapuhallusmenetelmällä.

4.1.1 Masuunikuona

Masuunikuonan granulointi ilmapuhallusmenetelmällä voi tarjota joitain etuja märkägranulointiin verrattuna. Liu ym. (2020) tutkivat masuunikuonan granulaatio- ja kiteytymismekanismeja sekä kuonan emäksisyyden vaikutusta lopputulokseen. Heidän havaintojensa mukaan ilmapuhallusmenetelmä voi sopia amorfisen kuonan aikaansaamiseksi silloin, kun kuonan emäksisyys on alhainen ja jäähdytysnopeus korkea. Emäksisempi kuona vaatii suuremman jäähdytysnopeuden amorfisten partikkelien muodostamiseksi, mutta toisaalta se on juoksevampaa ja tuottaa pienempiä hiukkasia. (Liu ym. 2020.)

Ilmapuhallusmenetelmällä jäähdytetty masuunikuona voi laadultaan olla verrattavissa märkägranuloituun kuonaan, minkä lisäksi prosessissa voidaan saavuttaa 40–50 prosentin lämmöntalteenotto. Teollisessa mittakaavassa tapahtuvaan tuotantoon tarvittava laitteisto on kuitenkin suuri ja monimutkainen. Lopputuloksena saadun granuloidun kuonan rakenne voi olla kompleksinen ja saatujen kuonapartikkelien kokojakauma laaja. Etuina voidaan kuitenkin pitää pientä hiilijalanjälkeä ja vähäistä ympäristökuormitusta. (Zoua ym. 2023.)

Menetelmää on yritetty mallintaa numeerisesti masuunikuonalle, sillä kokeellisten tutkimusten tekeminen voi olla hankalaa suurten lämpötilojen ja nopeiden prosessien takia. Numeerisissa kokeissa on huomattu, että kuonan partikkelikoko pienenee nostamalla sekä ilman että kuonan virtausnopeutta. Kuonan viskositeetin kasvaessa partikkelikoko kasvaa. (Liu ym. 2023.) Wang ym. (2021) mallinsivat teoreettisesti sulan masuunikuonan hajoamista ilmapuhalluksella. Hajoamisprosessilla on keskeinen vaikutus granuloidun

kuonan partikkelikokojakaumaan. Mallinnuksessa selvitettiin, että alle 3,0 millimetrin kokoisia pisaroita oli yli 80 % granuloidusta masuunikuonasta, ja niiden keskimääräinen halkaisija oli 1,95 millimetriä. (Wang ym. 2021.)

Yu ym. (2016) mukaan menetelmä on aikoinaan 1980-luvulla teollistettu useamman eri japanilaisen tehtaan toimesta. Näissä on pystytty käsittelemään 40 t/h kuonaa, josta on saatu talteen n. 60 % hukkalämpöä. (Yu ym. 2016.) Menetelmän haittoina voidaan pitää sitä, että ilmalla on pienempi lämmönsiirtokapasiteetti kuin vedellä, joten sitä tarvitaan paljon. Tämä johtaa suureen energiankulutukseen ja korkeisiin käyttökustannuksiin. Jäähdytysnopeus on hitaampi kuin veden avulla, mikä edellyttää suurempaa jäähdytyspinta-alaa. (Yu ym. 2016.)

Faucher ym. (2017) mukaan tutkittaessa masuunikuonaa laboratoriotason kokeessa ilmapuhallusmenetelmällä kuonan amorfisuudeksi saatiin 98 %. Puristuslujuustestit myös osoittivat, että 28 päivän jälkeen ilmapuhallettu kuona suoriutui vastaavasti kuin märkägranuloitu kuona, kun portlandsementistä korvattiin kuonalla 20 %. (Faucher ym. 2017.) Tämä voi osoittaa, että ilmapuhallettu masuunikuona voisi soveltua osittain sementin valmistukseen. Jatkotutkimuksia suuremmassa mittakaavassa kuitenkin tarvitaan.

4.1.2 Konvertterikuona

Lin ym. (2022) mukaan ilmapuhallus on teräskuonille pääasiallinen kuivagranulointitapa, mutta tarkemmin ei eritellä onko kyseessä konvertteri-, valokaariuuni- vai senkkakuonaa (Lin ym. 2022). Ilmapuhallusmenetelmä edellyttää, että sula kuona on riittävän juoksevaa. Konvertterikuonan korkea viskositeetti voi johtaa epätäydelliseen lopputulokseen ja matalaan granulointinopeuteen. (Wang ym. 2022.) Teräskuonalla on tyypillisesti alhainen juoksevuus, joten sen soveltuvuutta ilmapuhallukseen voidaan parantaa alentamalla sulamislämpötilaa ja lisäämällä juoksevuutta. Juoksevuutta voidaan parantaa esimerkiksi laskemalla kuonan emäksisyyttä, jolloin se soveltuu paremmin ilmapuhallusprosessiin. (Wang ym. 2019.) Wang ym. (2022) tutkivat asiaa sekoittamalla konvertterikuonaan masuunikuonaa, jossa on tyypillisesti enemmän piidioksidia, joka alentaa kuonan emäksisyyttä. Masuunikuonan osuuden kasvaessa kuonan juoksevuus kasvaa. Tutkimuksessa huomattiin, että masuunikuonan optimaalinen määrä modifiointiaineena on 15 %. (Wang ym. 2022.)

Schollbach ym. (2021) käyttivät ilmapuhallusmenetelmää tutkiessaan konvertterikuonan mineralisoitumista. Ilmapuhalluksella tutkimuksen olosuhteissa ei saatu konvertterikuonasta amorfista lasimaista tuotetta. Liuotustulokset kuitenkin osoittavat, että konvertterikuonalla voi olla hydraulista aktiivisuutta, vaikka se ei olekaan amorfista. Tällä tavalla granuloitua

konvertterikuonaa voisi potentiaalisesti käyttää ainakin osittain sementin korvikkeena. (Schollbach ym. 2021.)

Ahmed ym. (2023) tutkimuksessa on verrattu samasta erästä peräisin olevaa ilmagranuloitua konvertterikuonaa ja hitaasti ilmajäähdytettyä konvertterikuonaa toisiinsa. Tutkimuksessa tehtiin eri sekoituksia sementin ja joko ilmagranuloidun tai ilmajäähdytetyn konvertterikuonan kanssa erinäisissä suhteissa (5–50 %). Sementti-kuonakomposiittien reaktiivisuutta, puristuslujuutta ja työstettävyyttä testattiin. Tutkimuksessa havaittiin, että ilmagranuloitu konvertterikuona oli hydrataatioaktiivisempi ja sillä oli parempi mekaaninen suorituskyky kuin perinteisesti jäähdytetyllä kuonalla 28 päivään asti. Tutkimuksessa parhaat tulokset saatiin kuitenkin vain pienillä konvertterikuonan pitoisuuksilla. Tutkimuksessa päädyttiin lopputulokseen, että 5 % ilmagranuloidusta kuonasta voidaan käyttää sementissä sideaineen korvaajana ilman että se vaikutti heikentävästi sementin ominaisuuksiin. Tutkimuksen konvertterikuona on granuloitu Harsco Metals Holland B.V menetelmällä Tata Steel Europe Ijmuiden tehtaalla. Heidän menetelmässään kuona kaadetaan suuren tuulettimen eteen, jolloin ilmavirtaus granuloi kuonan. (Ahmed ym. 2023.)

4.1.3 Valokaariuunikuona

Tutkimuksia ilmapuhallusmenetelmän vaikutuksista valokaariuunikuonan soveltuvuuteen sementin kaltaisena materiaalina löytyy suhteellisen vähän. Monissa artikkeleissa käytetään yleiskäsitteenä teräskuonaa, jolloin ei voida varmuudella tietää, onko kyseessä konvertteri-, valokaariuuni- vai senkkakuonaa. Valokaariuunikuonaa ei pidetä kovin soveltuvana sementin raaka-aineeksi sen tyypillisesti alhaisen CaO-pitoisuuden ja heikon reaktiivisuuden vuoksi (Ryu ym. 2024).

Tenova alkoi vuonna 2018 kehittää kuivagranulointia ilmapuhallusmenetelmällä valokaariuuni- ja senkkakuonalle (Guzzon ym. 2024). Tenovan verkkosivujen mukaan menetelmällä voidaan saada jäähdytettyä valokaariuunikuonaa, jonka partikkelikoko on tasaisesti 0,5–5 millimetriä ja morfologiasta on mahdollista saada jopa 90 % amorfista (Tenova 2025).

Coppola ym. (2016) artikkelissa tutkitaan granuloidun valokaariuunikuonan käyttämistä betonin valmistuksessa, mutta granulointitapaa ei ilmaista. Tuloksissa huomattiin kuitenkin, että luonnonaineesta kannattaa korvata maksimissaan 15 % granuloidulla valokaariuunikuonalla ilman, että se vaikuttaa negatiivisesti lopputuotteeseen (Coppola ym. 2016). Tutkimuksia valokaariuunikuonan soveltuvuudesta osittain sementin korvaavana aineena on olemassa, mutta niistä ei yksiselitteisesti selviä millä tavalla jäähdytettyä käytetty kuona on ollut. Näissä tutkimuksissa valokaariuunikuona on

onnistuneesti korvannut sementistä noin 10–20 % (Bernardo ym. 2007; Tsakiridis ym. 2008; Iacobescu ym. 2013).

4.2 Pyörivä rumpu

1970-luvulla japanilaiset tutkijat esittivät idean käyttää pyörivää sylinterimäistä kammiota kuonan kuivagranulointiin (Barati & Jahanshahi 2020). Prosessissa joko yhden tai kahden pyörivän rummun mekanismiin kaadetaan kuonaa. Rumpuun kaadettu kuona hajoaa pieniksi pisaroiksi, jotka kerätään ja sekoitetaan hiekkaan, jonka jälkeen aines jäähdytetään ilmalla leijupedissä. Sen jälkeen rakeet siirretään toiseen jäähdyttimeen, jossa voidaan ottaa talteen rakeissa jäljellä oleva lämpö. Prosessilla on mahdollista saada talteen 60 % lämmöstä 500 asteisen ilman muodossa. Tällä menetelmällä tuotetun kuonan lasipitoisuus ei kuitenkaan ole ollut riittävä sementin valmistukseen, jonka vuoksi sitä ei ole kaupallistettu suurissa mittakaavoissa. (Barati & Jahanshahi 2020.) Myöskään kahden rummun tekniikalla ei ole saavutettu toivottua lämmöntalteenottoa eikä tarpeeksi korkeaa kuonan lasipitoisuutta (Yoshinaga ym. 1982). Pyöriviä rumpuja tai sylintereitä hyödyntävä granulointimenetelmä on tyypiltään mekaaninen. Mekaanisten menetelmien haasteeksi voi muodostua laitteiston kuluminen.

Kirjallisuuden perusteella menetelmän käyttöön on liittynyt niin paljon haasteita, että relevantin tutkimustiedon löytäminen sen soveltamisesta rauta- ja teräskuonille on vaikeaa. Suurin osa aiheeseen liittyvästä kirjallisuudesta on peräisin 1980–luvulta. Baratin & Jahanshahin (2020) mukaan menetelmää on tutkittu aiemmin erityisesti masuunikuonalle. Masuunikuonan granulointiin on kuitenkin muita parempia tapoja, jonka takia pyörivien rumpujen menetelmää on luultavasti tutkittu vähemmän. Yang ym. (2025) artikkelissa mainitaan pyörivien rumpujen menetelmä myös teräskuonien jäähdytysmenetelmänä. Menetelmän etuna pidetään sen nopeutta ja vähäisiä päästöjä. Haittana mainitaan se, että sillä voidaan käsitellä vain alhaisen viskositeetin kuonaa. Metodin kustannukset voivat myös nousta korkeiksi. (Yang ym. 2025.)

Yang ym. (2022) arvelevat, että pyörivään rumpuun perustuvien menetelmien jatkotutkimuksia on vähän siitä syystä, että menetelmässä lämmön talteenotto jää alhaiseksi ja granuloidun kuonan raekoko suureksi. Kuonarakeiden amorfisen osuuden ei myöskään katsota riittävän sementin valmistukseen. (Yang ym. 2022.)

4.3 Pyörivä levy/kuppi

Pyörivien levyjen tai alustojen menetelmää on käytetty 1980-luvulta alkaen menestyksekkäästi. Se vaikuttaa olevan kehittynein

kuivagranulointimenetelmä. Liittyen silloisen ajan energiakriisiin, menetelmässä on pyritty maksimoimaan lämmön talteenotto. Tässä menetelmässä sula kuona tulee astiaan kourun kautta ja johdetaan pyörivälle alustalle, kuten suurelle levylle tai kuppiin. (Barati & Jahanshahi 2020.) Alustan pyöriminen pakottaa kuonan alustan reunoille, jossa se sumutetaan ilmalla. Pyörimisnopeutta voidaan muuttaa kesken prosessin vastaamaan kuonavirtausta, jolloin prosessiin saadaan vakautta ja tasaisempi raekokojakauma. Lentävät kuonapisarat jäähtyvät nopeasti ilmassa ennen kuin ne osuvat vesijäähdytteiseen kaltevaan seinämään, jonka aikana suurin osa lämmönsiirrosta tapahtuu. (Smith 2017.) Kuumat granulit kerätään ja kuonasta otetaan lämpöä talteen kuumana ilmana tai höyrynä. Tällä tavalla granuloidulla kuonalla on mahdollista saavuttaa yli 95 %:n lasipitoisuus, joten se voi soveltua myös sementin valmistukseen. (Barati & Jahanshahi 2020.)

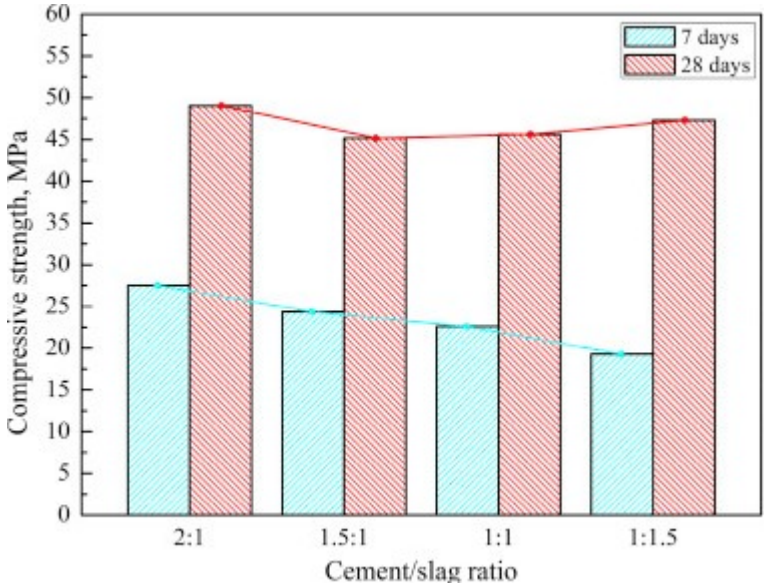
4.3.1 Masuunikuona

Liu ym. (2017) ovat tutkineet kuivagranuloidun masuunikuonan soveltuvuutta sementin korvikkeeksi. Tutkimuksessa vertailtiin pyörivän kupin avulla granuloitua kuonaa ja märkägranuloitua kuonaa valmistamalla näistä 50/50-seoksia sementtiklinkkerin kanssa. Käytetyn kuivagranuloidun kuonan lasipitoisuus oli yli 90 %. Tulosten mukaan näytteen alkulujuus oli heikko silloin, kun se sisälsi 50 % kuivagranuloitua kuonaa. 28 päivän kuluttua kuivagranuloidun kuonan ja sementin seoksen puristuslujuus oli korkeampi kuin pelkän sementin tai märkägranuloidun kuonan ja sementin seoksen. (Liu ym. 2017.) Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan olettaa, että pyörivän kupin menetelmällä granuloitu masuunikuona voi soveltua ainakin osittain korvaamaan sementtiklinkkeriä sementin valmistuksessa.

Liu ym. (2014) ovat tutkineet pyörivän kupin avulla granuloidun masuunikuonan lasipitoisuutta. Kuivagranuloidun kuonan lasipitoisuuden maksimiarvo oli tutkimuksessa 94 +- 3 %, mikä on korkeampi kuin märkägranuloidun kuonan 91 +- 3 %. Lasipitoisuuden huomattiin laskevan kuonahiukkasten nopeuden ja halkaisijan kasvaessa. Jotta saavutettaisiin mahdollisimman lasimaista granuloitua masuunikuonaa, sula kuona tulisi pitää korkeammassa alkulämpötilassa ennen granulointia. (Liu ym. 2014.) Granuloidun kuonan hiukkaskokoa säätelee sekä kupin halkaisija että sen pyörimisnopeus (Purwanto ym. 2004).

Liu ym. (2019) tutkimuksessa on tutkittu sementin ja kuonan seoksia eri suhteilla. Kuva 7 esittää tutkimuksessa mitattua puristuslujuutta eri sementin ja kuonan seossuhteilla 7 ja 28 päivän jälkeen. Korkein puristuslujuus oli seoksella, jossa sementtiä ja kuonaa oli suhteessa 2:1. Huomattavaa on kuitenkin, että suhde 1:1,5 saavutti lähes saman puristuslujuuden. Tällöin seos, joka sisältää 60 % granuloitua masuunikuonaa ja 40 % sementtiklinkkeriä voi

saavuttaa korkean puristuslujuuden ja soveltua myös teollisuuden tarpeisiin. (Liu ym. 2019.)



Kuva 7. Kuonan ja sementin sekoitussuhteiden vaikutus puristuslujuuteen 7 ja 28 päivän jälkeen (Liu ym. 2019).

Australialaisen CSIRO:n kehittämä kuivagranulaatioteknologia perustuu pyörivään levyyn, johon sula kuona kaadetaan. Mekanismi hyödyntää vastaavalla tavalla pyörimisliikettä, kuin edellä mainittu pyörivä kuppi. Levyn nopea pyörimisliike hajottaa kuonan hienoiksi pisaroiksi, jotka jäähtyvät ilmavirran avulla ja kerätään lopuksi kiinteinä granuleina. (CSIRO 2015.) CSIRO:n laitteistolla on saavutettu jopa 98 % lasimaista kuonaa, jolla on myös hyvät sementin kaltaiset ominaisuudet (Jahanshahi ym. 2011; Yu ym. 2016). Prosessista on mahdollista saada talteen myös 500–600 asteista ilmaa, joka voidaan hyödyntää esimerkiksi kuivaamiseen tai esilämmitykseen. CSIRO:n verkkosivujen mukaan vuonna 2015 menetelmä on ollut testausvaiheessa kaupallistamista varten Kiinassa. (CSIRO 2015.) Epäselväksi kuitenkin jää, mitä sen jälkeen on tapahtunut ja onko menetelmä vieläkään laajemmin käytössä.

Pyörivään alustaan tai kuppiin perustuva menetelmä vaikuttaa olevan varteenotettava vaihtoehto masuunikuonan granulointiin sementin valmistuksessa. Aiheesta tehdyn kirjallisuuden perusteella näyttää, että sekoitussuhteet, joissa kuonaa on massasta 20–60 % voidaan käyttää teollisuuden tarpeisiin. (Liu ym. 2017; Liu ym. 2019.) Menetelmän haittoina voidaan pitää sementin ja kuonan seoksen heikompaa alkulujuutta ja pidempää kuivumisaikaa verrattuna tavanomaiseen sementtiklinkkeriin. Siksi kuonan suuri korvaamissuhde sementissä ei ole perusteltua, jos tavoitteena on valmistaa korkealaatuista sementtiä. (Feng ym. 2021.)

Tutkiakseen kuivagranuloinnin ympäristövaikutuksia Wang ym. (2016) suorittivat elinkaarianalyysin (engl. life cycle assessment) menetelmästä kehitetylle prototyypille. Analyysia yksinkertaistaakseen tutkimuksessa oletettiin, että kuonapartikkelit ovat alle 2 millimetriä halkaisijaltaan, niiden lasipitoisuus vastaa märkägranuloitua kuonaa ja kuonapartikkelien lämpöhäviö on merkityksetöntä. Lämmön talteenottoon käytettiin leijupetiä. Kuivagranuloinnissa sekä energian että resurssien kulutus jää alhaisemmaksi analysoituihin märkägranulointimenetelmiin verrattuna. (Wang ym. 2016.)

4.3.2 Teräskuonat

Teräskuonien kuivagranuloinnissa tutkimukset ovat keskittyneet eniten ilmapuhallusmenetelmään, jota käsiteltiin luvuissa 4.1.2–4.1.3 (Lin ym. 2022). Pyörivää alustaa on kuitenkin ainakin mallinnettu kokeellisesti laboratoriomittakaavassa myös konvertterikuonalle. Tutkittava aine on ollut kuonan sijaan silikonifluidia, jonka viskositeetti on ollut 50 cSt. Tutkimukset ovat kuitenkin keskittyneet erityisesti levyn koon, pyörimisnopeuden ja kuonan ominaisuuksien vaikutukseen tuotteen partikkelikokoon. (Kushan ym. 2022a; Kushan ym. 2022b.) Vastaavien kokeiden suorittaminen oikealla kuonalla voisi olla seuraava askel. Vaikuttaa kuitenkin siltä, että teräskuonien potentiaalia sementin valmistusaineena ei nähdä yhtä suurena kuin masuunikuonan, mikä saattaa selittää, miksi sen kuivagranulointimenetelmiä ei ole tutkittu yhtä laajasti.

4.4 Teräskuulia hyödyntävä menetelmä

Pienten teräskuulien avulla tapahtuva jäähdytys (engl. steel sphere injection) on esitetty yhtenä mahdollisuutena kuonien granulointiin. Paul Wurthin kehittämässä prosessissa levitetyn kuonan päälle kaadetaan pieniä teräskuulia, jotka tiheämpänä aineksena painuvat kuonan pintaan. Nämä teräskuulat absorboivat kuonasta lämpöä nopeasti suuren kontaktipinnan takia. Kuonan viilentyessä se kovettuu, jonka jälkeen seos (kuona + kuulat) pudotetaan iskulevylle. Teräskuulat on mahdollista erottaa kuonasta magneetin avulla. (Barati & Jahanshahi 2020.) Kuva 8 esittää granulointimenetelmän prosessikaavion.

Kuva 8. Paul Wurthin kehittämän teräskuulia hyödyntävän kuivagranulointimenetelmän prosessikaavio (Kappes ym. 2015).

Menetelmä on kaupallistettu, ja sillä voidaan käsitellä kuonaa nopeudella 2,5 t/min. Kuona ei kuitenkaan vastaa lasipitoisuudeltaan sementin valmistukseen vaadittavia ominaisuuksia, joten sen käyttö on muissa tarkoituksissa. (Barati & Jahanshahi 2020.) Prosessia on testattu menestyksekkäästi erilaisilla rautapohjaisilla kuonilla, mutta myös ei-rautapohjaisessa metallurgiassa (Kappes ym. 2015). Lisäparannuksia kuitenkin tarvitaan lasimaisen kuonan saamiseksi (Wu ym. 2022). Faucher ym. (2017) mukaan kuonan lasipitoisuudeksi on mitattu 92 %, mutta tasoa ei ole pystytty saavuttamaan toistettavasti.

4.5 Kuivagranulointimenetelmien vertailu

Yang ym. (2022) ovat vertailleet eri kuivagranulointimenetelmiä keskenään. Taulukko 1 esittää heidän yhdistämänsä tiedot eri kuivagranulointimenetelmistä ja niiden kapasiteetistä sekä lopputuotteen käyttökohteesta.

Taulukko 1. Kuivagranulointimenetelmien vertailu (mod. Yang ym. 2022).

	Developer	**Energy from**	**Efficiency**	**Products**	**Capacity**
Rotating drum	Sumitomo	Hot air	50-60 %	Aggregates	50 t/h
	NKK	Steam, hot air	40 %	Aggregates	-
	JFE	Hot air	34 %	Aggregates	60 t/h
Mechanical stirring	Kawasaki	Steam, hot air	59 %	Aggregates	-
	Sumitomo	Hot water	50 %	Aggregates	30 t/h
Air blasting	NKK and Mitsubishi	Steam, hot air	40-50 %	Aggregates	60 t/h
	Mitsubishi	Steam, hot air	81 % (hot air)	Aggregates (BOF slags)	80 t/h
	Ecomaister	Hot air	-	Aggregates (steel slags)	-
Spinning disk	Sumitomo	Hot air	50-60 %	Aggregates	50 t/h
	CSIRO	Steam, hot air	80 %	Cement	18-30 t/h
Spinnig cup	British Steel	Hot air	60 %	Cement	40 t/h
	Primetals	Hot air	70 %	Cement	30-40 t/h

Taulukosta selviää, että sementin valmistukseen tällä hetkellä soveltuvia menetelmiä ovat pyörivän levyn ja kupin menetelmät. Näissä on todettu myös suhteellisen hyvä lämmön talteenotto joko kuuman ilman tai höyryn muodossa. Menetelmissä on granuloitu masuunikuonaa. Teräskuonia on granuloitu lähinnä ilmapuhallusmenetelmällä. (Yang ym. 2022.) Vertailussa ei ole mukana alaluvussa 4.4 mainittua teräskuulien menetelmää.

5 Yhteenveto

Tässä kandidaatintyössä tarkasteltiin kuivagranuloitujen rauta- ja teräskuonien soveltuvuutta lisäaineena sementin valmistukseen. Työssä koottiin yhteen kirjallisuudessa esitettyä tutkimustietoa eri kuivagranulointimenetelmistä sekä niiden soveltuvuudesta masuuni-, konvertteri- ja valokaariuunikuonan granulointiin. Tavoitteena oli arvioida, millaisia mahdollisuuksia kuivagranuloinnilla on kuonien jäähdytysmenetelmänä sementin valmistuksessa ja selvittää voiko se muodostaa vaihtoehdon perinteiselle märkägranuloinnille.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella havaittiin, että masuunikuonaan jäähdyttämiseen käyttökelpoisin kuivagranulointimenetelmä on tällä hetkellä pyörivän levyn tai kupin käyttö. Menetelmällä on ollut mahdollista saavuttaa kuonaa, jonka lasipitoisuus on ollut 90–98 % (Liu ym. 2014; Yu ym. 2016; Liu ym. 2017). Granuloinnissa on myös saavutettu suhteellisen korkea lämmöntalteenotto (60–80 %). Menetelmällä granuloitua kuonaa on hyödynnetty sementin valmistuksessa. (Yang ym. 2022.) Näyttää siltä, että 20–60 % kuonan ja sementin sekoitussuhteet voisivat soveltua teollisuuden tarpeisiin (Liu ym. 2017; Liu ym. 2019). Sementin ja kuonan seoksen alkulujuus on heikompi ja kuivumisaika pidempi verrattuna tavanomaiseen sementtiklinkkeriin. Tämän vuoksi kuonan suuri korvaamissuhde sementissä ei ole perusteltua, jos tavoitteena on valmistaa korkealaatuista sementtiä. (Feng ym. 2021.) Ilmapuhallusmenetelmä voi myös soveltua masuunikuonan granulointiin sementin valmistuksessa, mutta jatkotutkimuksia tarvitaan (Faucher ym. 2017).

Teräskuonien granulointiin potentiaalisin ja eniten tutkittu menetelmä vaikuttaa olevan ilmapuhallus. Tenovan menetelmä hyödyntää ilmapuhallusta valokaariuunikuonan granulointiin, ja heidän prosessissaan granuloidulle kuonalle on saavutettu jopa 90 %:n lasipitoisuus (Tenova 2025). Teräskuonien kuivagranuloinnissa haasteita saattaa aiheuttaa kuonien alhainen juoksevuus. Ilman alhainen lämmönsiirtokerroin voi johtaa suurempien laitteiden tarpeeseen ja epätaloudelliseen lämmöntalteenottoprosessiin. (Barati & Jahanshahi 2020.) Varmuutta kuivagranuloitujen teräskuonien soveltuvuudesta sementin raaka-aineeksi ei tässä tutkielmassa voitu todeta. Useimmissa tutkimuksissa arvioitiin, että vain pieni osa sementtiklinkkeristä voitaisiin korvata konvertteri- tai valokaariuunikuonalla ilman että se vaikuttaa heikentävästi sementin lujuuteen (Bernardo ym. 2007; Tsakiridis ym. 2008; Iacobescu ym. 2013; Ahmed ym. 2023). Teräskuonien sementinkaltaiset ominaisuudet ovat niiden koostumuksen vuoksi heikommat kuin masuunikuonan (Yang ym. 2022).

Verrattaessa kuiva- ja märkägranulointia toisiinsa, voidaan todeta, että kuivagranuloinnilla on mahdollista välttää monet märkägranuloinnin haitat.

Kun prosessiin ei käytetä vettä, voidaan välttää veden ja kuuman kuonan yhdistämisestä johtuvat mahdolliset vaaratilanteet. Veden puuttumisen vuoksi lopputuotetta ei tarvitse erikseen myöskään kuivata. Jo tämä vähentää CO_2-päästöjä noin 30 kg/t verrattaessa veden avulla granuloituun kuonaan. (Fleischanderl ym. 2019.) Kuivagranuloinnin haittapuolina voidaan pitää mahdollisesti kalliita ja monimutkaisia laitteita. Laitteiden kuluminen pitkäaikaisessa käytössä voi myös aiheuttaa haasteita. Lin ym. (2022) esittävät, että ainakaan tällä hetkellä kumpikaan tapa yksinään, kuiva- tai märkägranulointi, eivät mahdollista saman aikaisesti korkeaa hyötysuhdetta, laatua ja suurta granulointikapasiteettia. Mahdollisuutta yhdistää menetelmät on vaihtoehtoisesti pohdittu. (Lin ym. 2022.)

Lähteet

Ahmed, M.J., Santos, W. & Brouwers, H.J.H. 2023. Air granulated basic oxygen furnace (BOF) slag application as a binder: Effect on strength, volumetric stability, hydration study, and environmental risk. Construction and Building Materials. Vol. 367. 130342. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130342

Barati, M., Jahanshahi, S. 2020. Granulation and heat recovery from metallurgical slags. Journal of Sustainable Metallurgy. Vol. 6. S. 191–206. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/s40831-019-00256-4

Bernardo, G., Marroccoli, M., Nobili, M., Telesca, A. & Valenti, G.L. 2007. The use of oil well-derived drilling waste and electric arc furnace slag as alternative raw materials in clinker production. Resources, Conservation and Recycling. Vol. 52:1. S. 95–102. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.02.004

Betonitieto. 2025. Pozzolaani. [viitattu 14.11.2025]. Saatavissa: https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/pozzolaani.html

Conejo, A. N., Birat, J-P., & Dutta, A. 2020. A review of the current environmental challenges of the steel industry and its value chain. Journal of Environmental Management. Vol. 259. 109782. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109782

Coppola, L., Buoso, A., Coffetti, D., Kara, P. & Lorenzi, S. 2016. Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete. Construction and Building Materials. Vol. 123. S. 115–119. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.142

CSIRO. 2015. Forging a future in green steelmaking. [viitattu 21.11.2025]. Saatavissa: https://www.csiro.au/en/news/all/news/2015/march/dry-slag-granulation

Faucher, S., Mostaghel, S., So, L., Oh, S. 2017. Recent developments in dry slg granulation: A path to improving safety and sustainability of the metallurgical sector. 71st Congresso Anual da ABM. S. 202–213. Saatavissa: https://doi.org/10.5151/1516-392X-27552

Faucher, S., So, L.C., Mostaghel, S., Lee, S.K. & Oh, S-Y. 2016. Recent developments in commercial scale dry slag granulation and energy recovery.

Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference Volume 1, USA. Association for Iron & Steel Technology. S. 137–142.

Feng, Y-H., Zhang, Z., Gao, J., Feng, G-P., Qiu, L., Feng, D-L., Zhang, X-X. & Zhu, X. 2021. Research status of centrifugal granulation, physical heat recovery and resource utilization of blast furnace slags. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Vol. 157. 105220. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105220

Fleischanderl, A., Fenzl, T. & Neuhold, R. 2019. Dry slag granulation – the future way to granulate blast furnace slag. Iron and Steel Technology. Vol. 16:5. S. 80–85.

Guo, J., Bao, Y. & Wang, M. 2018. Steel slag in China: treatment, recycling, and management. Waste Management. Vol. 78. S. 318–330. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.045

Guzzon, M., Messuti, M., Bissoli, M., Chiarullo, E.J. & Malfa, E. 2024. Tenova's dry slag granulation process: The experience on EAF and LF slag in steel industry. Southern African Pyrometallurgy 24, Johannesburg. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. S. 81–91. Saatavissa: https://www.saimm.co.za/Conferences/files/pyrometallurgy-2024/08_P18-Guzzon.pdf

Hu, H., Zhou, T., Li, Y., Xia, B., Zhang, M., Hu, N. & Yang, H. 2025. Review of research progress on dry granulation technology for blast furnace slag. Materials. Vol. 18:12. 2802. Saatavissa: https://doi.org/10.3390/ma18122802

Iacobescu, R.I., Pontikes, Y., Koumpouri, D. & Angelopoulos, G.N. 2013. Synthesis, characterization and properties of calcium ferroaluminate belite cements produced with electric arc furnace steel slag as raw material. Cement and Concrete Composites. Vol. 44. S. 1–8. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.08.002

Jahanshahi, S., Xie, D., Pan, Y., Ridgeway, P. & Mathieson, J. 2011. Dry slag granulation with integrated heat recovery. 1st International Conference on Energy Efficiency and CO_2 Reduction in the Steel Industry (EECR Steel 2011). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/264383880_Dry_slag_granulation_with_integrated_heat_recovery

Jiang, Y. Ling, T-C., Shi, C. & Pan, S-Y. 2018. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review. Resources, Conservation and Recycling. Vol. 136. S. 187–197. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.023

Kappes, H., Gantenberg, M., Kinzel, K-P. & Hoffmann, M. 2015. Intelligent solutions for ferroalloy production of Paul Wurth. 14th International Ferroalloys Congress: Energy Efficiency and Environmental Friendliness are the Future of the Global Ferroalloy Industry, INFACON 2015. Vol. 2. S. 238–246. Saatavissa: https://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconXIV/238-Kappes.pdf

Kushan, DS., Chakraborty, G., Maiti, B., Dash, S. & Samantaray, A. 2022a. On hydrodynamics of dry slag granulation of LD/BOF slag: analytical modeling. 16th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics & the Editorial Board of Applied Thermal Engineering. Saatavissa:https://www.researchgate.net/publication/362605035_ON_HYDRODYNAMICS_OF_DRY_SLAG_GRANULATION_OF_LDBOF_SLAG_ANALYTICAL_MODELING

Kushan, DS., Chakraborty, G., Maiti, B., Dash, S., Samantaray, A. & Singha, S. 2022b. On hydrodynamics of dry slag granulation of LD/BOF slag: developments for new liquid. 16th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics & the Editorial Board of Applied Thermal Engineering. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/362605127_ON_HYDRODYNAMICS_OF_DRY_SLAG_GRANULATION_OF_LDBOF_SLAG_DEVELOPMENTS_FOR_NEW_LIQUID

Lin, W., Wang, H., Liu, D., Xing, H., Liu, C., Zhang, Y. & Li, S. 2022. Research progress on granulation process of iron and steel slag. Metallurgical Research & Technology. Vol. 119:1. 120. Saatavissa: https://doi.org/10.1051/metal/2021100

Liu, C., Kang, Y., Zhang, Y. & Xing, H. 2020. Granulation effect analysis of gas quenching blast furnace slag with different basicities. Coatings. Vol. 10:4. 372. Saatavissa: https://doi.org/10.3390/coatings10040372

Liu, J., Yu, Q., Duan, W. & Qin, Q. 2014. Experimental investigation of glass content of blast furnace slag by dry granulation. Environmental Progress & Sustainable Energy. Vol. 34:2. S. 485–491. Saatavissa: https://doi-org.libproxy.aalto.fi/10.1002/ep.12024

Liu, J., Yu, Q., Zuo, Z., Yang, F., Duan, W. & Qin, Q. 2017. Blast furnace slag obtained from dry granulation method as a component in slag cement. Construction and Building Materials. Vol. 131. S. 381–387. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.040

Liu, J., Yu, Q., Zuo, Z., Yang, F., Han, Z. & Qin, Q. 2019. Reactivity and performance of dry granulation blast furnace slag cement. Cement and Concrete Composites. Vol. 95. S. 19–24. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.10.008

Liu, X., When, Z., Du, Y., Zhang, S., Su, F., Xiao, Y. & Lou, G. 2023. Numerical simulation of the slag granulation process in gas quenching under multi-influencing factors. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering. Vol. 47. S. 1733–1745. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/s40997-023-00640-2

Luo, Y. & He, D. 2021. Research status and future challenge for CO2 sequestration by mineral carbonation strategy using iron and steel slag. Environmental Science and Pollution Research. Vol. 28. S. 49383–49409. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/s11356-021-15254-x

Matinde, E. 2024. Presidential address: Metallurgical slags: a drive to circularity and search for new research agenda. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 124:9. S. 491–506. Saatavissa: http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2024/2024

Mombelli, D., Mapelli, C., Barella, S., Di Decca, C., Le Saout, G. & Garcia-Diaz, E. 2016. The effect of chemical composition on the leaching behaviour of electric arc furnace (EAF) carbon steel slag during a standard leaching test. Journal of Environmental Chemical Engineering. Vol. 4:1. S. 1050–1060. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.09.018

Montequin, M. & Oliveira, L. 2024. Chapter 1.7.2 - Production and management of steel coproducts. Kirjassa: Treatise on Process Metallurgy. 2. painos. Seetharaman, S., McLean, A., Guthrie, R., Seetharaman, S. & Sohn, H. Y. Elsevier. 297–339 s. ISBN 9780323854801.

Norval, D. & Oberholster R.E. 2011. Further processing and granulation of slags with entrained metal and high metal compound content, with specific reference to present manganese slag dumps as well as additions due to daily production. Southern African Pyrometallurgy 11, Johannesburg. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. S. 129–143. Saatavissa: https://pyro.co.za/Pyro2011/Papers/129-Norval.pdf

O'Connor, J., Nguyen, T., Honeyands, T., Monaghan, B., O'Dea, D., Rinklebe, J., Vinu, A., Hoang, S., Singh, Q., Kirkham, M.B. & Bolan, N. 2021. Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review. Journal of Hazardous Materials. Vol. 419. 126478. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126478

Pal, S.C., Mukherjee, A. & Pathak, S.R. 2003. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 33:9. S. 1481–1486. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00062-0

Purwanto, H., Mizuochi, T., Tobo, H., Takagi, M. & Akiyama, T. 2004. Characteristics of Glass Beads from Molten Slag Produced by Rotary Cup Atomizer. Materials Transactions. Vol. 45:12. S. 3286–3290. Saatavissa: https://doi.org/10.2320/matertrans.45.3286

Rankin, W.J. 2011. Minerals, metals and sustainability – meeting future needs. CSIRO. 350 s. ISBN 9780643097261.

Ryu, G., Kim, H. J., Yu, H. J. & Pyo, S. 2024. Utilization of steelmaking slag in cement clinker production: A review. Journal of CO2 Utilization. Vol. 84. 102842. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102842

Sadek, D. 2014. Effect of cooling technique of blast furnace slag on the thermal behavior of solid cement bricks. Journal of Cleaner Production. Vol. 79. S. 134–141. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.033

Schollbach, K., Ahmed, M. & van der Laan, S. 2021. The mineralogy of air granulated converter slag. International Journal of Ceramic Engineering & Science. Vol. 3:1. S. 21–56. Saatavissa: https://doi.org/10.1002/ces2.10074

Smith, M. 2017. Blast furnace ironmaking – A view on future developments. Procedia Engineering. Vol. 174. S. 19–28. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.133

Tsakiridis, P.E., Papadimitriou, G.D., Tsivilis, S. & Koroneos, C. 2008. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. Journal of Hazardous Materials. Vol. 152:2. S. 805–811. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.093

Tenova. 2025. Slag Dry Granulation. [viitattu 28.10.2024]. Saatavissa: https://tenova.com/technologies/slag-dry-granulation

Tossavainen, M., Engstrom, F., Yang, Q., Menad, N., Lidstrom Larsson, M. & Bjorkman, B. 2007. Characteristics of steel slag under different cooling conditions. Waste Management. Vol. 27:10. S. 1335–1344. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.08.002

Wang, H., Liu, C., Xing, Hw., Wu, Jh., Lin, Wl., Li, S., Ding, Gh. & Zhang, Yz. 2022. High-temperature modification and air-quenching granulation of steel slag. Journal of Iron and Steel Research International. Vol. 29. S. 783–792. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/s42243-021-00641-y

Wang, H., Wu, JJ., Zhu, X., Liao, Q. & Zhao, L. 2016. Energy–environment–economy evaluations of commercial scale systems for blast furnace slag treatment: dry slag granulation vs. water quenching. Applied Energy. Vol. 171. S. 314–324. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.079

Wang, H., Zhang, W., Wang, C., Tian, Tl., Xing, Hw. & Zhang, Yz. 2019. Research on making micro-beads by gas quenching from re-melted modified BOF steelmaking slag. Ironmaking & Steelmaking. Vol. 47:4. S. 432–436. Saatavissa: https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1538182

Wang, LI., Zhang, Yz. & Long, Y. 2021. Numerical investigation of breakup process of molten blast furnace slag through air quenching dry granulation technique. Journal of Iron and Steel Research International. Vol. 28. S. 10–18. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/s42243-020-00483-0

Wang, G. 2016. The utilization of slag in civil infrastructure construction. Elsevier. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/C2014-0-03995-0

World Steel Association. 2021. Steel industry co-products – Fact sheet. [viitattu 13.11.2025]. Saatavissa: https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Steel-industry-co-products.pdf

World Steel Association. 2024. Sustainability Indicators 2024 report: Sustainability performance of the steel industry 2003–2023. [viitattu 13.11.2025]. Saatavissa: https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainability-Indicators-report-2024.pdf

Wu, J., Tan, Y., Li, P., Wang, H., Zhu, X. & Liao, Q. 2022. Centrifugal-granulation-assisted thermal energy recovery towards low-carbon blast furnace slag treatment: state of the art and future challenges. Applied Energy. Vol. 325. 119835. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119835

Xuequan, W., Hong, Z., Xinkai, H. & Husen, L. 1999. Study on steel slag and fly ash composite Portland cement. Cement and Concrete Research. Vol. 29:7. S. 1103–1106. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00244-0

Yang, J., Firsbach, F. & Sohn, I. 2022. Pyrometallurgical processing of ferrous slag “co-product” zero waste full utilization: a critical review. Resources,

Conservation and Recycling. Vol. 178. 106021. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106021

Yang, J., Ma, R., Dong, B., Ma, H., Wang, Y., Gao, M., Sun, Y. & Jin, Y. 2025. Research progress and hotspots of steel slag application in road construction: a bibliometric perspective. Infrastructures. Vol. 10:3. 54. Saatavissa: https://doi.org/10.3390/infrastructures10030054

Yoshinaga, M., Fujii, K., Shigematsu, T. & Nakata, T. 1982 Dry granulation and solidification of molten blast furnace slag. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. Vol. 22:11. S. 823–829. Saatavissa: https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.22.823

Yu, P., Shuzhong, W., Li, Y. & Xu, Q. 2016. A review of granulation process for blast furnace slag. MATEC Web of Conferences. Vol. 68. 06007. Saatavissa: https://doi.org/10.1051/matecconf/20166806007

Zhang, H., Wang, H., Zhu, X., Qiu, Y-J., Li, K., Chen, R. & Liao, Q. 2013. A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry. Applied Energy. Vol. 112. S. 956–966. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.019

Zoua, J., Liub, Z. & Guo, Q. 2023. Comprehensive utilisation of blast furnace slag. Canadian Metallurgical Quarterly. Vol. 63:3. S. 927–934. Saatavissa: https://doi.org/10.1080/00084433.2023.2235147