

Sauli Salonen

# Valimoteollisuuden sähköuunit ja valimo- hiekan kiertotalous

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK)

Energiatekniikan koulutus

2021



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Sauli Salonen
Työn nimi	Valimoteollisuuden sähköuunit ja valimohiekan kiertotalous
Toimeksiantaja	Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun bio- ja kiertotalouden tutkimuskeskus BioSammon haastavien materiaalien tutkimus- ja kierrätyksen edistämisen BIOKE-hanke.
Vuosi	2021
Sivut	41 sivua
Työn ohjaaja(t)	Hannu Sarvelainen, Teemu Karttaavi

## TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli luoda keskitetty lähde kahden valimoteollisuudessa esiintyvän uunityypin energiataseista sulatustyön aikana. Kyseessä olivat kaksi yleistä sähköuunia, valokaari- ja induktiuuni. Ennen energiataseiden muodostusta on teoriaosuus valokaari- ja induktiuunin eri malleista, rakenteesta ja toimintaperiaatteesta. Työssä käsitellään myös valumuoteissa käytettävää hiekkaa ja sen mahdollisia käyttökohteita valimoteollisuuden ulkopuolella. Työn toimeksiantaja oli Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun bio- ja kiertotalouden tutkimuskeskus BioSammon haastavien materiaalien tutkimus- ja kierrätyksen edistämisen BIOKE-hanke.

Teoriaosuuden jälkeen esitetään valokaari- ja induktiuunissa käytettyjä tapoja hyötysuhteen ylläpitämiseen ja tuodaan esiin siihen vaikuttavia tekijöitä. Molemmista uunityypeistä havainnollistetaan sulatusprosessin energiatase ja valokaariuunin tapauksessa muodostetaan tarkka matemaattinen tasemalli.

Opinnäytetyön toisessa osassa hahmoteltiin valimoiden harjoittamaa muottihiekan kierrätystä yritysten sisällä, kuten myös hiekan kiertotaloudellisia mahdollisuuksia valimoympäristön ulkopuolella. Opinnäytetyössä esitetään yleisesti tavatun hiekkatyyppin koostumus ja ominaisuudet, sekä työtapoja vähentää hiekasta löytyviä haitallisia aineosia, jotta kiertotaloudellinen uudelleenkäyttö valimon ulkopuolella olisi mahdollista. Käydään läpi asfaltinvalmistukseen liittyviä työvaiheita, kun käytetään käytettyä valimohiekkaa valmistusprosessin lisäaineena. Valmistetun asfaltin mekaanisia ominaisuuksia verrataan perinteisin tavoin valmistettuun asfalttiin.

Kirjallisuuskatsauksen kautta saatiin selville, että valokaariuuneissa hyötysuhde riippuu enemmän hapettumistuotteista, koksiihiilen määrästä ja sulatettavan materiaalin koostumuksesta, eli kemiallisen energian määrästä. Induktiouneissa hyötysuhde on ennalta-arvattavampi pienempien hapettumistuotteiden ansiosta ja voidaan luotettavasti arvioida käytetyn kokonaissähköenergian ja sulan metallin energiasisällön avulla. Käytetylle valimohiekalle löytyi käyttökohteita asfaltin valmistuksen parissa. Käytetylle hiekalle löytyy myös muita vähemmän harjoitettuja toimia, kuten lisäaineena toimiminen lasin ja tiilien valmistuksessa sekä maantäytön projekteissa. Huono tiedon saatavuus ympäristövaatimuksista ja hiekan puhdistusmenetelmistä jarruttavat kierrätysmahdollisuuksia.

**Asiasanat:** energiatase, hyötysuhde, kiertotalous, valimoteollisuus

Degree	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Sauli Salonen
Thesis title	Electric furnaces and sand recycling in the foundry industry
Commissioned by	BIOKE-project, research and development of challenging materials of the BioSampo research center of bio and circular economy, University of Applied Sciences of South-Eastern Finland
Time	November 2021
Pages	41 pages
Supervisor	Hannu Sarvelainen, Teemu Karttaavi

## ABSTRACT

The goal of this thesis was to create a centralized, easy-to-access reference point for energy balance in two common furnaces in the foundry industry. The examined furnace types were electric arc furnaces (EAF) and induction furnaces (IF). Before establishing the energy balances there is a theoretical section explaining the different EAF- and IF-furnace models, as well as their structure and working principle. This work also examines the sand used in moulds and their potential repurposing outside of a foundry. This thesis was commissioned by BioSampo as a part of the BIOKE-project, the goal of which is to research and develop the recycling of challenging materials.

After the initial theory section, the focus is shifted towards the means of maintaining the efficiency of an EAF and IF-furnace and which phenomena affect their efficiency. Energy balances are established for the smelting process for both furnace types. For an electric arc furnace, a precise mathematical energy balance equation is formed.

The goal of the second part of the thesis was to outline the methods foundries use to recycle their mould sand inside the facility and the possibilities of reusing spent foundry sand in other projects, reinforcing circular economy. Chemical composition of commonly used foundry sand and mechanical properties are presented alongside work methods used to cleanse the used foundry sand for it to be repurposed outside of a foundry. Ways of producing asphalt with used foundry sand as an aggregate are examined. Mechanical properties are compared between traditional asphalt and asphalt made with foundry sand.

It was established through a literature review that the efficiency of an EAF is greatly dependent on the amount of chemical energy, namely oxidation products, chemical composition of the loaded charge, and the amount of coke charged. In induction furnaces, the efficiency can be determined more reliably due to smaller oxidation products and can be established accurately enough with overall electricity consumption and the enthalpy of molten metal. Uses for used foundry sand lie in the production of asphalt for the most part. It has also been utilized as an aggregate for glass and brick production, as well as in landfill projects. The recycling of used foundry sand is still not as efficient as it could be, because the information concerning environmental requirements and ways of refining used foundry sand are difficult to come by.

**Keywords:** energy balance, efficiency, circular economy, foundry industry

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	VALIMOTEOLLISUUS .....	7
3	BIOKE-HANKE .....	8
4	UUNITYYPIT .....	9
4.1	Induktiouunit .....	9
4.2	Valokaariuunit .....	12
4.3	Induktio- ja valokaariuunin pohjimmaiset eroavaisuudet.....	14
4.4	Muut uunityypit.....	15
5	ENERGIATEHOKKUUS .....	16
5.1	Induktiouunin energiatehokkuus ja energiatase.....	16
5.2	Valokaariuunin energiatehokkuus ja energiataseet .....	20
5.3	Valokaariuunin hyötysuhde.....	24
5.4	Satunnaisia valimon energiatehokkuusseikkoja.....	26
6	KIERTOTALOUS .....	27
6.1	Hiekkamuotit .....	27
6.2	Hiekan ominaisuuksien määrittäminen .....	31
6.3	Asfaltin valmistus .....	32
6.4	Muu kiertotalous .....	35
7	YHTEENVETO .....	35
	LÄHTEET.....	38
	LUETTELO KUVISTA JA TAULUKOISTA	

**Lyhenteitä ja avainsanoja**

Bentoniitti	Valumuottien valmistukseen käytetty sideaine
BTEX-yhdisteet	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet. <b>B</b> entseeni, <b>t</b> olueeni, <b>e</b> tyylibentseeni ja <b>ks</b> yleeni.
Curie-piste	Lämpötila, jossa materiaali menettää aiemmat magneettiset ominaisuutensa
DOC	Liennut orgaaninen hiili ( <b>d</b> issolved <b>o</b> rganic <b>c</b> arbon)
Freeboard	Sulametallin yläpuolelle jäävä tyhjä tila, kun valokaariuunin uunipesä ei ole täynnä sulametallia
Furaani	Aromaattisten yhdisteiden alalaji, joilla on viisirenkainen hiilirakenne
Keerna	Puu- tai hiekkasydän, jota käytetään hiekkamuotin valmistuksessa luomaan oikea muoto
Lamelligrafiitti	Harmaa valurauta, jossa on grafiitti mikrorakenne
PAH-yhdisteet	epätäydellisestä palamisesta syntyviä karsinogeenisiä hiilivety-yhdisteitä ( <b>P</b> olycyclic <b>a</b> romatic <b>h</b> ydrocarbon)
PCB-yhdisteet	Orgaanisia yhdisteitä, jotka muodostuvat klooraus tuotteista ( <b>P</b> olychlorinated <b>b</b> iphenyl)
Vihreä hiekka	Silica-hiekan, bentoniitin, hiilen ja veden seos

## 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käsitellään kahta valimoteollisuudessa yleisesti esiintyvää uunityyppiä, induktio- ja valokaariuunia. Valimoteollisuudessa valetaan monia erilaisia kappaleita ja niiden valmistamiseen käytetään monenlaisia erityömenetelmiä, joiden mukaan myös käytettävä uuni määräytyy. Mikäli pyritään valmistamaan suuret erät tiettyä kappaletta, tarvitaan usein suurikokoinen valokaariuuni, joka pystyy vastaamaan metallin korkeisiin laatuvaatimuksiin ja taloudellisuuden ylläpitämiseen. Pienempiin eriin voidaan valita induktiouuni. Ajoittain valinta saattaa olla epäintuitiivinen, kun valitaan monen eri muuttujan perusteella sopivin uunityyppi. Uunien käyttöön liittyy reilusti kokemuksen kautta opittuja käytäntöjä ja ajotapoja, joita noudattamalla saavutetaan turvallis ja parhain mahdollinen lopputulos.

Maailmanlaajuisen huomion ohjautuessa kestävään toimintaan ja kiertotalouteen on tässäkin opinnäytetyössä tarkasteltu asiaa valimohiekan kierrätyksen kannalta. Hiekkaa käytetään muottien rakentamiseen valukappaleita varten ja hiekka säilyttää hyödylliset ominaisuutensa useamman kerran oikein kierrätettynä. Kun hiekkaa ei voida enää käyttää muottien rakentamiseen, on mahdollista siirtää hiekka eteenpäin seuraavalle taholle sen sijaan, että hiekka kuljetetaan kaatopaikalle. Uuden hiekan haltijan tulee perehtyä tarkasti ympäristövaatimuksiin ja hiekan haitallisiin ominaisuuksiin sekä työmenetelmiin, joilla hiekkaa voidaan muuttaa ympäristöystävällisempään muotoon, mikäli sille tarvetta on.

Opinnäytetyön tavoitteena on tuoda esille valokaari- ja induktiouunin toiminta ja energiataseet yksinkertaisella pohjatasolla. Työssä valaistaan myös valimoiden mahdollisuuksia vähentää jätteen tuottoa suositeltavien työskentelytapojen ja kiertotalouden avulla. Työssä esiintyvät asiat toimivat alkulähteenä tahtoille, jotka toivovat saada tietoonsa perimmäiset toiminta- ja työperiaatteet valimoteollisuuden uuneista sekä sivutuotteiden kierrätyksen taustaa.

## 2 VALIMOTEOLLISUUS

Valutyö on kulkenut osana ihmisten elämää jo Mesopotamian ajoista lähtien ja on nykypäivänä merkityksellisempää kuin koskaan aiemmin. Valimoteollisuus tuottaa noin 90 prosenttia maailman kestohyödykkeistä, joita tavataan kodinkoneista, kulkuneuvoista, teollisuusvarusteista, tuuliturbiineista ja ydinvoimaloista (American Foundry Society 2020). Valutyöllä voidaan luoda kerralla hyvin monimutkaisia kappaleita ja se on taloudellisuuden säilyvyyden kannalta vertaansa vailla muiden valmistusmenetelmien rinnalla (Autere ym. 1982, 7). Valutyössä materiaali sulatetaan sopivassa uunissa sulamislämpötilaan (raudalle 1 538°C, teräkselle 1 370°C) ja siirretään kuljetusastiaan eli valusenkaan ja valetaan aiemmin valmistettuun hiekkamuottiin. Hiekka on mahdollista kierrättää valimon sisällä, mutta myös ulkoisia käyttökohteita on olemassa esimerkiksi asfaltin valmistuksen saralla, kun hiekka muuttuu käyttökelvottomaksi valimon tarkoituksiin. Yleisimmät metallituotteet valimoilla ovat valurauta, teräs ja alumiini. Ajoittain käytetään myös värimetalleja, eli ei-rautapitoisia metalleja valukappaleisiin tai lisäaineena terässeoksille.

Pohjimmainen ero valuraudan ja teräksen välillä on koostumus. Rautaa löytyy omana itsenään luonnosta ja masuunissa pelkistämällä siitä saadaan sopivaa materiaalia valurautaa varten. Teräs on raudan, hiilen ja teräslaadusta riippuen muiden elementtien (pii, mangaani, kromi) metalliseos. Seoksen ollakseen laadukasta terästä, täytyy seoksessa olla hiiltä <2 %. Suurempi hiilipitoisuus aiheuttaa materiaalissa sitkeyden, ilmakorroosionsietokyvyn ja hitsattavuuden alenemista (Dalton 2020).

Valuraudat voidaan jakaa kolmeen huomattavasti erilaiseen ryhmään. Valkoinen-, harmaa- ja pallografiittivalurauta. Valkoisesta valuraudasta valmistetaan laippoja, mikseriä, lietepumppuja, putkisovituksia ja heloja. Harmaa valurauta sopii keittoastioihin, vauhtipyöriin ja laakereihin. Pallografiittivalurautaa tavataan pumpuista, hydrauliosista ja venttiileistä.

Ominaisuuksiltaan teräs on kovempaa ja lujempaa kuin rauta tiheämpien huokosten ansiosta. Rakennusmateriaalina suositaan terästä sen erinomaisesta kyvystä sietää puristusta ja (veto)jännitystä. Teräs ei ruostu yhtä helposti kuin

rauta, sekä lisäämällä seokseen kromia voidaan valmistaa ruostumatonta terästä.

Rauta ja teräs voidaan mieltää molemmat ekologisiksi materiaaleiksi loputtomasta kierrätysmahdollisuudestaan. Terästä pääsääntöisesti suositetaan enemmän, sillä teräksen kestävyys takaa kierrätystä tapahtuu huomattavasti harvemmin. Molempia voidaan kierrättää loputtomasti; raudan taikka teräksen ominaisuudet eivät heikkene.

Valuprosessi voidaan jakaa selviin eri vaiheisiin:

- Kappaleen suunnittelu
- Kappaleen muotin suunnittelu (kaavaus ja keernaus)
- Uunin metallipanoksen suunnittelu
- Sulatustyö
- Valaminen
- Kappaleen puhdistus ja pienien virheiden hiominen
- Lämpökäsittely ja viimeistely
- Tarkistus

Vuonna 2020 Suomessa tuotettiin harmaan valuraudan valuja yhteensä 17 270 tonnia. Pallografiittirautavaluja 23 118 tonnia. Teräsvaluja 6 664 tonnia. Metallivaluja 4 145 tonnia. Yhteen summattuna valuraudan ja teräksen tuotanto oli suomessa vuonna 2020 47 052 tonnia. (Teknologiateollisuus 2020.)

Vuonna 2019 Euroopassa tuotettiin yhteensä 11,5 miljoonaa tonnia rauta- ja teräsvaluja (The European Foundry Association 2020, 7). Maailmanlaajuisesti hieman vajaa 110 miljoonaa tonnia (Modern Casting 2019).

### **3 BIOKE-HANKE**

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun bio- ja kiertotalouden tutkimuskeskus BioSammon haastavien materiaalien tutkimus- ja kierrätyksen edistämisen BIOKE-hanke. Tavoitteena on edistää teollisten sivuvirtojen ohjautumista uudelleenkäyttöön uusien projektien parissa, kun niiden käyttömahdollisuudet ovat tyrehtyneet alkuperäisessä tehtävässään. Käsitellyn materiaalin arvoa voidaan nostaa merkittävästi oikeaoppisella käsittelyllä, joka myös johtaa loppusijoitettavan materiaalin määrän vähenemiseen. Murskaus- ja mikronisointitekniikka on projektin keskeisessä roolissa.



Hankkeessa keskitytään materiaaleihin, joiden kierrättäminen on tähän saakka todettu haastavaksi ja monimutkaiseksi.

Materiaaleja murskataan ja hienonnetaan Kouvolan seudulla sijaitsevassa BioSammossa, joka on bio- ja kiertotalouden tutkimuskeskus. Laitekantaan luokituu esimerkiksi leikkuumylly, leukamurskain ja kuulamyly. BIOKE-projektissa ollaan kiinnostuneita potentiaalisimmista materiaaleista, joita hienontamalla pyritään nostamaan niiden reaktiivisuutta ja tasalaatuisuutta mahdollisimman korkeaksi, mahdollistaen materiaalien uuden hyötykäytön. Tässä työssä esiintyvä tarkastelu valimon kiertotalouteen liittyen on luonteeltaan yhteensopiva BIOKE-projektin asettamiin tavoitteisiin. Aiemmin mainittu kappalemuottien hiekan uudelleenkäyttö asfaltin valmistuksessa on yksi hyvä kiertotaloudellinen esimerkki. Hankkeen päärahoittajana toimii Kymenlaakson liitto Euroopan aluekehitysrahastosta. Rahoitukseen osallistuvat myös Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu Oy ja Umacon Oy.

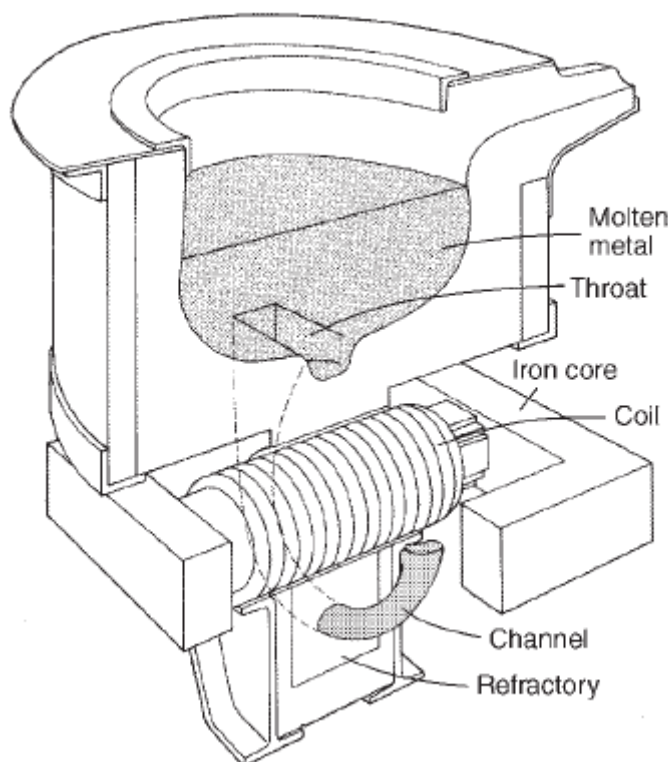
## **4 UUNITYYPIT**

Tässä luvussa käsitellään kahta yleistä uunityyppiä, induktiouunia ja valokaariuunia, joilla suurin osa valimossa tehdyistä sulatuksista suoritetaan. Valokaariuuneja on kahta erilaista mallia, tasa- ja vaihtovirralla toimivia ja induktiouuneja myös kahta mallia, kourullinen ja kouruton malli. Luvussa tarkastellaan molempien uunien rakennetta ja toimintatapaa. Valokaari- ja induktiouuniin tehdään tulevaisuudessa katsaus ajotapoihin ja energiataseisiin.

### **4.1 Induktiouunit**

Yksi yleisimmistä sulatustavoista valimoteollisuudessa on induktiomenetelmä. Sulatukseen käytetty lämpö tuotetaan uunin ympärillä olevalla käämillä, joka luo metallissa pyörrevirtoja tuottamallaan elektromagneettisella kentällä. Sama kenttä myös sekoittaa sulaa metallia tehokkaasti pitäen kemiallisen koostumuksen ja lämpötilan yhdenmukaisena. Kourumallisissa uuneissa uunin ympäröivän primäärikäämin lisäksi on sekundaarikäämi, jotka yhdessä muodostavat sulametallikourun. Primäärikäämiin johdetaan valimon uunimallin mukaisesti esimerkiksi 50–60 Hz verkkotaajuus ja kourussa virtaava metalli muodostaa sekundäärikäämin kanssa oikosulun, johtaen voimakkaaseen sulamiseen. Sula metalli virtaa putkikanavassa ja siirtyy yläpuolella olevaan uu-

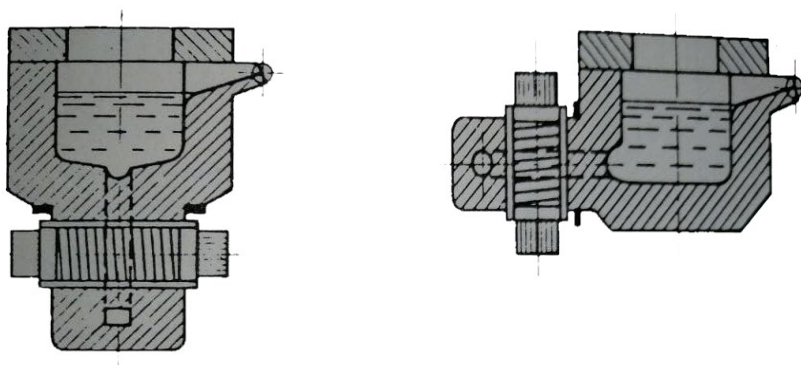
nipesään. Sulan metallin liike aiheuttaa uunipesässä olevan panoksen sulamisen. (Autere ym. 1982, 74.) Kourumallisen uunin teho on matala. Vain pieni osa virtaavasta metallista vastaanottaa sähköenergiaa, eikä se riitä sulattamaan suuria panosmääriä itsenäisesti. Uuneja on käytetty niinkin alhaisella teholla, kuin 20 kW 315 kg panosta kohden eli 63,5 kW/1 000 kg. (Campbell 2013, 64.) Kourumallisiin induktiuuneihin kaadetaan jo valmiiksi sula panos toisen uunin sulattamana sulatusprosessin käynnistämiseksi. Ajoittain näitä uuneja käytetään sulan metallin lämpötilan ylläpitämiseen ja väliaikaiseen säilymiseen. Kuvassa 1 on esitetty kourumallinen induktiuuni.



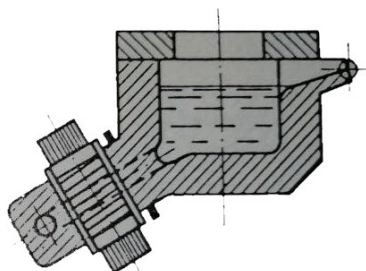
Kuva 1. Kourumallinen induktiuuni (Campbell 2013, 64)

Kourullisella uunilla on tietynlaisia käyttökohteita ja parhaiten uunin ominaisuudet tulevat esille matalan sulamispisteen metalleissa ja sulametallin kuumanapitämiseen. Seosten koostumusten hallitseminen on hankalaa. Suurella metallisulapanoksella on korkea hydrostaattinen paine, mikä aiheuttaa nopeaa uunin tulenkestävän vuorauksen kulumista. Toisaalta samainen paine varmistaa, ettei kanavan metallivirta katkea helposti; metallin jähmettyminen kourussa on katastrofaalista. Kourujen asennolla pystytään myös vaikuttamaan uunin huoltotarpeisiin ja sulatettaviin seoksiin. Pystykourulliset ovat helppoja puhdistaa, sallien hapettavien metallien sulatuksen. Hapettumistuot-

teet tukkivat kourun helposti, joten helpot huoltotoimenpiteet ovat välttämättömiä. Vaaka-asentoon asennetut kourut suovat alhaisemman hydrostaattisen paineen, vähentäen ylikuumentumisen riskiä. Toisaalta nämä kourut ovat hankalia puhdistaa, eivätkä sovellu oksideja muodostaville metalleille. Vinoon asennettu kouru yhdistää kahden edellisen kourun hyvät puolet. (Autere ym. 1982, 75.) Kuvissa 2, 3 ja 4 on esitetty pysty-, vaaka- ja vinomalliset kourut.

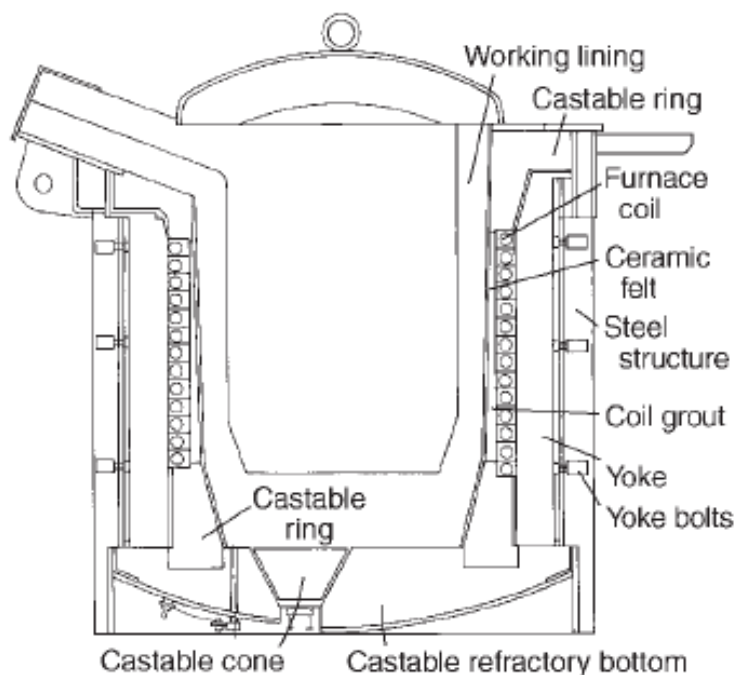


Kuva 2 ja kuva 3. Pysty- ja vaakakouru (Autere ym, 75)



Kuva 4. Vinokouru (Autere ym, 75)

Kouruttomassa induktiouunissa uunipesä on ympäröity ontolla spiraalinmuotoisella kupariputkella, joka on peltikuoren ja tulenkestävä vuorauksen välissä. Putken sisällä virtaa jäähdytysvesi estämään kuparin kuumentumisen indusoidusta lämmöstä. Tässä uunimallissa metallin sulattaminen ja sekoittuminen tapahtuu täysin pyörrevirtojen ja elektromagneettisen kentän vaikutuksesta. Kouruttoman uunin etuna sulatusprosessi voidaan käynnistää kylmällä uunilla; valmiiksi sulaa metallia toiselta uunilta ei tarvita. (Campbell 2013, 64.) Intian hallituksen energiatehokkuusviraston (2017, 7) mukaan kouruttomissa induktiouuneissa energiankulutus on noin 500–800 kWh metallitonnia kohden. Kuvassa 5 on esitetty kouruton induktiouuni.



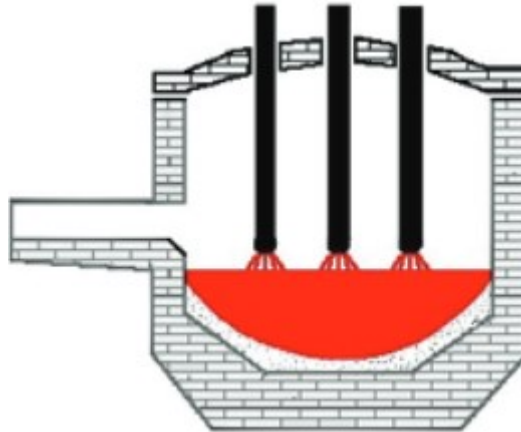
Kuva 5. Kouruton induktiouuni (Campbell 2013, 65)

## 4.2 Valokaariuunit

Valokaariuuneja käytetään lähestulkoon yksinomaan teräksen valmistamiseen. On myös tapauksia, jolloin niitä saatetaan käyttää raudan sulatukseen, sulan metallin lyhytaikaiseen säilöntään tai seosten jalostukseen. (Campbell 2013, 68.) Näitä uuneja on kahdenlaisia: vaihtovirta- ja tasavirtamalleja. Valokaariuunin rakenne voidaan jakaa kolmeen osaan. Kuori, johon sisältyy sivuseinät ja terässammio. Ahjo, johon sisältyy vuorauskerros, peittää terässammion. Katto, joka on joko vuorattu tai vesijäähdytteinen ja josta elektrodi(t) tulevat lävitse.

Tasavirtavalokaariuunissa grafiittielektrodi luo valokaaren pohjalektrodin kanssa ja syntynyt valokaari sulattaa pysty- ja pohjalektrodin välissä olevan metallin. Vaihtovirtavalokaariuunissa valokaari syntyy pystyelektrodien välille ja metallipanoksen elektrodien välissä sulaa. Elektrodiin johdetaan kolmivaihevirta suurjännitemuuntajasta, keskikokoisissa uuneissa noin 60 MVA, 400...900 voltin toisiojännitteellä sekä 44 000 ampeerin toisiovirralla (Horin ym. 2011, 79). Tasavirta- ja vaihtovirtamalleissa elektrodit liikkuvat pystysuoraan saavuttaakseen vakaan valokaaren ja optimin virranvoimakkuuden. Automaatiojärjestelmä hallitsee säätöventtiileitä ja toimilaitteiden on vastattava säätöihin nopeasti jännitepiikkien välttämiseksi sekä taloudellisuuden ylläpitämiseksi. Jos

virran ja jännitteen suhde on liian alhainen, säätölaite laskee elektrodia alas-päin. Vastaavasti liian korkealla suhteella elektrodi nostetaan. (Autere ym.1982, 69.) Sulatustehoa voidaan nostaa sijoittamalla seinämille öljy- tai kaasupolttimia, pääsääntöisesti maakaasupolttimia. Kuvassa 6 on esitetty poikkileikkaus vaihtovirtavalokaariuunista. Kuvassa näkyvät kolme elektrodia ja sulametalli.



Kuva 6. Vaihtovirtavalokaariuunin poikkileikkaus (Horin ym. 2011, 78)

Valokaariuunit ovat tarkoitettu suurten valuerien valmistamista varten. Pieniko-koiset valokaariuunit ovat äärimmäisen epätaloudellisia ja pääsääntöisesti muutaman tonnin suuriset panokset tulisi sulattaa induktiouunia käyttäen. Suurena valokaariuunin etuna pystytään sulattamaan laajaa valikoimaa metalliromua; jopa heikkolaatuisista raaka-aineista on mahdollista valmistaa jalote-räksiä. (Autere ym. 1982, 72.)

Tasavirtauuneissa elektrodi asetetaan panoksen yläpuolelle ja virta kytketään päälle. Elektrodi tunkeutuu metallipanoksen lävitse, ottaa yhteyden pohjaelektrodiin ja sulaminen alkaa. Elektrodin ympärillä oleva romurauta myös suojaa uunin vuorausta voimakkaalta valokaarelta. Sulatuksen loppupuolella valokaaren pituutta lyhennetään säteilylämpöhäviöiden minimoimiseksi ja vuorausva- hingon estämiseksi. Tyypillisesti sulametallin muodostumisen jälkeen uuniin syötetään happea terässeoksen hiilen hapettamiseksi. Usein myös sulametal- liin syötetään myös hiilipulveria, joka redusoi rautaoksidit (Toulouevski & Zinu- rov 2010, 14). Hiilen ja raudan hapetuksesta syntynyt hiilimonoksidi minimoi typen absorboitumisen ja huuhtoo vedyn metallista, sekä vaahdottaa kuonaa mahdollistaen helpon kuonanpoiston. Metalliseoksissa typpi on liuennut su- laan metalliin. Kun sula metalli valetaan ja sen annetaan jäähmettyä, myös

typpi alkaa muuttua takaisin kaasumaiseen muotoon. Tämä voi johtaa kupliin ja aukkoihin valukappaleissa. (Svyazhin ym. 2014, 552.) Vety aiheuttaa jo pienissä määrissä haitallisia vaikutuksia metallin työstettävyydelle, kuten hiusmurtumia, haurautta ja plastisuuden alenemista (Total materia 2007). Tasavirtavalokaariuunin sulatusprosessi voidaan jakaa kuuteen prosessivaiheeseen:

- Virrankytkentä, valokaaren muodostus
- Porausvaihe
- Metallin alkusulamaisvaihe
- Pääsulamisvaihe
- Loppusulamaisvaihe
- Sulan metallin lämmitysvaihe (lämpötilan ylläpito)

Valokaariuunit kuluttavat energiaa noin 440 kWh/1 000 kg. Suurimmissa 100–130 tonnin uuneissa voidaan päästä jopa 320–350 kWh/1 000 kg. (Horin ym. 2011, 80.) Noin 50 % kokonaisenergiamäärästä on sähköenergiaa ja loput kemiallista energiaa, joka syntyy hapettuneista elementeistä kuten hiilestä, raudasta ja piistä. Noin 53 % kokonaisenergiasta poistuu uunista sulaan teräkseen sitoutuneena. Loput ovat sitoutuneet kuonaan, kaasupäästöihin tai jäädytykseen. (Horin ym. 2011, 78.)

### 4.3 Induktio- ja valokaariuunin pohjimmaiset eroavaisuudet

Induktio- ja valokaariuunilla on selviä eroja tuottaen erilaiset käyttökohteet, vaikuttaen myös materiaalivalintoihin. Luetellaan suurimmat erot, edut ja varjopuolet.

#### Valokaariuunit

- + Lämpötilaa voidaan hallita helposti.
- + Energia siirtyy välittömästi elektrodista metallipanokseen.
- + Suuret saantomäärät. Mitä isompi valu, sitä parempi taloudellisuus.
- + Voidaan käyttää heikkolaatuista metalliromua.
- + Valokaaren luoma korkea lämpötila kykenee sulattamaan lähes mitä tahansa.
- + Kuonan korkeampi lämpötila. Mahdollistaa tehokkaan fosforin poiston, jos teräslaatu niin vaatii. (Kiscosteel 2020.)
- - Kuparin, nikkelin, kromin, rikin, molybdeenin ja muiden jäännösainesten poistaminen vaikeaa tai mahdotonta tietyissä teräslaaduissa.
- - Elektrodien kuluminen.
- - Käytännössä kannattaa sulattaa vain terässeoksia.
- - Sulatusaika pidempi.

- - Huomattavasti suurempi energiankulutus, melu, pöly- ja kaasupäästöt.
- - Alhaisempi metallin talteenotto, sulatushäviöt 7–10 %.

### Induktiouunit

- + Lämpötilaa voidaan hallita helposti.
- + Sulatusaika lyhyempi.
- + Magneettikentän luontainen metallikylvyn sekoitus pitää sulan metallin lämpötilan ja koostumuksen homogeenisenä.
- + Pieni määrä päästöjä, meluja, kaasuja ja pölyä.
- + Pienemmät hapettumistuotteet, ei happipuhallusta.
- + Jalostus- ja AOD-prosessilta voidaan välttyä.
- + Pienempi investointikustannus.
- + Korkeampi metallin talteenotto, sulatushäviöt 1–2 %.
- - Pienet saantomäärät.
- - Kourumallista riippuen seosten koostumuksen hallinta hankalaa.
- - Vuorauksen kuntoa pidettävä tarkasti silmällä.
- - Vähemmän valinnanvaraa sulatettavan materiaalin kanssa.
- - Pienitehoiset uunit vaativat esisulatetun panoksen prosessin käynnistämiseksi.

## **4.4 Muut uunityypit**

Kupoliuuni on vanhin edelleen käytössä oleva valuraudan valmistukseen käytetty uuni. Kupoliuunien tapaaminen Suomessa on harvinaista niiden vapauttamien päästöjen ja polttoaineen - koksen, korkeasta hinnasta johtuen. Induktiouunit käytännössä korvasivat kupoliuunin.

Lieskauuni on kupoliuunia vielä harvinaisempi uunityyppi nykypäivänä. Uuniin asetettu panos sulaa erillisessä polttoainekammiossa palavan polttoaineen lämpösäteilyn johdosta. Polttoaineena lieskauuneissa toimii öljy, kaasu tai kivihiilijauhe ja juuri näiden materiaalien takia lieskauunin käyttö on lähestulkoon loppunut kokonaan päästösäädösten kiristyessä. Saantomäärät ovat pienet.

Upokasuuni on yksi vanhimmista uunityypeistä. Uunissa on tulenkestävällä massalla vuorattu ahjo, johon metallipanos syötetään. Sulatus tapahtuu seinien kautta konvektion avulla. Perinteisesti polttoaineena on käytetty koksia, öljyä, maakaasua tai sähköä. Sopiva käyttökohde uunille on matalan sulamispisteen materiaalit.

## 5 ENERGIATEHOKKUUS

Energiatehokkuuden juuri piilee yhtä suuresti työtavoissa kuin käytetyssä laitteistossa. Sulatustöissä tulee pyrkiä pitämään jatkuva sulatusprosessi käynnissä mahdollisimman vähäisillä seisokkijaksoilla käyttäen moderneja uuneja.

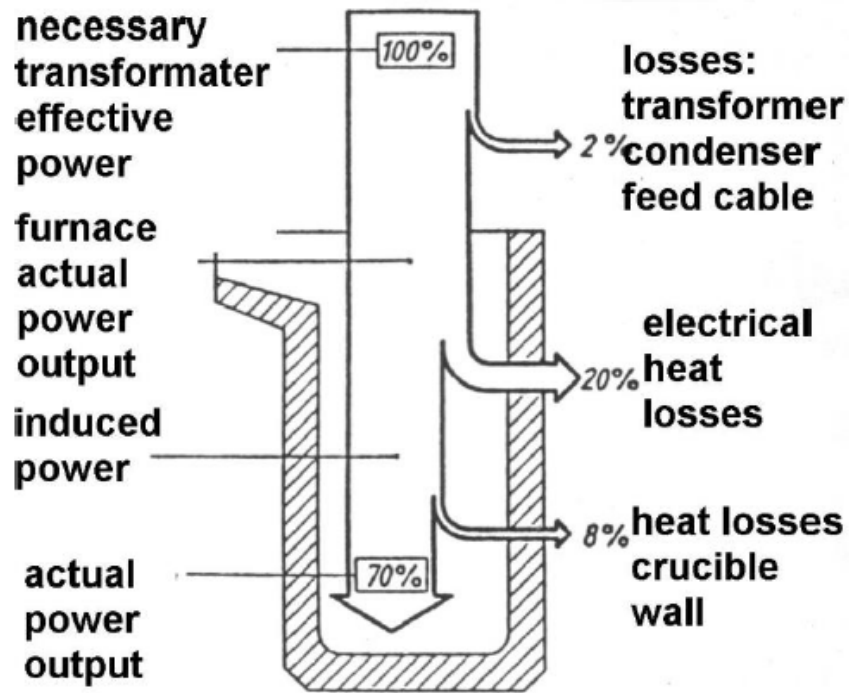
Sähköuuneissa käytetään suuri määrä energiaa jäähtytykseen, noin 100 kWh metallitonnia kohden pitämään sulan metallin lämpötila vakiona (Foundrybench 2018, 19). Induktiouuneissa tarvitaan välttää induktiokäämien kuumentamista ja valokaariuuneissa teräsrakenteiden kuumentamista.

Valuraudan korkean Curie-pisteen ansiosta (n. 900°C) induktiouunin käämien tehokkuus nousee. Elektromagneettinen kenttä vetää rautaa puoleensa voimakkaasti pidemmän aikaa kuin alhaisemman Curie-pisteen metalleja. Lyhyemmällä sulatusajalla lämpöhäviöt pienenevät. (Kemppainen 2021.) Tämä on yksi asia, jota harkita, kun pohditaan vaihtoehtoa keskitaajuus- ja korkeataajuusinduktiouunin välillä. Uunin ajo korkeimmalla mahdollisella sähköteholla ja korkealla tehontiheydellä on kaikista suotavinta.

### 5.1 Induktiouunin energiatehokkuus ja energiatase

Induktiouuneissa sulatettava materiaali vaikuttaa suuresti hyötysuhteeseen. Kuparin ja alumiinin kaltaisissa alhaisen ominaisvastuksen omistavissa materiaaleissa lämpö- ja sähköhäviöt ovat suuremmat kuin rautapohjaisissa materiaaleissa. Kokonaishyötysuhde induktiouuneissa riippuu metallipanoksen ja sähkömagneettisen kentän kontaktista sekä lämpötehokkuudesta (paljonko lämpöä menetetään säteilyn kautta tai uunin seiniin). Jäähdytyksellä on suuri vaikutus sähköenergian häviöihin; jopa 20–30 % sähköenergiasta voidaan menettää jäähtytykseen (Kemppainen 2021). Uunin vuorausta tulee seurata tarkasti lämpöhäviöiden minimoimiseksi. Vuorauksen ohentuessa lämpöhäviöt kasvavat reilusti, mutta toisaalta kontakti metallipanoksen ja käämin välillä paranee. Kuvassa 7 on esitetty kouruttoman induktiouunin tyypillinen häviötilanne.





Kuva 7. Induktiouunin häviöt (Kempainen 2021)

Induktiouunien hyötysuhteet liikkuvat 70–85 % välillä ja käyttävät energiaa 450–550 kWh/1 000 kg sulan metallin lämpötilan ollessa 1 500°C (Futas ym. 2020, 37). Tarkastellaan induktiuunin hyötysuhteen määrittystä yhtälöllä 1.

$$\eta_{IU} = \frac{\Delta H_K}{W_{total}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

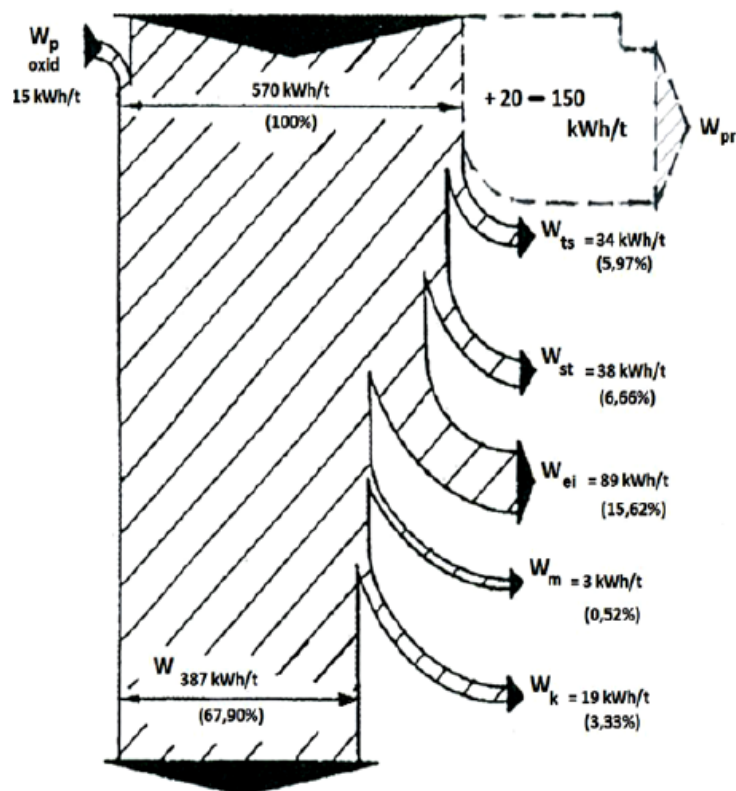
jossa	$\eta_{IU}$	Induktiouunin hyötysuhde
	$\Delta H_K$	sulan metallin lämpösisältö
	$W_{total}$	kokonaissähköenergia

Lasketaan esimerkkinä uunin hyötysuhde, kun sulatettava materiaali on harmaa valurauta lamelligrafiitilla (EN-GJL) 1 500°C lämpötilassa, milloin lämpösisältö on 387 kWh/1 000 kg.

$$\eta_{IU} = \frac{387 \text{ kWh}/1000 \text{ kg}}{550 \text{ kWh}/1000 \text{ kg}} \cdot 100 \%$$

$$\eta_{IU} \approx 70 \%$$

Kuvassa 8 on esitetty yksityiskohtainen häviötilanne rautapanosta sulattaessa.



Kuva 8. Yksityiskohtaisempi induktiouunin tasetilanne (Trans Tech Publications Ltd. 2020, 37)

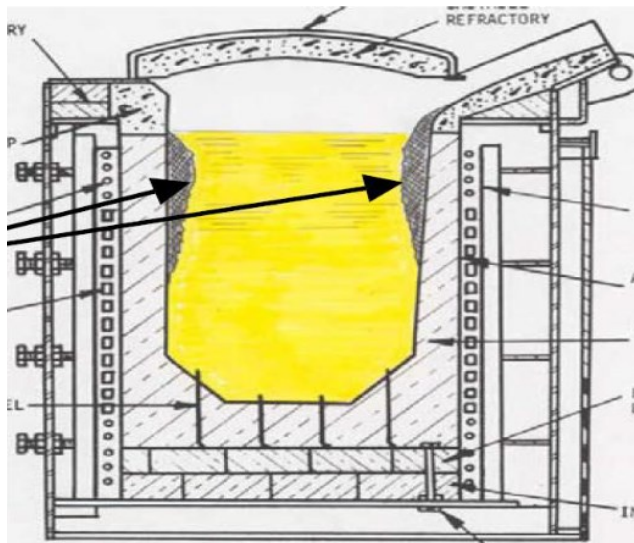
Kuvan selitykset:

$W_{poxid}$	palamistuotteista syntynyt lämpöenergia
$W_{pr}$	käyttöhäviöt
$W_{ts}$	lämpöhäviö käämistä ja sulatusastiasta
$W_{st}$	kuonahäviöt
$W_{ei}$	sähköinduktiohäviöt
$W_m$	taajuusmuunninhäviöt
$W_k$	uunin sähköasennusten häviöt

Käyttöhäviöllä viitataan siihen, että panoksesta riippuen uuni käyttää hiukan enemmän energiaa kuin valmistaja on nimellisesti ilmoittanut. Intian hallituksen energiatehokkuusviraston (2017, 24) mukaan induktiouunin hyötysuhteen ylläpitämiseksi voidaan suorittaa seuraavia toimenpiteitä:

- Käytetään panoksena materiaalia, jossa ei ole hiekkaa, ruostetta, likaa tai öljyä. Ruosteinen panos sulaa hitaasti ja sisältää myös vähemmän metallia panosta kohden. Jokainen ruosteen prosenttiosuus tonnin kokonaissulamassasta aiheuttaa 10 kWh energiahäviön 1 500°C sulatustilassa.
- Metallipalasten koon ei tulisi ylittää 1/3 uunin sulatusastian halkaisijasta.

- Teräviä metallipalasia tulee välttää, etenkin suuripainoisissa panostuksissa. Terävät reunat voivat aiheuttaa vahinkoa vuoraukseen, nostoen lämpöhäviöitä.
- Induktiouunia ei tule täyttää kuparikämin pituuden yli. On myös huomioitava, ettei uuniin lastata liikaa materiaalia silloin, kun vuoraus on käytössä kulunut, antaen uunille lisää näennäistä tilavuutta.
- Suuret metallipalat lastataan ensin. Pienet sen jälkeen.
- Paalattua teräsromua ja koneistuslastua tulee välttää.
- Uunia tulee käyttää aina täysteholla.
- Uunin kupu tulee olla aina paikoillaan, kun mahdollista. Ilman kupua lämpöhäviöt voivat olla yli 25 kWh tonnia kohden.
- Kuonan kertymistä uunin seiniin tulee välttää. Tyypillisesti kuona kerääntyy kuparikämin yläpuolelle. Tarkka alue on havainnollistettu kuvassa 9.
- Märkää tai kosteaa materiaalia ei saa missään tapauksessa lisätä sulan metallin sekaan. Suuri riski höyryräjähdykselle.



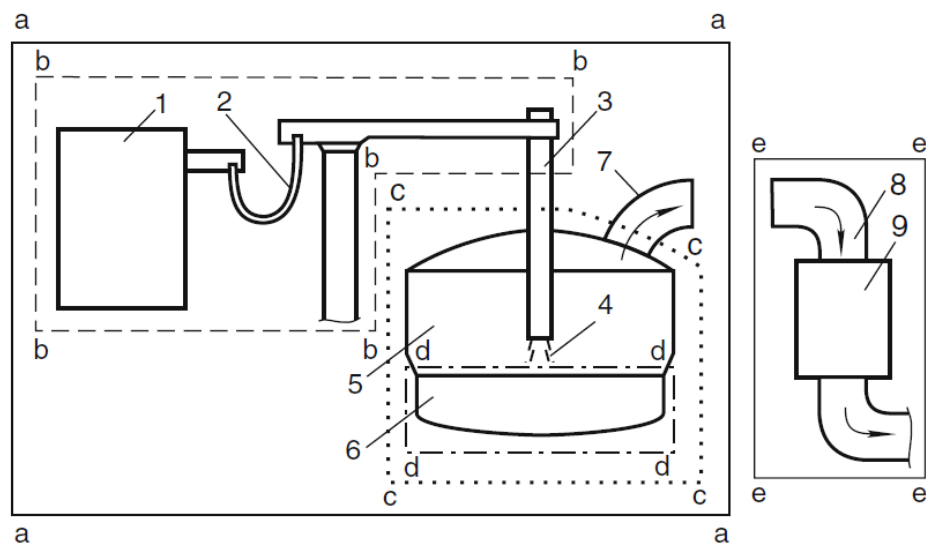
Kuva 9. Tyypillinen kuonan kerääntymispaikka induktiouneissa (Government of India 2017, 9)

Sulatusprosessin luomat lämpöhäviöt voidaan ohjata muualle hyötykäyttöön oikeilla toimenpiteillä. Hyötykohteita voivat olla esimerkiksi valimohallin lämmitys, induktiouuniin menevien materiaalien kuivaaminen, käyttö- ja prosessivesien lämmitys ja muottien hiekkasydänten (keernojen) lämmitys.

## 5.2 Valokaariuunin energiatehokkuus ja energiataseet

Valokaariuunien energiatehokkuus on oltava mahdollisimman korkea taloudellisuuden säilyttämiseksi, etenkin jos vuosittainen käyttöaste on korkea. Sulatusprosessin vaatima happi-injektio tuottaa suuret savu- ja pölymäärät vaatien hyvin korkeatehoiset poistojärjestelmät. Myös kuonanpoisto luo pölypäästöjä. (Kemppainen 2021.)

Tarkastellaan valokaariuunin energiatasetta. Tarkastelun kohde on rajattu c-katkoviivan sisään kuvassa 10.



Kuva 10. Valokaariuunin eri tasekohtia (Toulouevski & Zinurov 2010, 66)

C-sektorin energiatase muodostuu yhtälön 2 kaltaiseksi:

$$\sum E_{c-c} = \overbrace{E_{ARC} + E_{SCR} + E_{NG} + \Sigma E_{CH} + E_{OTH}}^{\text{Syötetty energia}} = \overbrace{E_{MET} + E_{SL} + E_{OFF.G} + E_{WAT} + E_{OTH}}^{\text{Lähtävä energia}} \quad (2)$$

### Syötetty energia:

jossa	$E_{ARC}$	Valokaaren energia
	$E_{SCR}$	Uuniin lastatun panoksen lämpösisältö
	$E_{NG}$	Polttimien maakaasun energia
	$\Sigma E_{CH}$	Eksotermisten reaktioiden energiasumma
	$E_{OTH}$	Satunnaiset häviöt pohjan kautta

$$\sum E_{CH} = E_{COK} + E_{CH.MET} + E_{CH.SL}$$

jossa	$E_{COK}$	energia koksiiilen hapettumisesta
	$E_{CH.MET}$	energia metallin hapettumisesta (rauta ja sen seokset, kuten C, Si, Mn, Cr)
	$E_{CH.SL}$	oksideista muodostuvan kuonan energia

### Lähtevä energia:

jossa	$E_{MET}$	Sulan metallin lämpösisältö valuhetkellä
	$E_{SL}$	Kuonan lämpötila (myös aiemmin poistettuna)
	$E_{OFF.G}$	Poistokaasujen aiheuttama lämpöhäviö
	$E_{WAT}$	Seinän ja katon lämpöhäviöt vesijähdytyksestä

Tarkastellaan esimerkkitapausta modernin 130 tonnin valokaariuunin energiataseesta. Uunin ominaisuudet ovat 78 MW / 90 MVA alhaisella sähköenergian kulutuksella, 331 kWh/1 000 kg. Valujen välinen aika on 38 minuuttia. Uuniin syötetään reilusti happea, 47 m<sup>3</sup>/1000 kg, koksia 24,7 kg/1000 kg ja maakaasua 10,3 m<sup>3</sup>/1000 kg. Uuniin lastataan panos kylmänä. 16,8 kg koksista lastataan panoksen mukana heti ja loppu 7,9 kg koksista syötetään myöhemmin pulverimaisena happi-injektion yhteydessä. Jet-moduulit, happi-polttoainepolttimet ja ilmahormit ovat asennettuna uunin seinille. Happi-polttoainepolttimia on 9 kappaletta. Taulukossa 1 ja 2 on esitetty kyseisen valuprosessin energiakomponentit.

Taulukko 1. Valuprosessin syötetyn energian komponentit (Toulouevski & Zinurov 2010, 69)

Sisäänmenevä energia		kWh/tonni	%
1. Sähköenergia,	$E_{EL}$	331,0	49,2
2. Maakaasu,	$E_{ENG}$	107,0	15,9
3. Hapettumisreaktioiden kemiallinen energia	$\Sigma E_{CH}$	211,0	31,3
$\Sigma E_{CH} = E_{COK} + E_{CH.MET} + E_{CH.SL}$ , sisältää:			
Koksin hapettumisen energia,	$E_{COK}$	96,1	14,3
Energia metallin hapettumisesta (rauta ja sen seokset: C, Si, Mn, Cr jne.),	$E_{CH.MET}$	101,9	15,1
Energia kuonan muodostumisesta,	$E_{CH.SL}$	13,0	1,9
4. Muut pienet energialähteet (elektrodien hapettuminen, jne.)	$E_{OTH}$	24,0	3,6
5. Yhteensä	$\Sigma$	673	100

Taulukko 2. Valuprosessin lähtevän energian komponentit (Toulouevski &amp; Zinurov 2010, 69)

Ulostuleva energia		kWh/tonni	%
1. Sulan teräksen lämpösisältö ennen valua (hyödyllinen lämpö) 115 tonnin paino, 1643°C,	$E_{MET}$	391	58,1
2. Kuonan lämpösisältö ennen valua (ja aiemmin poistettu kuona),	$E_{SL}$	58	8,6
3. Katon ja elektrodiraon kautta poistuvan savukaasun lämpösisältö,	$E_{OFF.G}$	75	11,2
4. Seinien ja kattopaneelien jäähtymisestä aiheutuvat lämpöhäviöt,	$E_{WAT}$	77	11,4
5. Sähköenergia häviöt muuntajassa ja toisiopiirissä,	$E_{ELL.OS}$	23	3,4
6. Muut häviöt uunin pohja mukaan luettuna	$E_{OTH}$	49	7,3
7. Yhteensä	$\Sigma$	673	100

Tarkastellaan yhtälössä 3 energiataseen aluetta a-a, joka kattaa koko valokaariuunijärjestelmän komponentit: 1. Muuntaja 2. Toisiopiiri 3. Elektrodit 4. Valokaaret 5. Tyhjättila (Freeboard) 6. Sula-allas 7. Katto

$$\sum E_{a-a} = \overbrace{E_{EL} + E_{SCR} + E_{NG}}^{\text{Syötetty energia}} + \sum E_{CH} + E_{OTH} = \overbrace{E_{MET} + E_{SL}}^{\text{Lähtevä energia}} + \sum E_{LOS} \quad (3)$$

### Syötetty energia:

jossa	$E_{EL}$	sähköenergia korkeajänniteverkosta
	$E_{SCR}$	Uuniin lastatun panoksen lämpösisältö
	$E_{NG}$	Polttimien maakaasun energia
	$\sum E_{CH}$	Eksotermisten reaktioiden energiasumma
	$E_{OTH}$	Pienet energianlähteet: elektrodin hapettuminen, metalliromun öljyn palaminen yms.

$$\sum E_{CH} = E_{COK} + E_{CH.MET} + E_{CH.SL}$$

jossa	$E_{COK}$	energia koksihiilen hapettumisesta
	$E_{CH.MET}$	energia metallin hapettumisesta (rauta ja sen seokset, kuten C, Si, Mn, Cr)
	$E_{CH.SL}$	oksideista muodostuvan kuonan energia

**Lähtevä energia:**

jossa	$E_{MET}$	Sulan metallin lämpösisältö valuhetkellä
	$E_{SL}$	Jäävän kuonan ja aiemmin poistetun kuonan lämpösisältö

$$\sum E_{LOS} \quad \text{Kokonaisenergiähäviö}$$

$$\sum E_{LOS} = E_{EL.LOS} + E_{OFF.G} + E_{WAT} + E_{OTH}$$

jossa	$E_{EL.LOS}$	Sähköenergiähäviö muuntajassa ja toisiopiirissä
	$E_{OFF.G}$	Energiähäviö katon ja elektrodiraon kautta karkaavasta savukaasusta
	$E_{WAT}$	Energiähäviö vesijähdytyksestä sei- nässä ja kattopaneelissa
	$E_{OTH}$	Muut satunnaiset häviöt ja häviöt pohjan kautta

Määritetään vielä yhtälössä 4 tasealue d-d. Energiataseessa yhtälö on muodostettu sulatushetkelle, jolloin koko metallipanoksen on sulanut. Maakaasun syöttö on nyt asetettu hyvin pieneksi ja sitä syötetään ainoastaan sen estämiseksi, ettei kuona tuki suuttimia. Voimme siis jättää maakaasun energian huomioimatta. Yhtälö 4 on määritelty nimenomaisesti sille ajalle, kun metallipanoksen on saatu sulatettua ja se valetaan. Aiemmissa yhtälöissä 3 ja 2 energiamäärät ovat laskettu koko sulatusprosessin ajaksi.

$$\sum E_{d-d} = \overbrace{E_{ARC} + E_{SCR} + \sum E_{CH}}^{\text{Syötetty energia}} = \overbrace{\Delta E_{MET} + \Delta E_{SL} + E_{WAT} + E_{OTH}}^{\text{Lähtevä energia}} \quad (4)$$

jossa	$E_{ARC}$	Valokaaren energia
	$E_{SCR}$	sulametallin sekaan syötetyn metallipanoksen lämpösisältö

$\Delta E_{MET}$	muutos metallin lämpösisällössä
$\Delta E_{SL}$	muutos kuonan lämpösisällössä
$E_{WAT}$	sulan metalliliuoksen lämpösäteilystä aiheutuvat lämpöhäviöt

### 5.3 Valokaariuunin hyötysuhde

Valokaariuunien hyötysuhteen määrittäminen eroaa perinteisestä hyötysuhteen määrittämisestä, joka yleisesti nähdään yhtälön 5 kaltaisena.

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (5)$$

jossa	$\eta$	hyötysuhde
	$E_{in}$	syötetty kokonaisenergia
	$E_{out}$	ulostuleva kokonaisenergia

Syynä ovat uunin monimuotoiset teho-ominaisuudet, jotka hyödyntävät fyysisiä ja kemiallisia energianlähteitä samanaikaisesti. Näitä ovat valokaari, happi-polttoainepolttimet, hiili/happisuihkutus, eksotermiset reaktiot ja sulan metallin energiasisältö. Moderneissa valokaariuuneissa sähköenergian osuus kokonaisenergiasta on noin 50 % ja joskus myös vielä alempi. Valokaariuuneja vertailtaessa usein keskitytään ainoastaan sähköenergian ominaiskulutukseen selvyyden ja yksinkertaisuuden vuoksi, vaikkakin se antaa ainoastaan suuntaa antavan kuvan uunin tehokkuudesta. (Toulouevski & Zinurov 2010, 82.)

Sulan metallin lämpösisältö,  $E_{MET}$ , voidaan mieltää suurin piirtein vakioksi. Alhaisen ja keskisuuren hiilimäärän teräslaatuojen valulämpötiloissa (1620°C ja 1640°C)  $E_{MET}$  on noin 390 kWh/1 000 kg sulaa terästä. Muille lämpötiloille lämpösisältö voidaan arvioida kaavan 6 avulla:

$$E_{MET} = 372 + (T_{valu} - 1550) \cdot 0,23 \text{ kWh}/1000 \text{ kg} \quad (6)$$



jossa	$E_{MET}$	sulan metallin lämpösisältö
	$T_{valu}$	metallin lämpötila valuhetkellä

Lasketaan esimerkkinä metallin lämpösisältö, kun  $T_{valu} = 1\,700^\circ\text{C}$ .

$$E_{MET} = 372 + (1700 - 1550) \cdot 0,23 \text{ kWh}/1000 \text{ kg}$$

$$E_{MET} = 406,5 \text{ kWh}/1000 \text{ kg}$$

Esimerkistä voidaan todeta, ettei lämpösisältö kasva huomattavasti.  $1\,700^\circ\text{C}$  on myös korkein suositeltava lämpötila sulatustyötä varten. Korkeammat lämpötilat aiheuttavat rautaseosten ominaisuuksien heikentymistä, vuorauksen nopeampaa kulumista ja jopa uunitiilien sulamista.

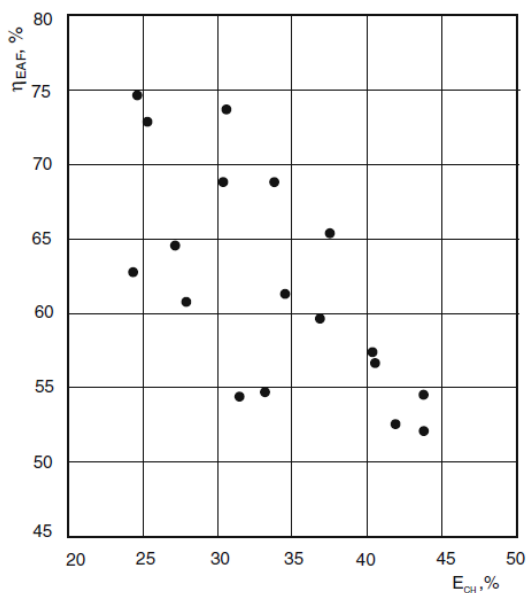
Koska  $E_{MET} \approx$  vakio, voidaan nyt perustellusti muodostaa yhtälö 7.

$$\sum E = E_{MET} + \sum E_{LOS} \quad (7)$$

jossa	$\Sigma E$	Kokonaisenergia
	$E_{MET}$	Sulan metallin lämpösisältö
	$\Sigma E_{LOS}$	Energiahäviöt

Ensisilmäyksellä on helppoa tehdä johtopäätös, että uunin hyötysuhde on sitä korkeampi, mitä matalimmiksi energiahäviöt  $\Sigma E_{LOS}$  saadaan. Taseita hyödyntämällä saadaan tarpeeksi tarkka tieto uunin kokonaisenergiasta  $\Sigma E$ . Ongelma on, ettei tämä laskutapa uunin tehokkuudesta ota huomioon aiemmin mainittuja monimuotoisia teho-ominaisuuksia, eikä myöskään tarjoa näkökulmaa niiden taloudellisuuteen tai käytön tehokkuuteen. Tämä tapa ainoastaan summaa jokaisen energialähteen ja -häviön oman termin alle. Toulouevskin ja Zinurovin (2010, 83) suorittaman analyysin mukaan valokaariuunien hyötysuhde ei ole niinkään suuresti uunin suunnittelusta ja ajomoodista riippuvainen. Sen sijaan suurimmassa roolissa ovat sulatettava materiaali, hapettumistuotteet, syötetyn koksen määrä ja valmistettavan teräslaadun koostumus. Kun

kemiallisen energian  $E_{CH}$  määrä kasvaa, valokaariuunin hyötysuhde laskee huomattavasti. (Toulouevski & Zinurov 2010, 83.) Ilmiö on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Kemiallisen energian vaikutus valokaariuunin hyötysuhteeseen (Toulouevski & Zinurov 2010, 84)

#### 5.4 Satunnaisia valimon energiatehokkuusseikkoja

Poistuvassa tuuletusilmassa on todella suuri potentiaali energiansäästöön. Jopa 70–80 % valimon uloslähtevästä energiamäärästä poistuu ilmastoinnin kautta. Parhaimmissa tapauksissa voidaan kierrättää poistuvasta lämmöstä 50 % takaisin valimon tarkoituksiin, mikä vastaa noin 700 kWh/1 000 kg teräsvalimoilla ja 300 kWh/1 000 kg rauta- ja ei-rautametalli valimoilla. Parhaimpiin tuloksiin päästään poistoilman kierrätyksellä. Nykyisten tehokkaiden pölynsuodattimien ansiosta kuutiometrissä ilmaa voi olla partikkeleita < 1 mg kappaleiden hionta-alueella ja hiekankierrätysprosessissa. Investointikustannukset ovat tosin korkeita, mutta takaisinmaksuaika lyhyt; vuonna 2012 3 000 €/m<sup>3</sup>/s 3–5 vuoden takaisinmaksuajalla. (Foundrybench 2012, 21.)

Yllättävän suuri määrä sähköenergiaa kuluu turhaan paineilmajärjestelmien löysien venttiilien, liitosten, sovitusten ja letkujen takia (Foundrybench 2012, 22). Mikäli valimossa halutaan aloittaa tarkempi tarkastelu energiatehokkuuteen, tämä on hyvä ja yksinkertainen paikka aloittaa; häviöt voidaan poistaa yksinkertaisesti täsmällisellä huollolla ja valvonnalla.

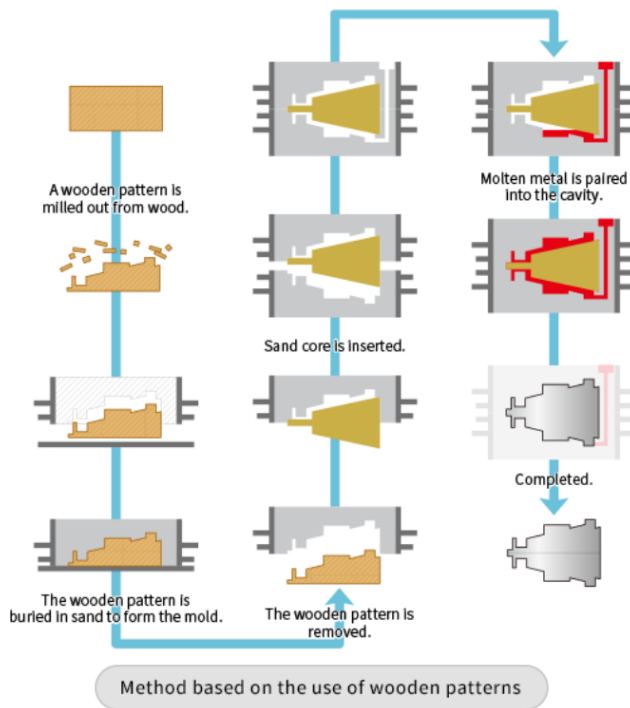
## 6 KIERTOTALOUS

Kiertotalous on kustannusten hillitsemiseksi välttämätöntä toimintaa. Mikäli teollisessa ympäristössä käytettäisiin aina koskemattomia raaka-aineita, nousisi tuotteiden ja palveluiden hinta hetkessä taivasiin tyrehdyttäen samalla planeetan raaka-aineista. Kiertotalous voidaan mieltää kaksiosaiseksi toiminnaksi. Resursseja voidaan kierrättää teollisuusympäristön välittömässä läheisyydessä ja myöhemmin sen ulkopuolella, kun materiaalin ominaisuudet ovat laskeneet liikaa jatkaakseen alkuperäisessä tehtävässään. Kiertotalouden juuri piilee jo suunnitteluvaiheessa ennen prosessin aloittamista. Vaikka näkyvin toiminta kiertotaloudessa on käytettyjen resurssien uudelleenkäyttö, pyritään prosesseja optimoimalla välttämään mahdollisimman paljon käsittelyä ja kierrätystä vaativan materiaalin syntymistä.

Valimoiden tapauksessa hyvä esimerkki on hiekka, joista luodaan muotti valukappaleita varten. Hiekkaa voidaan käytön jälkeen elvyttää ja sekoittaa uuden käyttämättömän hiekan kanssa muotiksi. Kun hiekka saavuttaa käytännöllisyytensä lopun valimon tarkoituksiin, on edelleen mahdollista myydä hiekka eteenpäin eri toimijoille erilaisiin käyttökohteisiin. Aiemmissa kappaleissa todettiin valokaariuunin pystyvän valmistamaan heikkolaatuisesta metalliromusta hyviä terässeoksia. Valimon luonteen mukaisesti virhevaluista ei koidu ylimääräistä materiaali-jätettä, koska epäonnistuneet kappaleet voidaan sulattaa uudelleen.

### 6.1 Hiekkamuotit

Euroopassa syntyy hiekkamuoteista jätehiekkaa noin 18 miljoonaa tonnia vuosittain, joista suurin osa päätyy kaatopaikalle (Caballero ym. 2018). Hiekasta muovataan valukappaleille sopiva muotti puisen muotin avulla ja tarvittaessa lisätään valun ajaksi hiekkasydän eli keerna muotin sisään. Valun jälkeen muotti rikotaan ja hiekka otetaan talteen elvyttämistä varten. Kierrätysprosessi suoritetaan yleisesti 3–8 kertaa ennen hiekan ominaisuuksien liiallista heikentymistä (Foundrybench 2018, 20). Kierrätyskerrat ovat kuitenkin valimokohtaisia. Kuvassa 12 on esitetty hiekkamuotin valmistus ja käyttö.



Kuva 12. Tyypillinen hiekkamuotin valmistusprosessi (Kimura Foundry Co. Ltd. 2016)

Hiekkamuotin muodostaa pohjahiekka, sideaine, lisäaineet ja muottijauhe. Yleisimmin pohjahiekkana käytetään hienoa piidioksidia ( $\text{SiO}_2$ ) eli kvartssia, jossa on sideaineena noin 10 % bentoniittia, 2–5 % vettä ja noin 5 % hiiltä. Näiden aineiden synnyttämää seosta kutsutaan usein vihreäksi hiekaksi, ”green sand”. Käytetty hiekka koostuu ohuen hiilikalvon päällystämästä kvartsihiekkasta, sideainejäämistä ja pölystä. Hiekkaa tarvitaan noin tonni jokaista rauta- ja terästonnia kohden. (Anderson 2010.) Taulukossa 3 on esitetty käytetyn hiekan fyysisiä ominaisuuksia.

Taulukko 3. Erään käytetyn hiekkakerän fyysisiä ominaisuuksia (U.S. Department of Transportation 2008)

Ominaisuus	Tulokset	Testimetodi
Ominaispaino, kg	2,39 - 2,55	ASTM D854
Suhteellinen tiheys, $\text{kg/m}^3$	2590	ASTM C48/AASHTO T84
Absorptio, %	0,45	ASTM C128
Kosteuspitoisuus, %	0,1 - 10,1	ASTM D2216
Saviaines and hauraat partikkelit	1 - 44	ASTM C142/AASHTO T112
Läpäisevyyskerroin (cm/sec)	$10^{-3}$ - $10^{-6}$	AASHTO T215/ASTM D2434
Plastisuusraja/plastisuusindeksi	Ei-plastinen	AASHTO T90/ASTM D4318

Taulukossa 4 on esitetty valimohiekan kemiallinen koostumus.

Taulukko 4. Valimohiekan tyypillinen kemiallinen koostumus (U.S. Department of Transportation 2008)

Aineosa	Määrä (%)
SiO <sub>2</sub>	87,91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,94
CaO	0,14
MgO	0,3
SO <sub>3</sub>	0,09
Na <sub>2</sub> O	0,19
K <sub>2</sub> O	0,25
TiO <sub>2</sub>	0,15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02
SrO	0,03
Hehkutushäviöt	5,28
YHTEENSÄ	100

Hehkutushäviöissä on lähdetekstissä viitattu kahteen eri tutkimustulokseen. Ensimmäisen lähteen mukaan häviöt ovat 0,45 ja 9,47 väliltä. Toinen lähde ilmoittaa luvuiksi 2,1 ja 12,1 väliltä. Asetetaan tässä tapauksessa hehkutushäviöiksi 5,28 100 % materiaalikatteen saavuttamiseksi.

Käytetyssä hiekassa esiintyy paljon haitta-aineita ja raskasmetalleja. Jotta käytettyä valimohiekkaa voidaan käyttää maanrakennustyössä, täytyy haitta-aineiden pitoisuus saada käsittelyn avulla MARA-asetusten mukaiseksi. Valimohiekkaa maanrakennuksessa käyttäessä vaaditaan yleensä myös kunnan ympäristölupa. (Autio & Päivinen 2019.) Caballeron ym. (2018) mukaan hiekassa esiintyvät haitalliset aineosat ovat fluoridi, fenoli, PAH- ja BTEX-yhdisteet. PAH-yhdisteet viittaavat polysyklisiin aromaattisiin hiilivetyihin; toisin sanoen epätäydellisestä palamisesta syntyviä karsinogeenisiä hiilivety-yhdisteitä. Koskisen ym. (2005, 23) mukaan monet näistä yhdisteistä ovat syöpää aiheuttavia. BTEX-yhdisteet viittaavat haihtuvien orgaanisten yhdisteiden alaryhmään, joka käsittää bentseenin, tolueenin, etyylibentseenin ja ksyleenin. Jotta valimoiden käytetyn hiekan uudelleenkäyttö olisi mahdollista, tulee näiden aineiden pitoisuuksien olla tarpeeksi alhaiset. Meehanite Technologyn suorittamien testien tuloksista todettiin innovatiivinen mahdollisuus luoda ekologisesti lannoitetta, kompostia ja rakennustäyteaineita valimoiden jätehiekkasta. Jätehiekan haitallisista ainesosista saatiin suurin osa viitearvojen

alapuolelle. Taulukossa 5 on esitetty aineiden määrät testien jälkeen. (Caballero ym. 2018)

Taulukko 5. Haitta-aineiden esiintyvyys käytetyssä hiekassa (Caballero ym. 2018)

Haitalliset aineosat	Vihreä hiekka	Fenolihiiekka	Silikaattihiekka	Raja-arvot
<b>Kloridit (mg/kg)</b>	89,5	79	766,75	<b>800</b>
<b>Fluoridit (mg/kg)</b>	2,3	<5	5,3	<b>10</b>
<b>Sulfaatit (mg/kg)</b>	<50	<50	153,25	<b>1 000</b>
<b>Fenolit (mg/kg)</b>	<0,5	0,5	<0,5	<b>1</b>
<b>DOC (mg/kg)</b>	846	736	2 987,5	<b>500</b>
<b>BTEX (mg/kg)</b>	0	<0,040	0,031	<b>6</b>
<b>PCB (mg/kg)</b>	<0,1	<0,1	<0,1	<b>1</b>
<b>Mineraaliöljy (mg/kg)</b>	<20	<20	<20	<b>500</b>
<b>PAH (mg/kg)</b>	0,302	<0,160	0,16	<b>55</b>
<b>pH (UpH)</b>	8,75	8,7	7,35	<b>&gt;6</b>

Tällä menettelyllä 95,5 % muuten kaatopaikalle menevästä hiekasta voidaan ekologisesti kierrättää.

Haitallisten aineiden huuhtomiseen käytettiin yksinkertaista, vaikkakin hidasta avoimen ilman kompostointityyliä. Valimohiekkaan sekoitettiin myös orgaanista ainetta. Lämpötilaa mitattiin biohajoamisen edistymisen merkinä termoparilla, kosteutta kosteusmittarilla. Hiekkakasasta nousevat kaasut otettiin analysointia varten talteen. Hajoamisprosessin nopeuttamiseksi kasaa hämmennettiin viidentoista päivän välein.

Vihreän hiekan elvyttämiseen ei suositella lämpökäsittelyä, sillä lämpö deaktivoi bentoniitin eli sideaineen, joka vaikeuttaa bentoniitin irrottamista hiekasta. Sideaine ei irtoa hiekanjyvistä ilman mekaanista käsittelyä. Furaanilla sidotut hiekat ovat helpoimpia elvyttää, koska kyseinen seos koostuu kokonaan orgaanisesta aineesta ja palaa tehokkaasti alhaisissakin lämpötiloissa. Lähteen testeissä käytettiin niin sanottua ”alkaline phenolic no-bake” -järjestelmää. Tässä elvytysmetodissa on ongelmana se, että palaessaan sideaineet jättävät jälkeensä emäksisiä suoloja, Busbyn (2005) mukaan nimellisesti esterisuoloja sekä kaliumhydroksidia, jotka voivat aiheuttaa ongelmia elvytysprosessissa sekä hiekan uudelleensitomisessa. Ongelma voidaan ratkaista sekoittamalla hiekkaan suolojen kanssa reagoivaa erikoisnestettä. (Sappinen ym. 2018, 100.)

Käytetyn valimohiekan laatu on erittäin tärkeää selvittää, ennen kuin ryhdytään toimiin sen uudelleenkäytössä eri kohteissa. Käyttämättömänä valimohiekka on yhdenmukaista hienoa materiaalia, mutta käytettynä sisältää metalleja valutyöstä ja suuria määriä muotti- ja keernamateriaalia sisältäen osittain hajonneita sideainejäämiä. Hiekan alkuperä, varasto-olosuhteet, saven määrä ja sihtianalyysi ovat välttämättömiä askelia hiekan kelpoisuuden määrittämiseksi. Messinki- ja pronssivalimoilla hiekka saattaa sisältää suuria konsentraatioita kadmiumia, lyijyä, kuparia, nikkeliä ja sinkkiä. (Anderson 2010, 12.)

Teollisuusjätteiden kiertotaloudellisesta uusiokäytöstä on tehty mittava määrä tutkimuksia. Sopivia materiaaleja ovat esimerkiksi valokaariuunien teräskuona, valimohiekka, lentotuhka, pohjatuhka ja asfalttirouhe. Näitä materiaaleja on onnistuneesti käytetty mineraalitäyteaineena tai lisäaineena asfalttikonkretissa, raepohjissa ja vallien täytössä. (Yazoghli-Marzouk ym. 2013, 70.) Esteenä valimohiekan käyttämisessä teiden rakennusprojekteissa on epävarmuus ympäristövaikutuksista ja vähäinen tieto aiheeseen liittyen. Suuri huoli on pohjavesien puhtaana pitäminen. Eräässä tutkimuksessa valimohiekan läpi huuhdottiin vettä ja veden puhtaus mitattiin. Todettiin, ettei veteen saastunut vaarallisia määriä aineyhdisteitä ja luonnon pohjavesi pysyy puhtaana. (Guney ym. 2005, 944.) Kvartsihiekkä on myöskin vesihakuista, mikä voi johtaa asfaltin vahingoittumiseen kastuessaan. Tartuke-lisäaineilla ongelmaa voidaan välttää.

## 6.2 Hiekan ominaisuuksien määrittäminen

Hiekan ominaisuuksia voidaan määrittää monilla eri tavoilla ja jokaisella toimihenkilöllä on oma tapansa. Yazoghli-Marzoukin ym. (2013, 71) kokeissa sovellettiin seuraavia menetelmiä: rakeisuuden määrittäminen, metyleenisini-koe, Proctor-sullonta ja lujuusominaisuuksien määrittäminen.

- Rakeisuuden määrittäminen
  - Materiaalin pesun jälkeen suoritettava kuivaseulontamenetelmä. Kokeen tavoite on määrittää paakkuuntuneen aineksen massa kokonaismassasta. Analyysissä on monta erilaista seulaa, jonka lävitse ainesta lasketaan. Ainesrae sekoitetaan veteen ja kuivutetaan suodatetaan seulojen lävitse. Seulaa läpäisemätön aines punnitaan ja kokeen lopuksi seulojen suodattama ainesmäärä suhteutetaan kokonaiskuivamassaan.

- Metyleenisini-koe
  - Kokeessa mitataan maaperän tai kivisen materiaalin (hiekkä) metyleenisinin absorptiokapasiteetti. Koe määrittää materiaalin saven määrän. Kokeessa sekoitetaan aines metyleenisiniin ja imeytymisaste kertoo absorptiokapasiteetin.
- Proctor-sullonta
  - Koe maaperän tiivistymisominaisuuksien määrittämiseksi. Koe määrittää optimaalisen kuiva-ainetiheyden ja sitä vastaavan vesipitoisuuden.
- Lujuusominaisuuksien määrittäminen
  - Käytetyn valimohiekan lujuusominaisuuksia voidaan määrittää puristamalla hiekasta tehtyjä 50 x 50 mm näytteitä luhistumiseen saakka. Kokeen puristustuloksista voidaan määrittää hiekan kimmokerroin ja lujuus.

Käytetty valimohiekka on jyväkooltaan tyypillisesti noin 0,6–0,15 mm. Pieni määrä hiekanjyvistä (5–12 %) voi olla 0,075 mm tai sitäkin pienempää. (U.S. Department of Transportation 2008.) Mikronisoimalla hiekanjyvät entistä pienemmiksi voidaan nostattaa massan määrää, joka viedään pohja-aineeksi työmaalle maantäyttöä varten. Liian hieno hiekka ei sovi täyteaineeksi jokaiseen projektiin, kuten esimerkiksi tienrakennukseen. Liian hieno materiaali tekisi tienrakentamisen itsessään haastavaksi, epäluotettavaksi tai mahdottomaksi. Mikäli tavoitteena on vanhojen louhosten täyttö tai kohteena on muu syrjäinen sijainti, joissa ihmis- ja eläinliikennettä ei ole tai esiintyy hyvin vähäisissä määrin, mahdollisimman hieno hiekka on eduksi. Hiekkaa täytyisi myydä edullisemmalla kilohinnalla seuraavalle toimitsijalle, mutta etuna myyjälle tämä pääsee suuremmasta määrästä hiekkaa eroon yhdellä kerralla sen sijaan, että hiekkaa myytäisiin useammassa erässä usealle eri taholle. Valimohiekan mikronisoinnista ei ole tehty paljoa tutkimuksia, jos lainkaan. Hiekan mikronisointi ja tulosten julkaisu olisi tarpeellista jo pelkästään ensimmäisten tulosten määrittämiseksi. Tuloksiin viittaamalla on helpompi lähteä kehittämään jatkosijoituskohteita materiaalille kuin materiaalille.

### 6.3 Asfaltin valmistus

Asfaltti on yhdistelmä materiaali, joka pääosin koostuu vedestä, sementistä ja täyteaineksesta. Täyteaineita ovat esimerkiksi sorahiekka, murskattu kivi,



kuona ja kierrätetty asfaltti. Toivotuista ominaisuuksista riippuen täyteaines kattaa asfalttiseoksesta 60–80 %. Hyvän asfaltin vaatimuksia ovat veden-, pakkasen-, kulumis- ja deformaatiokestävyys, tiivistettävyysominaisuudet, työstettävyys ja yhdenmukaisuus.

Intiassa suoritetuissa kokeissa valmistettiin seitsemän asfalttisekoitusta, joista yksi oli vertailuseos (CM) ilman valimohiekkaa. Asfaltin valmistukseen käytetty hiekka korvattiin käytetyllä valimohiekalla suhteittain painon mukaan. Suhde oli 10–60 % kuuden kappaleen välillä. Koeparametreja ovat laskuvirtaus, tiivistyskerroin ja VeBe-konsistenssi (työstettävyys). Puristuslujuuden määrittämiseen valmistettiin betonikuutioita 150 mm sivuilla ja 150 x 300 mm lieriöitä. Kappaleiden puristuslujuutta mitattiin 28, 90 ja 365 päivän jälkeen valmistuksesta. Vetolujuustestiin valmistettiin vielä erilliset 150 x 300 mm lieriöt; vetolujuus testattiin myös 28, 90 ja 365 päivän jälkeen valmistuksesta. (Siddique ym. 2010, 1917.) Taulukossa 6 on esitetty puristuslujuuden testitulokset.

Taulukko 6. Kuution ja sylinterin puristuslujuudet eri seoksilla (Siddique ym. 2010, 1919)

	Kulunut aika					
	28 päivää		90 päivää		365 päivää	
Seos	Kuutio	Sylinteri	Kuutio	Sylinteri	Kuutio	Sylinteri
CM	36,27	26,35	43,91	30,50	44,42	31,94
F10	31,05	21,87	37,25	26,17	43,09	30,76
F20	32,52	22,68	40,08	28,00	47,08	33,18
F30	38,03	24,94	46,59	30,44	54,15	36,40
F40	36,42	23,58	44,23	29,57	50,12	35,50
F50	37,14	24,17	45,18	29,89	51,71	36,10
F60	29,86	20,73	33,13	25,28	36,19	27,09
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa

Kuutiokappaleissa korvaamalla 30 % betonin valmistukseen käytetystä hiekasta valimohiekalla saavutetaan kaikista kestävin betoniseos. Puristuslujuuden sieto oli vertailuseosta korkeampi kaikkina kolmena mittauspäivänä 30 %, 40 % ja 50 % suhteilla.

Sylinterikappaleilla 28- ja 90-päivän testeissä jokainen kappale oli hiukan perinteistä betoniseosta heikompi pl. 30 % hiekkasuhteella valmistettu kappale, jolla oli vain hieman alhaisempi puristuslujuus kuin vertailuseoksella.

Vuoden jälkeen 20 %, 30 %, 40 % ja 50 % hiekkasuhteella valmistetut kappaleet saavuttivat vertailuseosta huomattavasti lujemmat ominaisuudet. Taulukossa 7 on esitetty vetolujuuskokeiden tulokset.

Taulukko 7. Betoniseosten vetolujuustulokset (Siddique ym. 2010, 1920)

Seos	Kulunut aika		
	28 päivää	90 päivää	365 päivää
CM	2,08	2,66	2,97
F10	1,84	2,35	2,66
F20	1,98	2,54	2,86
F30	2,58	3,33	3,5
F40	2,48	3,26	3,42
F50	2,38	3,19	3,33
F60	1,72	2,16	2,52
	MPa	MPa	MPa

Myös vetolujuudessa 30 % korvaussuhde antoi jokaisena testihetkenä parhaan vetolujuuden. Yli 50 % korvaussuhdetta tulee välttää. Koe myös todensi koekappaleiden hyvän kyvyn vastustaa karbonatisoitumista sekä nopean klooripenetraatiovastustuskyvyn.

Kaurin ym. (2011, 85) tutkimuksessa huomattiin *Aspergillus sp.* -sienen vahvistavan betonin ominaisuuksia. Käsittelemällä käytetty valimohiekka kyseisellä sienellä saavutettiin 15,6 % korkeampi puristuslujuus 28 päivän jälkeen. Koe myös osoitti veden imeytymisen sekä betonin huokoisuuden alenemisen.

Muita sovelluskohteita valimohiekalle ovat lasin, tiilien ja valumuottien hiekkasydänten valmistus, vanhojen kaivantojen täyttö lentotuhkan, sementin ja hiekan sekoituksella. Myös maan pintakerroksena ja värillisenä tiepeitteenä, maan kuohkeuttajana sekä kompostina. Valimot hyötyvät myös taloudellisesti kierrätystoimistaan; käytettyä hiekkaa kierrättävät valimot ovat laskeneet menojaan poistamalla tarpeettomat kuljetuskulut kaatopaikoille. (Siddique ym. 2010, 1917.)

Vihreää hiekkaa (kvartsihiekan, bentoniitin, hiilen ja veden yhdiste) käyttävät valimot tyypillisesti tuottavat enemmän jätehiekkaa hiekkakeernojen käytön johdosta. Tätä vihreää hiekkaa tyypillisesti käytetään kohteissa, joissa valimohiekan savisisältö on eduksi: esimerkiksi tienrakennus ja maakuoppien täyttö.

Hartsipäälysteiset ja keernahiekat sopivat parhaiten sovelluksiin, joissa tarvitaan hienoja lisäaineita: esimerkkinä asfaltin- ja sementinvalmistus. (American Foundry Society 2007.) Joskus käytetyn valimohiekan kierrättäminen voi olla helpommin sanottu kuin tehty. American Foundry Society teetti Pohjois-Amerikassa vuosina 2005–2007 244 valimoa kattaneen kyselyn kierrätystoimiin liittyen. 37 % vastaajista kokivat, ettei lähiseudulla ole tehokasta mahdollisuutta käytetyn hiekan uudelleenkäytölle. 5 % vastaajista ilmoittivat osavaltioiden määräysten tekevän kierrätyksestä byrokraattisesti liian hankalaa tai jopa mahdotonta. Myös pienemmät valimot voivat olla epäedullisessa asemassa, mikäli samalla seudulla on toinen, suurempi valimo täyttämässä käytetyn hiekan vastaanottajien kiintiön.

#### **6.4 Muu kiertotalous**

Käytännössä valimon kiertotaloudellinen toiminta käynnistyy jo siinä vaiheessa, kun muualla epätoivottu jäte, kuten metalliromu, hiekka, vaha, pakkausmateriaalit saapuvat tehdastiloihin. American Foundry Societyn (s.a.) mukaan tarvitaan 95 % vähemmän energiaa metallivalujen luomista varten, kun käytetään kierrätettyä raaka-ainetta. Uusien raaka-aineiden käsittelyyn kuluu huomattavan suuri määrä energiaa ja käytettyjen materiaalien kierrättäminen myös auttaa kaivos- ja jalostustoimintaa laskemalla näiden alojen energiankäyttöä. Toiset valimot ovat onnistuneet muuttumaan täysin jäteväpaiksi tehokkaan jäteveden, jätehiekan yms. kierrätystoiminnan ansiosta, jättäen kaatopaikat ja täyttömaat hieman tyhjemmiksi. Muita kohteita valimon tuottamille sivuvirroille ovat esimerkiksi laastinvalmistuksessa, valutäyttötekniikassa, erikoismaaperän valmistuksessa, putkien perustuksissa ja tiilissä.

### **7 YHTEENVETO**

Opinnäytetyö saavutti tavoitteensa, joka oli energiataseiden määrittely kahteen sähköuuniin ja valimon kiertotaloudellisen toiminnan valaiseminen. Induktiouuniin energiatase määriteltiin hiukan yksinkertaisemmin, kun taas valokaariuuniin muodostettiin tarkat matemaattiset yhtälöt ja tarkasteltiin montaa eri tasekohtaa. Hiekan kiertokulusta, koostumuksesta, käyttötavasta ja uudelleenkäytön haasteista alleviivattiin kaikista merkittävimmät perusasiat. Esimerkkinä esitetyt hiekan ominaisuuksien määrittelytavat ovat hyvä lähtöpiste sille,

joka toivoo osakseen syvempää ymmärrystä ja suuntaa käytetyn hiekan kanssa työskentelyyn asfaltinvalmistuksessa.

Tässä työssä esiintyneistä aiheista jokaisesta pystyisi laajentamaan hyvinkin paljon eteenpäin. Tarkastelun kohteena voisi toimia esimerkiksi tarkempi analyysi valokaariuunin hapettumistuotteiden muodostumisesta, käyttäytymisestä ja vaikutuksesta, tai mitkä tekijät muuttavat uunin hyötysuhdetta ja kuinka paljon eri teräslaatuja valmistettaessa. Näistä aiheista voisi myös johtaa entistä tarkemman katsauksen induktio- ja valokaariuunien erilaisiin käyttökohteisiin, etu- ja varjopuoliin. Materiaalivalinnan saralla sulatettavien materiaalien koostumuksesta ja käyttäytymisestä sulatuksen aikana pystyisi ammentamaan paljon. Ympäristömääräyksiä ja laatuvaatimuksista täytyisi tehdä helppolukuinen datapaketti, jotta kiertotaloudelliseen toiminnan aloittaminen olisi entistä houkuttelevampaa selvyytensä ansiosta. Valimohiekan mikronisoinnin kautta saadut tulokset voisivat tulla maailmanlaajuiseen käyttöön; hyvin dokumentoidut tulokset olisivat ensimmäisiä laatuaan. Myös lisätarkastelua voisi tehdä sulatustapojen kokoamisessa (etenkin sellaisista, joita ei ole vielä kirjattu mihinkään ja ovat ns. perimätietoa) ja yksityiskohtaisempi ohje, miten käytetyn valimohiekan ominaisuuksia voidaan määrittää ja epäpuhtauksia poistaa. Visuaalinen materiaali käytetystä laitteistosta ja materiaaleista tekisi ymmärrettävyydelle huimia harppauksia. Valimoteollisuudessa on oivallettu hyviä kiertotalouden kohteita syntyneille jätteille, mutta suurimmaksi osaksi tehdyt tutkimukset ja kokeilut keskittyvät asfaltin valmistukseen.

Yhtälöitä soveltamalla olisi mahdollista tehdä varsinaisia energiatasetaskelmia oikeassa valimoympäristössä ja raportoida tulokset ylös. Samalla syntyisi yksityiskohtainen raportti tarvittavasta laitteistosta ja mittausmetodeista, kun otetaan selville kuonan lämpötila, hapettumisreaktioiden energia (koksihiili ja metalli), sulan metallin lämpösisältö yms. Yhtälöiden joukosta löytyy termejä, kuten "*eksotermisten reaktioiden energiasumma*", "*hapettumisreaktioiden kemiallinen energia*" ja "*jäähdytyksestä aiheutuvat lämpöhäviöt*", joiden selvittäminen on hankalaa ja olisi suuri etu, jos nämä mittaustavat saataisiin selväkieliseen tekstimuotoon. Sulatustoimiin liittyy myös sähkötekniisiä seikkoja; muun-  
tjassa ja toisiopiirissä menetetään sähköenergiaa.

Uunien tekniikka on optimoitu jo hyvin pitkälle mahdollistaen energiatehokkaan sulatusprosessin. Kuten valokaariuunin energiatehokkuutta tarkasteltaessa todettiin, sähköenergia on vain puolet prosessin kokonaisenergiasta. Energian optimointi suoritetaan suurissa määrin materiaalivalinnoin, materiaalikäsittelyllä ja sulatustapojen asiallisella sopeuttamisella. Parhaiten valokaariuunin hyötysuhdetta pystytään hallitsemaan pitämällä kemiallinen energia mahdollisimman alhaisena. Induktiouunien hyötysuhde liikkuu 70–85 % alueella. Induktiouunin hyötysuhde on selvemmin määriteltävissä ja sen muodostavat komponentit ovat johdonmukaisempia kuin valokaariuuneissa. Johdonmukaisuus saavutetaan sillä, ettei induktiouunisulatus vaadi polttimia tai hiili/happisuihkutusta.

Valimohiekan kierrätystä jarruttaa ja vaikeuttaa aiheen vähäinen tieto ja esillepano. Valimon johto voi olla tietoinen mahdollisista kierrätysmahdollisuuksista, mutta ulkopuoliset tahot taas eivät. Lisähaasteena vielä on vähäinen ja hankalasti löytyvä tieto valimohiekan käsittelemisestä eri projekteja varten, oli hiekka sitten tulossa maan kuohkeuttajaksi, tiepeitteeksi tai asfaltin täyteaineeksi. Muita mielenkiinnon kohteita kiertotalouden kannalta ovat kuona ja suodatinpöly. Kuonaan jää aina vaihteleva määrä metallia ja sen talteenotto voisi suoda valimoille jonkinlaista materiaalieta, mikäli kierrätys pystyttäisiin toteuttamaan taloudellisesti. Kuonan ei myöskään tarvitsisi olla valimolta itsestään lähtöisin. Kuparin kanssa työskentelevät tahot tuottavat paljon kuparipitoista kuonaa ja oikeilla työmetodeilla valimolle voidaan saada edullista raaka-ainetta.

## LÄHTEET

American Foundry Society. 2020. About Metalcasting. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.afsinc.org/about-metalcasting> [viitattu 8.6.2021].

American Foundry Society. 2007. Industry Practices Regarding the Disposal and Beneficial Reuse of Foundry Sand. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.afsinc.org/metalcasting-industry-tools-resources> [23.9.2021].

American Foundry Society s.a. The Foundry Industry, Recycling Yesterday, Today & Tomorrow PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://afsinc.s3.amazonaws.com/Documents/FIRST/recyclingbrochure\\_lr.pdf](https://afsinc.s3.amazonaws.com/Documents/FIRST/recyclingbrochure_lr.pdf) [viitattu 2.10.2021].

Anderson, C. 2010. Recycling of Foundry Sand Through Chemical and Physical Beneficiation. Center for Resource Recovery and Recycling. Inaugural Meeting in Boston 8-9.8. 2010. Researchgate. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.25260.26247> [viitattu 10.6.2021].

Autere, E., Ingman, Y. & Tennilä, P. 1982. Valimotekniikka 1. Helsinki: Insinööri-tieto Oy.

Autio, S. & Päivinen, M. 2019. Maanrakentamiseen kiertotaloutta – valimohiekkaa meluvallirakenteeseen. LAMK Pro 11.4.2019. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.lamkpub.fi/2019/04/11/maanrakentamiseen-kiertotaloutta-valimohiekkaa-meluvallirakenteeseen/> [viitattu 7.8.2021].

Busby, A. 2005. Reclamation of ester-cured phenolic resin bonded foundry sands. U.S Pat. US20070173550A1.

Caballero, P., Villanueva, E., Crespo, I., Tapola, S. 2018. From waste foundry sand to a new biodegraded raw material. Puolan valimoteollisuuskonferenssi 23-27.9.2018. Green Foundry Life. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://greenfoundry-life.com/documentation/dissemination-material/caballero-et-al-2018-from-waste-foundry-sand-to-a-new-biodegraded-raw-material-an-ecological-solution-for-foundries/view> [viitattu 10.6.2021].

Campbell, F. 2013. Metals Fabrication: Understanding the Basics. ASM International.

Dalton, B. 2020. How Carbon Affects the Quality of Steel Weldability and Hardness. *Thermo Fisher Scientific*. Blogi. Päivitetty 18.8.2020. Saatavissa: <https://www.thermofisher.com/blog/metals/how-carbon-affects-the-quality-of-steel-weldability-and-hardness/> [viitattu 27.7.2021].

Foundrybench. Eronen, S., Tapola, M., Svensson, E., Sommarin, P., Helber, J., Piatek, J., Przybylski, J., Caballero, P. & Kemppainen, P. 2012. Improving the energy efficiency of foundries in Europe. PDF-dokumentti. Saatavissa: [http://dokumhane.net/wp-content/uploads/2019/01/foundrybench\\_result-oriented-final-report.pdf](http://dokumhane.net/wp-content/uploads/2019/01/foundrybench_result-oriented-final-report.pdf) [viitattu 10.6.2021].

- Futas, P., Pribulova, A. & Pokusova, M. 2020. Possibilities Reducing of Energy Consumption by Cast Iron Production in Foundry. *Materials Science Forum* 998, 36-41. Verkkolehti. Saatavissa: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.998.36> [viitattu 17.6.2021].
- Government of India. 2017. Promoting Energy Efficiency and Renewable Energy in Selected MSME Clusters in India. Ministry of Power. Bureau of Energy Efficiency. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://beeindia.gov.in/sites/default/files/BOP-Belgaum.pdf> [viitattu 20.6.2021].
- Guney, Y., Aydilek, A. & Demirkan, M. 2006. Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. *Waste management* 26 (9), 931–1068. Verkkolehti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.06.007> [viitattu 10.6.2021].
- Horin, A., Cepisca, C. & Grigorescu, S. 2011. Power Quality and Electrical Arc Furnaces. Târgovişten yliopisto., Bukarestin teknillinen yliopisto. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.5772/15996> [viitattu 6.6.2021].
- Kaur, G., Siddique, R. & Rajor, A. 2012. Properties of concrete containing fungal treated waste foundry sand. *Construction and Building Materials* 29, 82–87. Verkkolehti. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.091> [viitattu 2.11.2021].
- Kempainen, P. 2021. Toimitusjohtaja. Sähköpostiviesti 5.5.2021. Uudenkaupungin Rautavalimo Oy.
- Kimura Foundry Co., Ltd. 2016. Full Mold Casting. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.kimuragrp.co.jp/en/fmc/> [viitattu 23.9.2021].
- Kiscosteel. 2020. Common Misconceptions about Steel made through Arc Furnace Vs Induction Furnace. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.kiscosteel.com/common-misconceptions-about-steel-made-through-arc-furnace-vs-induction-furnace/> [viitattu 20.9.2021].
- Koskinen, P., Silvo, K., Mehtonen, J., Ruoppa, M., Hyytiä, H., Silander, S & Sokka, L. 2005. Esiselvitys tiettyjen haitallisten orgaanisten aineiden päästöistä. Suomen ympäristö 2005: 810. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/40680> [viitattu 7.9.2021].
- Modern Casting. Census of World Casting Production: Total Casting Tons Dip in 2019. WWW-dokumentti: Saatavissa: [http://www.ggdigitalpublishing.com/publication/?i=687958&article\\_id=3844717&view=articleBrowser](http://www.ggdigitalpublishing.com/publication/?i=687958&article_id=3844717&view=articleBrowser) [viitattu 28.7.2021].
- Sappinen, T., Orkas, J. & Kronqvist, T. 2018. Thermal Reclamation of Foundry Sands Using Repurposed Sand Dryer Equipment. *Archives of Foundry Engineering* 18 (4), 99–102. Verkkolehti. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.24425/afe.2018.125176> [viitattu 2.7.2021].
- Siddique, R., Aggarwal, Y., Aggarwal, P., Kadri, E. & Bennacer, R. 2010. Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with

used-foundry sand (UFS). *Construction and Building Materials* 25 (4), 1916–1925. Verkkolehti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.065> [viitattu 27.7.2021].

Svyazhin, A., Kaputkina, L., Bazhenov, V., Skuza, Z., Siwka, E. & Kindop, V. 2015. Phases and defects upon the solidification of nitrogen alloyed stainless steels. *The Physics of Metals and Metallography* 116, 552-561. Verkkolehti. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1134/S0031918X15060095> [viitattu 7.7.2021].

The European Foundry Association. 2020. The European Foundry Industry in 2019. Düsseldorf, Germany: The European Foundry Association, Commission for economics & statistics. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.wko.at/branchen/industrie/metalltechnische-industrie/giesserei/european-foundry-industry-2019.pdf> [viitattu 7.7.2021].

Total Materia. 2007. Hydrogen in Steels. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=206> [viitattu 6.7.2021].

Toulouevski, Y & Zinurov, I. 2010. Innovation in Electric Arc Furnaces: Scientific Basis for Selection. Berliini: Springer-Verlag Berlin Heidelberg

U.S. Department of Transportation. 2008. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/fs1.cfm> [viitattu 1.10.2021].

Valimoteollisuus. 2021. Valutuotanto Suomessa. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/inline-files/1.%20Valutuotanto%20Suomessa%202020.pdf> [viitattu 8.6.2021].

Yazoghli-Marzouk, O., Vulcano-Greullet, N., Cantegrit, L., Friteyre, L. & Julien, A. 2013. Recycling foundry sand in road construction—field assessment. *Construction and Building Materials* 61, 1–360. Verkkolehti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.055> [viitattu 10.6.2021].



## KUVALUETTELO

Kuva 1. Kourumallinen induktiouuni .....	10
Kuva 2. Pystykouru .....	11
Kuva 3. Vaakakouru .....	11
Kuva 4. Vinokouru .....	11
Kuva 5. Kouruton induktiouuni.....	12
Kuva 6. Vaihtovirtavalokaariuunin poikkileikkaus .....	13
Kuva 7. Induktiouunin häviöt .....	17
Kuva 8. Yksityiskohtaisempi induktiouunin tasetilanne.....	18
Kuva 9. Tyypillinen kuonan kerääntymispaikka induktiouuneissa .....	19
Kuva 10. Valokaariuunin eri tasekohtia .....	20
Kuva 11. Kemiallisen energian vaikutus valokaariuunin hyötysuhteeseen .....	26
Kuva 12. Tyypillinen hiekkamuotin valmistusprosessi .....	28

## TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Valuprosessin syötetyn energian komponentit.....	21
Taulukko 2. Valuprosessin lähtevän energian komponentit .....	22
Taulukko 3. Erään käytetyn hiekkakerän fyysisiä ominaisuuksia .....	28
Taulukko 4. Valimohiekan tyypillinen kemiallinen koostumus.....	29
Taulukko 5. Haitta-aineiden esiintyvyys käytetyssä hiekassa.....	30
Taulukko 6. Kuution ja sylinterin puristuslujuudet eri seoksilla .....	33
Taulukko 7. Betoniseosten vetolujuustulokset.....	34