

Miikka Laitinen

**RENGASROUHEEN ENERGIASISÄLLÖN TALTEENSAANNIN
MAKSIMOINTI VKU2:SSA**

**RENGASROUHEEN ENERGIASISÄLLÖN TALTEENSAANNIN
MAKSIMOINTI VKU2:SSA**

Miikka Laitinen
Opinnäytetyö
Kevät 2014
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, energiatekniikan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Miikka Laitinen

Opinnäytetyön nimi: Rengasrouheen energiasisällön talteensaannin maksimointi VKU2:ssa

Työn ohjaajat: Jukka Ylikunnari ja Kimmo Vallo

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2014 Sivumäärä: 46+4 liitettä

Tässä insinööriyössä selvitettiin rengasrouheen sisältämän energian maksimaalista hyödyntämistä Outokummun Tornion tehtaiden terässulaton linjalla 2. Rengasrouheen käytön tarkoituksena on vähentää antrasiitin ja koksen käyttöä valokaariuunin prosessissa. Lisäksi energiasisällön maksimoinnin avulla pyritään vähentämään sähköenergian tarvetta sulatuksessa tai vaihtoehtoisesti lyhentämään sulatusaikaa.

Energiasisällön maksimointia selvitettiin teorian ja testijaksojen tulosten avulla. Rengasrouhetta on käytetty valokaariuunin raaka-aineena jo useita vuosia ulkomailla, ja nyt sen käyttöä on kokeiltu myös terässulaton linjalla 2. Testijaksoja suoritettiin kaksi, joista ensimmäinen kesällä 2013 ja toinen talvella 2013. Ensimmäinen testijakso oli suoritettu ennen tämän opinnäytetyön aloitusta, mutta sen tulokset olivat käytettävissä.

Testijaksojen tuloksia vertailtiin satunnaisten vertailutulosten avulla ja lisäksi tutkittiin rengasrouheen vaikutuksia prosessin energiataseeseen ja verrattiin saatuja tuloksia aiemmin laskettuihin taselaskelmiin. Saatujen tulosten perusteella selvitettiin teoreettisesti mahdollisia ratkaisuja prosessin hyötysuhteen parantamiseksi. Energiataselaskennassa hyödynnettiin aiempia tutkimuksia, jotka päivitettiin vastamaan nykyistä prosessia.

Työssä kehitettiin useita mahdollisia energian käyttömahdollisuuksia, jotka kaikki poikkesivat toisistaan toteutustapansa mukaan. Lisäksi ratkaisut järjestettiin mahdollisimman todennäköiseen toteutusjärjestelykseen. Parhaimpana ja kannattavimpana ratkaisuna päädyttiin jälkipolttojärjestelmään, jonka avulla on mahdollista vähentää sähköenergian kulutusta tai nopeuttaa sulatusprosessia. Järjestelmälle tehtiin hyötylaskelmat, joiden perusteella voidaan suunnitella ja perustella mahdollista investointia.

Asiasanat: rengasrouhe, valokaariuuni, energia, kierrätys, energiatase, jälkipoltto, post combustion

ALKULAUSE

Opinnäytetyö on ollut erittäin opettavainen ja haastava prosessi, joka on vaatinut paljon perehtymistä valokaariuunin prosessiin. Työn aikana olen tavannut uusia henkilöitä ja oppinut paljon uutta, ja tiedän siitä olevan hyötyä tulevaisuuden työtehtävissä. Työn, opiskelun ja opinnäytetyön sovittaminen yhteen on ollut aikataulujen kannalta erittäin hankalaa, mutta silti kulunut puoli vuotta on ollut hienoa aikaa.

Haluan kiittää terässulaton kehitysinsinööri Kimmo Valloa mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta ja esimiehiäni, käyttöinsinöörejä Jari Lallia ja Heikki Nikkasta mahdollisuudesta seurata teräksen valmistusta sen alkulähteillä. Iso kiitos kuuluu myös kaikille muille raaka-aineosaston henkilöille hyvästä vastaanotosta työporukkaan. Lisäksi haluan kiittää VKU2-prosessipaikan työntekijöitä hyvistä ideoista rengasrouheen hyödyntämisen suhteen. Suuret kiitokset myös Oulun ammattikorkeakoulun lehtoreille Tuija Juntuselle ja Jukka Ylikunnarille työni ohjauksesta.

Viimeisenä haluan kiittää rakasta avopuolisoani Jennaa, että olet jaksanut patistaa minua eteenpäin opiskelujen suorittamisessa ja opinnäytetyön tekemisen suhteen. Lisäksi olet vaikeina hetkinä auttanut minua pysymään positiivisena ja jaksamaan kiireisessä arjessa eteenpäin.

Oulussa 28.5.2014

Miikka Laitinen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
SANASTO	7
1 JOHDANTO	8
2 OUTOKUMPU	9
2.1 Outokumpu Tornio Works	9
2.2 Terässulatto	9
2.3 Valokaariuunin historia	10
3 RENGASROUHE	12
3.1 Koostumus ja energiasisältö	12
3.2 Käyttötarkoitus	13
3.3 Kannattavuus ja riskianalyysi	13
3.3.1 Hyödyt	13
3.3.2 Riskit	14
3.3.3 Ympäristövaikutukset	14
4 VALOKAARIUUNI 2	15
4.1 Energiatase	15
4.2 Energialähteet	17
4.2.1 Sähköenergia	17
4.2.2 Kemiallinen energia	17
4.3 Teräkseen sitoutunut hyötyenergia	18
4.4 Energiahäviöt	19
4.4.1 Savukaasut	19
4.4.2 Kuona	20
4.4.3 Jäähdytysvedet	21
4.4.4 Säteilähäviöt ja vuorauksen lämpösisältö	21
4.4.5 Sähkönsiirron häviöenergia, elektrodien lämpösisältö ja erotus	22
5 RENGASROUHEEN KÄYTTÖ VALOKAARIUUNISSA	24
5.1 Kemiallinen prosessi	24
5.2 Vaikutus sähkön kulutukseen	24

5.3 Testijaksot	24
5.3.1 Ensimmäinen testijakso	24
5.3.2 Toinen testijakso	25
5.4 Rengasrouheen vaikutus prosessiin	25
5.5 Sulatus 31662	27
5.5.1 Sisään menevä energia	27
5.5.2 Savukaasuhäviöt	28
5.5.3 Kuonan sulattamiseen ja kuonaan sitoutuva energia	29
5.5.4 Jäähdytysvedet	30
5.5.5 Säteilähäviöt	31
5.5.6 Sähkönsiirto häviö ja elektrodien lämpösisältö	32
5.5.7 Muut energiahäviöt	33
5.5.8 Energiatase	33
6 KEHITYSMAHDOLLISUUDET	35
6.1 Post Combustion	35
6.1.1 Happipuhallus	35
6.1.2 Kaasupolttimet	39
6.2 Uunin ulkoiset hyödyntämiskohteet	39
6.2.1 Romukorien lämmitys ja kuivaus	39
6.2.2 Siilojen ja seosainehallin lämmittäminen	40
6.3 Jatkuva panostus	40
6.3.1 Tarvittavat muutokset ja vaikutukset	40
6.3.2 Järjestelmän heikkoudet	41
7 YHTEENVETO	42
LÄHTEET	44
LIITTEET	
Liite 1 Lähtötietomuistio	
Liite 2 Sulatuksen 31662 tiedot ja raaka-aineanalyysit	
Liite 3 Sulatuksen 31662 energiatase	
Liite 4 Post Combustion	

SANASTO

AOD – Argon Oxygen Decarburization

CRK – ferrokromikonvertteri

FeCr - ferrokromi

HC52 – korkeahiilinen ferrokromi

KAMU – kalkkimurske

kJ = kilojoule

JVK – jatkuvavalukone

kWh – kilowattitunti

RORO – ruostumaton ostoromu

SA – senkka-asema tai senkka käsittely

TIMU - tiilimurske

VKU – valokaariuuni

1 JOHDANTO

Tämän insinööriyön tavoitteena on selvittää mahdollisuuksia rengasrouheen energiasisällön talteensaannin maksimointiin, käyttömäärän suurentamiseen ja sulatusajan lyhentämiseen. Työn tarkoituksena on selvittää teoriassa rengasrouheen käyttömäärän kasvattamisen mahdollistavia tekijöitä. Pääpainona työssä keskitytään rengasrouheen energiaominaisuuksiin ja sen vaikutuksiin sulatusprosessin energiataseeseen. Työn tarkat tavoitteet näkyvät liitteestä 1.

Rengasrouhetta on käytetty ulkomailla valokaariuunin raaka-aineena vuosia, mutta Outokummun Tornion tehtailla sen käyttöä on vain testattu. Rouheen käytön tarkoituksena on korvata tai ainakin vähentää hiilimateriaalien, antrasiitin ja koksen käyttöä valokaariuunin prosessissa. Mahdollisella täydellisellä korvaamisella on niin taloudellisia kuin tehokkuuteenkin vaikuttavia hyötyjä.

Rengasrouheen käyttömäärän nostamiseen käytettävien menetelmien on tärkeää olla yksinkertaisia ja varmatoimisia, sillä näin mahdolliset prosessiin tehtävät muutokset on helpompi ja halvempi toteuttaa eikä ylimääräisiä prosessihäiriöitä syntyisi. Mahdollisten suurempien investointien kanssa täytyy muistaa kustannuslaskelmat ja prosessiin saatavan hyödyn suhde investointiin.

2 OUTOKUMPU

Outokumpu Oyj on alansa markkinajohtaja ruostumattoman teräksen valmistuksessa. Outokumpu työllistää lähes 12 000 henkilöä ympäri maailmaa. Yhtiön pääkonttori sijaitsee Espoossa, ja se on listattuna Helsingin pörssissä. (1.)

2.1 Outokumpu Tornio Works

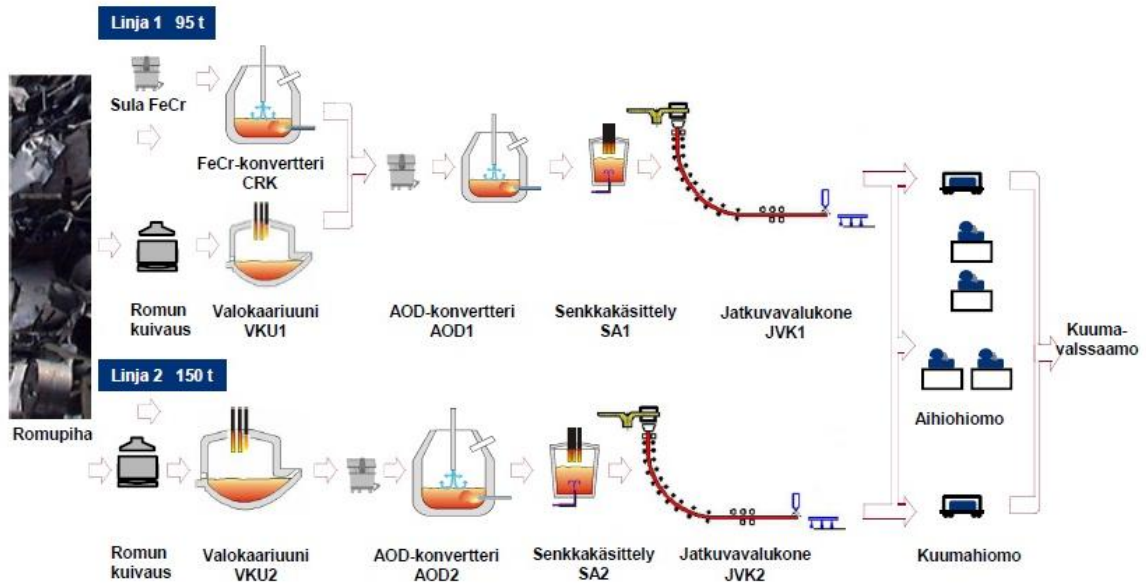
Tornion terästehdas on maailman suurin yhtenäinen teräksen valmistusyksikkö, jonka kustannustehokkuus perustuu täysin integroituun ja ainutkertaiseen tuotantoketjuun, johon kuuluvat neljä perusosaa: Kemissä sijaitseva kromikaivos, ferrokromitehdas, terästehdas ja Terneuzenin jatkokäsittelylaitos (2).

Terästehtaan tuotantoketjuun kuuluvat terässulatto, kuumavalssaamo ja kylmävalssaamot. Tuotteet kuljetetaan Röyttän sataman kautta Terneuzeniin, jossa ne leikataan asiakkaan haluamiin mittoihin. (2.)

2.2 Terässulatto

Tornion terästehtaan terässulattolla on kaksi tuotantolinjaa, joista linja 1 on aloittanut tuotannon vuonna 1976 ja linja kaksi 2002. Linjat koostuvat useista eri tuotantoprosesseista, jotka näkyvät kuvassa 1. (3.) Linja 1 on kooltaan pienempi, 95 tn, ja uudempi linja kooltaan 150 tn.

Terässulaton tuotantokaavio



KUVA 1. Terässulaton tuotantokaavio (3)

Terässulaton perusraaka-aineet ovat ferrokromi, nikkeli ja teräsromu. Linja 1 käyttää prosessiin hyödyksi ferrokromitehtaalta saatavaa sulaa ferrokromia, jolloin osa sähköenergiasta saadaan korvattua kemiallisella energialla. Linjalla 2 valokaariuunin panos koostuu teräsromusta, kromista ja nikkelistä. (3.)

Valokaariuunissa teräsromu sulatetaan sähköän avulla, minkä jälkeen sula siirretään siirtosenkassa AOD-konvertterille. AOD-prosessin tarkoituksena on pienentää hiilipitoisuus happi- ja inerttikaasuja käyttämällä. Lisäksi AOD-käsittelyssä lisätään tarvittavat seosaineet. Senkkäkäsittelyssä sula viimeistellään säätämällä koostumus ja lämpötila valua varten. Tämän jälkeen sula vaeletaan jatkuvavalukoneella aihioiksi, jotka jatkavat matkaansa hiomon kautta kohti kuumavalssaamaa. (3.)

2.3 Valokaariuunin historia

Valokaariuuni on vanhin unityyppi, jonka perusrakenteen on keksinyt ranskalainen Heroult viime vuosisadan loppupuoliskolla. Valokaariuunissa sulatus tapahtuu sähköenergian avulla. Valokaariuunin panos koostuu teräsromusta,

seosaineista ja kuona- ja suoja-aineista. Panos sulatetaan kolmen grafiittielektrodin avulla. (4, s. 1.)

Uunissa on matala teräslieriö, joka on massattu tulenkestävällä massalla. Uunissa olevat päätypinnat ovat muodoltaan kuperat. Lisäksi uunissa on holvi eli katto, joka nostetaan sivuun panostuksen aikana. Uuni on ulkomuodoltaan kehittomainen, mikä mahdollistaa sulan teräksen ja kuonan kaadon kuljetusastioihin. (4, s. 2.)

Prosessin aikana muodostuu paljon savukaasuja, minkä vuoksi tarvitaan huipputehoinen savukaasulaitteisto. Savukaasut puhdistetaan ja mahdollisuuksien mukaan ne pyritään käyttämään hyödyksi. (4, s. 4.)

Terässulaton linjan 2 valokaariuuni on otettu käyttöön vuonna 2002. Uuni on halkaisijaltaan 8 160 mm ja tilavuudeltaan 200 m³. Uunin panospaino on 140 tonnia ja itse uuni on painoltaan 250 tonnia. Uunin kolme elektrodia ovat halkaisijaltaan 710 mm.

3 RENGASROUHE

Järjestelmällinen renkaiden kierrätys aloitettiin Suomessa vuonna 1996. Tämä on seurausta valtioneuvoston päätöksestä, jonka mukaan renkaiden kierrättäminen hyötykäyttöön on renkaan tuottajan vastuulla. Vuoteen 2000 mennessä 90 % käytöstä poistetuista renkaista täytyi olla kierrätettynä. Rengasalan toimijat perustivat vuonna 1995 Rengaskierrätys Oy:n ja nykyisin kierrätystoiminnasta vastaa Kuusakoski Oy. (5, s. 4.)

Kierrätetyistä renkaista on mahdollista valmistaa erilaisia tuotteita, joita voidaan käyttää esimerkiksi meluvälleissa ja kaatopaikkojen rakenteissa. Renkaille ja rengasrouheelle kehitellään jatkuvasti uusia hyödyntämisvaihtoehtoja, joihin myös käyttäminen VKU2:lla perustuu. (5, s. 4.)

Käytettyjen renkaiden mahdollisuutta teräksen valmistuksessa on tutkittu jo useita vuosia ympäri maailmaa. Suuret teollisuusmaat Yhdysvallat, Japani ja Ranska ovat olleet edelläkävijöitä renkaiden kierrätyksessä. Lisäksi myös Iranissa renkaita on käytetty valokaariuunin prosessissa jo vuosia. Vuonna 2005 Yhdysvalloissa käytettiin 18 880 tonnia käytettyjä renkaita valokaariuunissa. (6, s. 1 - 2.)

3.1 Koostumus ja energiasisältö

Rengasrouhe koostuu pääasiassa hiilestä, jota on 86,85 % kumimateriaalin painosta. Lisäksi renkaissa on rautalankavahvikkeet, joita on noin 15 % koko renkaan painosta. Rengasrouheen kalorimetrinen lämpöarvo on 37,63 MJ/kg, kun kosteus on 0,5 %. Energiatiheys on 10,02 MWh/t. (7, s. 1.)

Haitta-ainepitoisuudet rengasrouheessa ovat melko pienet, jos ei huomioida sinkkiä, jota on 14 000 mg/kg ka. (6.) Sinkkiä on noin 1,4 % jokaista rengasrouhetonnia kohden ja rengasrouheen käyttö lisää letkusuodinpölyjen sinkkisisältöä, mutta pölyt käsitellään Befesa Scandustin prosessissa, jossa sinkkirikas pöly hyödynnetään sinkin valmistuksessa. (8, s. 4.)

3.2 Käyttötarkoitus

Rengasrouheen käytön tarkoituksena on korvata tai vähentää VKU2:n prosessissa koksista ja antrasiitista saatavaa hiiltä. Hiili on merkittävä komponentti teräksen valmistuksessa ja sillä on iso rooli valokaariuunin prosessissa ja energiatehokkuudessa.

3.3 Kannattavuus ja riskianalyysi

Käytettyjen renkaiden käytöllä valokaariuunissa on lukuisia positiivisia vaikutuksia prosessiin, mutta sen käytössä on myös omat riskinsä. Rengasrouhe luokitellaan tällä hetkellä jätteeksi, mikä vaikeuttaa sen testausta. (9.) Rouhe on kierätysmateriaali ja koksi ja antrasiitti ovat puhtaita raaka-aineita.

3.3.1 Hyödyt

Rengasrouheen käytöllä on monia käytön lisäystä puoltavia seikkoja, joihin voidaan lukea esimerkiksi hinta ja lähes rajaton saatavuus. Verratessa antrasiitin, koksen ja rengasrouheen hintoja niin voidaan huomata rengasrouheen käytön kannattavuus. Lisäksi 15 prosenttia rengasrouheen painosta on rautaa, jonka tonnihinta on noin 300 €, joten jokaisesta rengasrouhetonnista saadaan noin 50 euron edestä rautaa. Raaka-aineiden suuret hintasuhteet on nähtävissä taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Raaka-aineiden hinnat suhteessa koksiin (9)

Raaka-aine	Hinta suhteessa koksiin
Antrasiitti	0,5
Koksi	1
Rengasrouhe	0,05

Rengasrouheen palamisessa syntyy paljon kemiallista energiaa, jonka avulla valokaariuunissa käytettävää sähköenergian käyttöä voidaan pienentää tai sulatusaikaa voidaan mahdollisesti nopeuttaa (9). Rouheen saatavuus voidaan to-

deta lähes rajattomaksi, sillä pitkien ajomatkojen Suomessa käytettyjä autonrenkaita syntyy paljon ja kuten aiemmin todettiin, niiden kierrätys on lakisääteistä.

3.3.2 Riskit

Rengasrouheen käytössä on myös riskinsä, joista suurimmaksi voidaan luokitella savukaasujen lämpötilan liiallinen nousu, joka voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa koko linjan pysähtymisen. Savukaasujen liiallinen nousu voidaan estää, mikäli rengasrouheen palamisesta syntyvä energia saadaan hyödynnettyä teräsromun sulatukseen. (9.) Savukaasujen lämpötilan noustessa myös prosessin hyötysuhde pienenee ja rengasrouheen käytöstä saatava mahdollinen hyöty häviää.

3.3.3 Ympäristövaikutukset

Rengasrouheen käytön ympäristövaikutuksia on tutkittu ulkomailla jo useita vuosia. Näiden tutkimusten perusteella voidaan todeta rengasrouheen käytön vaikuttavan positiivisesti ympäristöön. (6, s. 62.)

Rengasrouheen klooripitoisuus on häviävän pieni ja dioksiinipäästöjen syntyminen korkeissa lämpötiloissa on vähäinen. Prosessin alkuvaiheessa dioksiinipitoisuudet ovat korkeampia, mutta ne laskevat prosessin lämpötilan kasvaessa. Renkaiden kierrätys valokaariuunissa on huomattavasti ympäristöystävällisempi tapa kuin niiden varastointi kaatopaikoilla, joissa ne voivat pahimmassa tapauksessa palavat hallitsemattomasti päästäen ilmaan ilmakehää vaurioittavia kaasuja. (6. s. 2.)

4 VALOKAARIUUNI 2

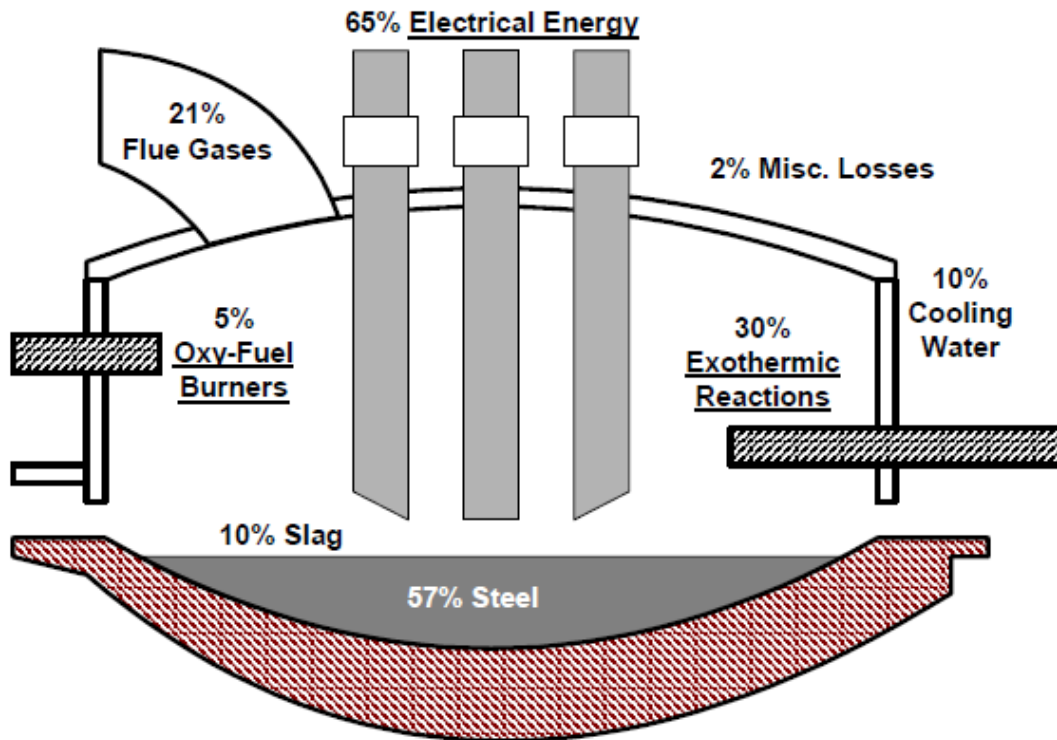
Teräsulaton linjan 2 valokaariuunin panos koostuu teräsromusta, jonka lisäksi uuniin lisätään kromia, pelkistimiä ja kuona-aineita. Valokaariuunin energia on kahdessa muodossa, sähköenergiana ja kemiallisena energiana.

4.1 Energiatase

Energiataseen perustana toimii termodynamiikan ensimmäinen laki eli energian häviämättömyyden laki, joka on nähtävissä kaavassa 1 (10, s. 45; 11).

energia, sisään = hyötyenergia + energiahäviöt *KAAVA 1*

Sisään menevä energia syntyy elektrodien kautta valokaareksi muutettavasta sähköenergiasta ja valokaariuunissa palavista raaka-aineista syntyvästä kemiallisesta energiasta. Lisäksi on mahdollista käyttää happi-kaasupolttimia, jotka vähentävät sähköenergian osuutta. Hyötyenergiaksi lasketaan se energia, joka on saatu käytettyä teräksen valmistukseen. Lämpöhäviöt koostuvat monista erilaisista tekijöistä. Valokaariuunin energiatase nähdään kuvasta 2. (12, s. 1 - 6.)



KUVA 2. Valokaariuunin energiataseesta (12)

Kuten kuvasta 2 nähdään, saadaan sisään menevästä energiasta hyödynnettyä teräksen sulatukseen, noin 57 %. Jäljelle jäävä osuus 43 % jakautuu kuonaan, savukaasuihin, jäähdytysvesiin ja säteilyyn holvin kautta. (12, s. 2.)

Kaavan 1 ja kuvan 2 perusteella voidaan seuraava energiataseen kaava 2.

$$E_{koko} = \eta_{sähkö} * E_{sähkö} + \Sigma E_{kemial}$$

KAAVA 2

E_{koko} = valokaariuunin kokonaisenergia [kWh]

$\eta_{sähkö}$ = korkeajännitejärjestelmän hyötysuhde

$E_{sähkö}$ = valokaariuunin käyttämä sähköenergia

ΣE_{kemial} = kemiallisen energian summa

Kaavasta 2 voidaan johtaa kaava 3, jossa nähdään yksityiskohtaisempi energioiden jakautuminen prosessissa (10, s. 45).

$$E_{koko} = E_{teräs} + E_{kuona} + E_{savukaasu} + E_{jäähdytys} + E_{muut}$$

KAAVA 3

E_{koko} = valokaariuunin kokonaisenergia [kWh]

$E_{\text{teräs}}$ = teräkseen sitoutunut energia

E_{kuona} = kuonaan sitoutunut energia

$E_{\text{savukaasu}}$ = savukaasuihin sitoutunut energia

$E_{\text{jäähdytys}}$ = jäähdytysjärjestelmään sitoutunut energia

E_{muut} = muut energiahäviöt

Valokaariuunin energiataseessa voidaan ottaa huomioon myös mahdolliset kaasupolttimet, jälkipolttajärjestelmät ja sulan panostusmenetelmät, mutta näitä ei tällä hetkellä ole käytössä terässulaton linjalla 2. Terässulaton linjalla 1 käytetään ferrokromikonvertterilta saatavaa sulaa ferrokromia, joten linjojen energiataseet eivät ole verrattavissa keskenään.

4.2 Energialähteet

Aiemmin on jo todettu VKU2-prosessin sisään menevien energioiden koostuvan joko sähkö- tai kemiallisesta energiasta. Jokaiseen sulatukseen kulutettu sähköenergian määrä saadaan tuotannonhallintaohjelman kautta ja kemiallinen energia saadaan selville uuniin panostettujen materiaalien kautta.

4.2.1 Sähköenergia

Sähköenergian määrä sulatuksissa on keskimäärin noin 60–70 MWh jokaista sulatusta kohden. Loput sulatukseen tarvittavasta energiasta saadaan kemiallisena energiana. (9.)

4.2.2 Kemiallinen energia

Kemiallinen energia syntyy esimerkiksi hiilen hapettumisessa. Hiili toimii prosessissa pelkistimenä ja suojaa arvokkaita raaka-aineita, kuten kromia ja rautaa. Hiili hapettuu prosessissa joko hiilidioksidiksi (CO_2) tai hiilimonoksidiksi (CO). Lisäksi kemiallista energiaa saadaan piin, alumiinin ja mangaanin hapettumisessa. Myös osa arvokkaista raudasta ja kromista hapettuu prosessissa. Edellä mainituissa reaktioissa vapautuvat energiat on nähtävissä taulukossa 2. (13, s. 4.)

TAULUKKO 2. Valokaariuunin prosessissa tapahtuvat hapettumisreaktiot (13)

reaction				energy of the reaction	
2 Al	+	1.5 O ₂	→	Al ₂ O ₃	- 8.61 kWh/kg _{Al} -13.86 kWh/m ³ O ₂
Si	+	O ₂	→	SiO ₂	- 8.70 kWh/kg _{Si} -10.92 kWh/m ³ O ₂
Mn	+	0.5 O ₂	→	MnO	-1.95 kWh/kg _{Mn} -9.56 kWh/m ³ O ₂
2 Cr	+	1.5 O ₂	→	Cr ₂ O ₃	-3.05 kWh/kg _{Cr} -9.44 kWh/m ³ O ₂
S	+	O ₂	→	SO ₂	-2.75 kWh/kg _S -3.94 kWh/m ³ O ₂
2 Fe	+	1.5 O ₂	→	Fe ₂ O ₃	- 2.03 kWh/kg _{Fe} -4.74 kWh/m ³ O ₂
Fe	+	0.5 O ₂	→	FeO	- 1.32 kWh/kg _{Fe} -6.58 kWh/m ³ O ₂
C	+	O ₂	→	CO ₂	- 9.10 kWh/kg _C -4.88 kWh/m ³ O ₂
C	+	0.5 O ₂	→	CO	- 2.55 kWh/kg _C -2.73 kWh/m ³ O ₂
CO	+	0.5 O ₂	→	CO ₂	- 2.81 kWh/kg _{CO} -7.02 kWh/m ³ O ₂

Hapettumisreaktion lisäksi kemiallista energiaa saadaan myös hiilen palamisesta. Hiiltä palaa niin hiilidioksidiksi (CO₂) kuin hiilimonoksidiksi (CO). Hiiltä palaa sulatuksen aikana CO₂-kaasuksi noin 6,2 kg jokaista minuuttia kohden ja CO-kaasuksi 0,6 kg minuuttia kohden. (10.) CO₂ ja CO-kaasujen palamisessa syntyvä energia voidaan laskea taulukon 2 tietojen perusteella.

4.3 Teräkseen sitoutunut hyötyenergia

Aiemmin todettiin teräkseen sitoutuvan noin 57 % koko sulatuksen energiasta. Tätä kutsutaan hyötyenergiaksi ja sen perusteella voidaan määrittää prosessin tehokkuus. Tässä opinnäytetyössä hyötyenergian laskennassa käytetään hyväksi VKU2:lle aiemmin laskettua energiatasetta, josta saadaan teräksen pääraaka-aineille energia jokaista kiloa kohden (10, s. 79). Tämän lisäksi tarvitaan sulatuksen perustiedot, jotka saadaan suoraan terässulaton tuotantohjelmasta. Edellä mainittujen tietojen perusteella saadaan kaava 4.

$$E_{\text{teräs}} = \sum [m_{\text{kaato}} * m\%_i * h_i] \quad \text{KAAVA 4}$$

$E_{\text{teräs}}$ = hyötyenergia [kWh]

m_{kaato} = sulatuksen kaatopaino [kg]

$m\%_i$ = sulatusanalyysin perusteella saatava komponentin osuus [%]

h_i = komponentin entalpia [kWh/kg]

Tuotanto-ohjelmasta saadaan suoraan tiedot sulatuksen saannista, sulan teräksen painosta, lämpötilasta ja sulatuksen analyysistä, jolloin teräkseen sitoutunut energia on helposti laskettavissa.

4.4 Energiahäviöt

Valokaariuunin prosessissa poistuu energiaa useissa eri muodoissa. Kuvasta 2 nähdään, että suurimmat energiahäviöt tapahtuvat savukaasukanavan kautta. Lisäksi häviöitä syntyy säteilystä, kuonasta, jäähdytysvesistä ja muista lämpöhäviöistä. (12, s. 2.)

4.4.1 Savukaasut

Suurimmat lämpöhäviöt syntyvät savukaasuista, joiden lämpötila vesijäähdytetyn savukaasukanavan jälkeen, on sulatuksen aikana jopa yli 600 °C. Täältä kaasut jatkavat matkansa jäähdystorneilta savukaasulaitokselle, jonne tulevan savukaasun lämpötila voi olla maksimissaan 120 celsiusastetta, jotta suodatinlaitoksen toiminta on mahdollista. Mahdollisia ylityksiä säätelee lämpötilaohjattu venttiili, joka tarvittaessa jäähdyttää savukaasuja ulkoilmalla, mikäli lämpötila on liian korkea. (9, 14.)

Tarkkailtaessa lämpötiloja uunin ja suodatinlaitoksen välillä, voidaan todeta lämpöhäviöiden määrän olevan suuri ja tämä heikentää prosessin hyötysuhdetta. Lämpötilaa nostavat savukaasuissa olevat hiilimonoksidi ja vety, jotka pyritään polttamaan pois ennen jäähdytettyä savukaasukanavaa tai viimeistään kanavan lopussa. Yksi tämän opinnäytetyön tarkoituksista onkin etsiä ratkaisuja hiilimonoksidin parempaan hyötykäyttöön uunissa. (9, 14.)

Savukaasuissa prosessissa poistuva energia riippuu savukaasujen virtauksesta, koostumuksesta ja lämpötilasta. Savukaasuissa poistuvat energia voidaan laskea edellä mainittujen tekijöiden ollessa tiedossa. Savukaasujen mukana poistuva häviöenergia voidaan laskea kaavalla 5. (10, s. 50.)

$$E_{\text{savukaasu}} = \sum_i \left[\frac{h_i}{M_i \cdot 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}} * q_{mi} * t \right] \quad \text{KAAVA 5}$$

h_i = savukaasukomponentin entalpia [kJ/kmol]

M_i = komponentin moolimassa [kg/kmol]

q_{mi} = komponentin massavirta [kg/min]

t = sulatusaika [min]

4.4.2 Kuona

Kuten aiemmin todettiin, noin 10 % sulatukseen käytetystä energiasta sitoutuu kuonaan (12.). Kuonanmuodostajina toimivat yleensä poltettu kalkki CaO ja magnesia MgO. Kuonanmuodostajien entalpiat 1 600 °C lämpötilassa on nähtävissä taulukossa 3. (10, s. 49.)

TAULUKKO 3. Kuonanmuodostajien entalpiat (10)

Kuonanmuodostaja	Entalpia (kWh/t kuonanmuodostaja)
CaO	416
MgO	550

Kuonanmuodostajien sulattamiseen tarvittavaa energiaa laskettaessa, täytyy ottaa huomioon niiden saanti ja panostustapa. Kuonanmuodostajien panostus tapahtuu tiilimurskeen (TIMU) ja kalkkimurskeen (KAMU) muodossa. Kuonan sulattamiseen käytettävän energian määrä saadaan laskettua kaavalla 6. (10, s. 49.)

$$E_{Kuona} = \sum [m_i * h_i]$$

KAAVA 6

h_i = kuonanmuodostajan entalpia [kWh/t]

m_i = kuonanmuodostajan määrä [t]

Lisäksi tarvitaan kuonanmuodostajien saanti ja materiaalisältö jokaista panostettua tonnia kohden. Ne saadaan suoraan terässulaton panoslaskentaohjelman kautta, jonka jälkeen kaavalla 7 saadaan laskettua kuonan sulatukseen tarvittu energia.

$$m_i = \sum [m_{\text{panostettu}} * x * m\%_i]$$

KAAVA 7

$m_{\text{panostettu}}$ = prosessiin panostetun kuonanmuodostajan määrä [kg]

x = saanti

$m\%_i$ = materiaalisäältö

Kuonan sulattamisen tarvittavan energian lisäksi kuonaan sitoutuu energiaa sulatukseen jälkeen. Kuonaan sitoutunut energia saadaan laskettua samantyyppisesti kuin teräksen hyötyenergia, kun sulatuksen kuona-analyysi on saatavilla.

4.4.3 Jäähdytysvedet

Prosessin lämpötilojen stabiloimiseksi käytetään vesijäähdytystä holvin ja uunin ympärillä. Uunin ja holvin jäähdyttämiseen käytettävä energia saadaan laskettua kaavalla 8. (10, s. 51; 15.)

$$E_{\text{jäähdytys}} = \frac{c_{\text{vesi}} * \rho * q_v * (T_1 - T_0)}{3600} * \frac{t}{60 \text{ min}}$$

KAAVA 8

ρ = veden tiheys [kg/m³]

q_v = jäähdytysveden tilavuusvirta [m³/h]

T_0 = veden lämpötila syöttölinjassa [°C]

T_1 = veden lämpötila paluulinjassa [°C]

c_{vesi} = ominaislämpökapasiteetti [kJ/K*kg]

t = "Tehot päällä" -aika [min]

4.4.4 Säteilöhäviöt ja vuorauksen lämpösisäلت

Valokaariuunissa säteilöhäviöitä syntyy koko prosessin ajan uunin pintojen kautta, minkä lisäksi kahden korin sulatuksissa lämpöhäviöitä myös syntyy holvin avaamisen yhteydessä, mikä saadaan laskettua kaavalla 9 (10, s. 52).

$$E_{\text{säteily-avaus}} = [\varepsilon \sigma (T_{\text{panos}}^4 - T_{\text{ympäristö}}^4)] * A_{\text{uuni}}$$

KAAVA 9

ε = pinnan emissiokykykerroin

$\sigma = \text{Stefan-Boltzmannin vakio} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/(m}^2\text{*K}^4\text{)]}$

$T_{\text{panos}} = \text{valokaariuunin sisällä olevan panoksen lämpötila [K]}$

$T_{\text{säteily}} = \text{valokaariuunin ympäristön lämpötila [K]}$

$A_{\text{uuni}} = \text{uunin sisäpinta-ala [m}^2\text{]} = \pi \cdot r^2$

$r = \text{uunin sisäsäde} = 3,5 \text{ m}$

Kahden korin sulatuksissa uunin holvi avataan kaksi kertaa ja on avoinna viisi minuuttia. Ensimmäisen korin panostuksen aikana voidaan uunin olettaa olevan 1 600 °C ja toisen korin panostuksessa 1 000 °C. (10, s. 86.)

Sulatuksen aikana lämmönsiirtoa tapahtuu myös uunin pohjan, vaipan ja holvin läpi. Uunin ulkosäde on 4 metriä ja korkeus on 6 metriä. Uuni voidaan olettaa säännöllisen lieriön muotoiseksi, jolloin läpi siirtyvä energia saadaan laskettua kaavalla 10. (10, s. 88.)

$$E_{\text{säteily-pinta}} = A \cdot h [T_{\text{pinta}} - T_{\text{ympistö}}] * \frac{t}{60 \frac{\text{min}}{\text{h}} * 1\,000 \frac{\text{W}}{\text{kW}}} \quad \text{KAAVA 10}$$

$A = \text{uunin ulkopinta-ala (pohja + seinä + holvi)}$

$h = \text{lämmönsiirtokerroin} = 15 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$

$T_{\text{pinta}} = \text{uunin ulkolämpötila}$

$T_{\text{ympäristö}} = \text{ympäristön pinta-ala}$

$t = \text{"tehot päällä" -aika [min]}$

Uunissa oleva vuoraus kerää itseensä tietyn suuruisen lämpösisällön, mutta tämän voidaan olettaa pysyvän muuttumattomana normaalilla tuotantotahdilla.

4.4.5 Sähkönsiirron häviöenergia, elektrodien lämpösisältö ja erotus

Valokaariuunin prosessin sähkösiirrossa syntyy myös häviöitä ja nämä ovat pääasiassa jäädytysjärjestelmän vaikutuksesta. Sähkösiirtojärjestelmän hyötysuhteena voidaan pitää arvoa 95 % ja häviöenergia saadaan kaavalla 11 (10, s. 90).

$$E_{\text{sähkönsiirto}} = E_{\text{sähkö}} - \frac{E_{\text{sähkö}}}{\eta} \quad \text{KAAVA 11}$$

Valokaariuunin sulatus tapahtuu kolmella grafiittielektrodilla ja niiden sitoma energia saadaan laskettua kaavalla 12 (10, s. 93).

$$E_{elektrodit} = (3 * m) * T * c_{elektrodit} \quad \text{KAAVA 12}$$

Elektrodin kulumisessa prosessiin tulee ylimääräistä hiiltä. Hiiltä kulkeutuu prosessiin noin 2,5 kg jokaista panostettua tonnia kohden. VKU2:lla elektrodien kulumisesta johtuvaa hiiltä on noin 300 - 400 kg jokaisessa sulatuksessa. (10, s. 93.)

Aiemmin todetun energianhäviämättömyyden perusteella saadaan johdettua kaava 13, jolla lasketaan muut mahdolliset häviöenergiat. Erotusenergia saadaan vähentämällä prosessista ulos tuleva energia sisään tulevista.

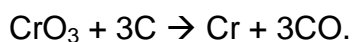
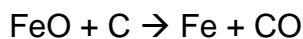
$$E_{erotus} = E_{sähkö} + E_{kemia} - E_{hyöty} - E_{häviöt} \quad \text{KAAVA 13}$$

5 RENGASROUHEEN KÄYTTÖ VALOKAARIUUNISSA

Kuten luvussa 3.2 käytiin läpi, rengasrouheen tarkoituksena on korvata tai vähentää kaksin ja antrasiitin käyttöä pelkistimenä. Noin 1,7 kiloa rengasrouhetta vastaa hiilimäärältään 1 kiloa antrasiittia, minkä lisäksi rengasrouheesta voidaan käyttää hyödyksi renkaiden sisältämä rauta (16, s. 6). Tässä luvussa tarkastellaan rengasrouheen käytön vaikutuksia valokaariuunin prosessiin.

5.1 Kemiallinen prosessi

Hiilen tehtävä valokaariuuni-prosessissa on toimia pelkistimenä ja suojata teräksen tärkeitä raaka-aineita, kuten rautaa ja kromia. Reaktiossa hiili hapettuu hiilimonoksidiksi tai hiilidioksidiksi, kun rauta- ja kromioksidit pelkistyvät perusmuotoon. Kemiallisiksi reaktioiksi saadaan seuraavat:



5.2 Vaikutus sähkön kulutukseen

Kirjallisuuden perusteella rengasrouheen käytöllä on todettu olevan positiivisia vaikutuksia sähköenergian kulutukseen (6, s. 1 - 2), mutta samalla voidaan todeta testattujen prosessien olevan kokoluokaltaan huomattavasti pienempiä kuin Tornio Worksin VKU2.

5.3 Testijaksot

Rengasrouheen käyttöä VKU2:ssa on testattu kaksi kertaa vuoden 2013 aikana. Ensimmäinen testijakso suoritettiin kesä - heinäkuu aikana ja toinen testijakso loka - marraskuun aikana. Testien jälkeen on tarkoitus päättää, otetaanko rengasrouhe jokapäiväiseen käyttöön, mikä vaatisi ympäristöluvan päivityksen. (9.)

5.3.1 Ensimmäinen testijakso

Ensimmäinen testijakso suoritettiin kesällä 2013, kesä - heinäkuun vaihteessa. Testisulatuksia tehtiin yhteensä 47. Testien tarkoituksena oli tarkastella rengas-

rouheen vaikutuksia prosessiin ja panostustapoja, joihin kuuluivat parhaimman panostuspaikan löytäminen romukorista.

Rengasrouhetta panostettiin sulatuksiin erilaisia määriä erilaisiin paikkoihin, jolloin lopputuloksena saatiin maksimimäärä 800 kg/romukori. Testien tarkkuutta heikentävänä asiana voidaan todeta epätarkkuus romunosturilla panostaessa, jolloin täsmällistä panostusmäärää ei saada selville. Lyhyen testijakson perusteella ei voida vetää suuria johtopäätöksiä hyödyistä ja haitoista, mutta testijakson perusteella voidaan suunnitella toinen pidempi jakso. (8.)

Testeissä rajoittavana tekijänä rengasrouheen käytössä on savukaasujen lämpötilan liiallinen nousu, johon osattiin varautua. Savukaasukanavan jäähdytyskyky ei riittänyt laskemaan lämpötilaa ennen suodatinlaitosta tarpeeksi matalaksi. Testien perusteella ei voida todeta positiivista vaikutusta sähköenergian kulutukseen prosessissa, sillä sähköenergian kulutus näyttää nousseen käytettäessä rengasmurskettä. Energiataseen suhteen suurimmat muutokset ovat tapahtuneet savukaasuhäviöiden nousussa. (8.)

5.3.2 Toinen testijakso

Toinen testijakso suoritettiin alkutalvella 2013, 18.10. - 15.11.2013. Toisella testijaksolla käytetty rengasrouhe oli palakooltaan suurempaa kuin ensimmäisellä jaksolla. Sulatusteknisesti rengasrouheen jatkuva käyttö on mahdollista, sillä voidaan todeta rouheen pystyvän korvaamaan käytössä olevat antrasiitin ja koksen. (17.)

Rengasrouheen käytön kannalta huolestuttavaa on käytetyn energian ja ”Tehot päällä” -ajan kasvaminen, jotka kertovat suoraan prosessin tehokkuuden laskusta. Testien perusteella voidaan todeta jälkipolttajärjestelmän olevan tarpeellinen, mikäli rengasrouheen käyttöä jatketaan. (17.)

5.4 Rengasrouheen vaikutus prosessiin

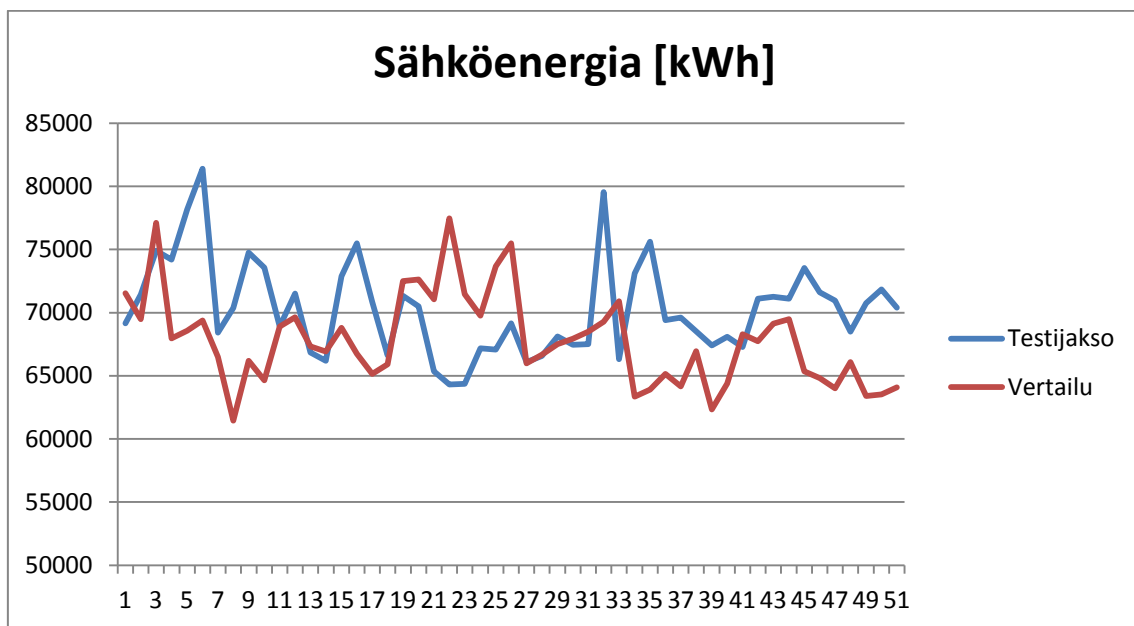
Vertailemalla kahden testijakson ja vertailusulatusten eroja voidaan selvittää rengasrouheen hyödyllisyyttä ja tehokkuutta prosessissa. Suurimmat vertailukohtat ovat hiilen saanti, energian kulutus ja sulatusaika. Lisäksi tarkkaillaan

mahdollisia ongelmatilanteita, joita rengasrouheen käyttö voi aiheuttaa. Tässä insinööriyössä keskitytään energian kulutukseen ja sulatusaikaan.

Kuten kirjallisuuden perusteella oletettiin, rengasrouheen käytöllä on mahdollisuus pienentää sähköenergian käyttöä sulatuksissa. Kun verrataan testijaksolta valittujen 50:n 720-1-sulatuksen sähkön kulutusta verrokkisulatuksiin, voidaan todeta sähköenergian käytön sulatuksissa kasvaneen. 720-1 on ruostumaton teräslaatu, joka kattaa suurien osan ruostumattoman teräksen tuotannosta terässulaton linjalla 2.

Verrokkijakson sulatukset on suoritettu joulukuussa 2013, joten prosessin voidaan olettaa pysyneen teknisesti samanlaisena. Testi- ja verrokkijakson sähköenergioiden vertailu nähdään taulukosta 4.

TAULUKKO 4. Testi- ja vertailujakson sulatusten sähköenergian vertailu



Tarkastelemalla taulukon 4 vertailua voidaan todeta testisulatuksissa kuluneen hieman enemmän sähköenergiaa kuin vertailusulatuksissa. Tulokset eivät kuitenkaan ole täysin verrannollisia toisiinsa, sillä sulatusten sähköenergian kulutus on hyvin riippuvainen valokaariuunin panoksesta, joka koostuu lähes kokonaan vaihtelevanlaatuudesta teräsromusta.

Huomattavasti tarkempi vertailu saadaan aikaan, kun vertaillaan testi- ja vertailujaksoja keskiarvojen kautta. Taulukosta 5 voidaan nähdä paremmin rengasrouheen käytön vaikutukset prosessiin, mistä huomataan rengasrouheen heikentävän prosessin hyötysuhdetta, sillä energiankulutus on testijaksolla ollut 2,8 %:tia suurempi kuin vertailujaksolla. Lisäksi ”Tehot päällä” -aika on suurempi kuin verrokkijaksolla.

TAULUKKO 5. Testi- ja vertailujaksojen vertailu

	Tehot päällä aika [min]	Energia [kWh/t]	Sähköenergian kulutus [kWh]	Sulatuksien lukumäärä [kpl]
Testijakso	53,9	470,1	69 048	101,0
Vertailu	53,3	458,1	67 087	101,2
Ero [%]	1,2 %	2,6 %	2,8 %	-0,2 %

5.5 Sulatus 31662

Energiataselaskelmassa käytetään sulatusta 31662, joka on suoritettu 7. marraskuuta 2013. Sulatuksen valintaperusteena käytettiin sen sisältämiä raaka-aineita, sillä panos on tyypillinen linjalle 2. Sulatuksen 31662 tiedot, panoslaskelma ja raaka-aineanalyysit ovat nähtävissä liitteessä 2. Salassapitosyistä sulatuksen panoslaskelma ja analyysit on poistettu työn julkisesta versiosta.

5.5.1 Sisään menevä energia

Sulatukseen 31662 käytettiin sähköenergiaa 67 061 kWh, jonka lisäksi osa tarvittavasta energiasta saadaan metallien hapettumisesta ja hiilen palamisesta. Kemiallisen energian määrä sulatuksessa on 20 090 kWh, josta noin 3129 kWh hiilen palamisesta. Tarkemmat tiedot kemiallisesta energiasta löytyvät liitteestä 3. Salassapitosyistä panostetut materiaalit ja niiden sisältämät alkuaineet on poistettu työn julkisesta versiosta.

Teräkseen sitoutunut hyötyenergia saadaan laskettua kaavalla 4.

$$E_{\text{teräs}} = \sum [m_{\text{kaato}} * m\%_i * h_i]$$

Sulatuksen 31662 rautaan sitoutunut hyötyenergia:

$$E_{\text{Fe}} = 137\,000 \text{ kg} * 68,87 \% * 0,39 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \approx 36\,449 \text{ kWh}$$

Terässulassa olevaan rautaan on sitoutunut noin 36 500 kWh energiaa, toistamalla sama toimenpide teräsulan merkittäville alkuaineille saadaan hyötyenergiaksi noin 50 783 kWh. Sulatuksen tiedot on nähtävissä taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Sulatuksen 31662 uunianalyysi, massa ja teräkseen sitoutunut hyötyenergia [kWh]

Alkuaine	Fe [%]	C [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Cu [%]	Si [%]	Σ
Pitoisuus	68,87	1,132	1,13	19,72	7,37	0,28	0,49	0,41	
massa [kg]	94 352	1 551	1 548	27 016	10 097	384	671	562	137 000
h [kWh/kg]	0,39	0,78	0,41	0,30	0,35	0,14	0,27	0,92	
E [kWh]	36 449	1 205	638	8 232	3 513	53	178	515	50 783

Kun tiedetään sisään menevä energia ja teräkseen sitoutunut hyötyenergia, voidaan laskea prosessin hyötysuhde η .

$$\eta = \frac{E_{\text{teräs}}}{E_{\text{sähkö}} + E_{\text{kemia}}} = \frac{50\,783 \text{ kWh}}{67\,061 \text{ kWh} + 20\,090 \text{ kWh}} * 100\% \approx 58,3 \%$$

Koko prosessin hyötysuhde sulatuksessa 31662 oli noin 58,3 %.

5.5.2 Savukaasuhäviöt

Savukaasuhäviöiden laskennassa oletettava savukaasuanalyysi nähdään taulukosta 7 (9.).

TAULUKKO 7. Savukaasuanalyysi oletukset sulatukselle 31662

Ajanjakso [min]	CO ₂	CO	H ₂ O	N ₂
16,27	30 %	20 %	5 %	45,00 %
39,73	15 %	25 %	5 %	55,00 %

Taulukon 8 ja kaavan 5 avulla saadaan laskettua CO-kaasun aiheuttamaksi savukaasuhäviöksi. Sulatuksessa 31662 CO-kaasun pitoisuus on 30 % noin 16,3 minuutin ajan. Muun sulatusajan pitoisuus on noin 15 %. Oletetaan lähteen savukaasujen lämpötilan olevan noin 1 700 °C (10).

$$\sum E_{\text{skCO}} = E_{\text{CO30\%}} + E_{\text{CO15\%}}$$

$$E_{\text{savukaasu}} = \sum_i \left[\frac{h_i}{M_i * 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}} * q_{mi} * t \right]$$

$$E_{\text{CO30\%}} = \frac{56015 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{28,01 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} * 3600} * 30\% * 300 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} * 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 16,27 \text{ min} = 1016,8 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{CO15\%}} = \frac{56015 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{28,01 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} * 3600} * 15\% * 300 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} * 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 37,73 \text{ min} = 1179,0 \text{ kWh}$$

$$\sum E_{\text{skCO}} = 1016,8 \text{ kWh} + 1179,0 \text{ kWh} = 2195,8 \text{ kWh}$$

CO-kaasun mukana sulatuksen aikana häviää noin 2196 kWh energiaa. Kaavalla 4 saadaan laskettua kaikkien savukaasukomponenttien energiasisältö. Savukaasujen mukana sulatuksesta poistui yhteensä 13032 kWh energiaa. Muiden kaasukomponenttien aiheuttamat häviöenergiat ovat nähtävissä liitteestä 3.

5.5.3 Kuonan sulattamiseen ja kuonaan sitoutuva energia

Sulatukseen 31662 kuonanmuodostajat panostettiin kalkki- (KAMU) ja tiilimurskeen (TIMU) muodossa. Kalkkimursketta panostettiin 6480 kg ja tiilimursketta 490 kg. Kuonanmuodostajien sulattamiseen tarvittava energia saadaan yhdistämällä kaavat 6 ja 7. Kalkki- ja tiilimurskeen analyysit on nähtävissä liitteessä 2.

$$\sum E_{\text{kuona}} = E_{\text{CaO}} + E_{\text{MgO}} = \sum [m_{\text{panostettu}} * x * m\%_i * h_i]$$

$$E_{\text{CaO}} = (6,48 \text{ t} * 60\% * 95\% + 0,49 \text{ t} * 95\% * 60\%) * 416 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} = 1652,7 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{MgO}} = (0,49 \text{ t} * 95\% * 40\%) * 550 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} = 102,4 \text{ kWh}$$

$$\sum E_{\text{kuona}} = E_{\text{CaO}} + E_{\text{MgO}} = 1652,7 \text{ kWh} + 102,4 \text{ kWh} = 1755,1 \text{ kWh}$$

Kuonan sulattamiseen kului sulatuksessa 31662 noin 1 755 kWh energiaa.

Sulatuksen lopuksi kuona on noin 1 650 °C ja siihen on sitoutunut paljon energiaa, kuvan 2 perusteella noin 10 % koko sulatuksen energiasta on mennyt kuonahäviöihin.

Kuonamäärä voidaan laskea kahdella tavalla joko CaO tai SiO₂ -pitoisuuksien avulla. Liitteessä 3 kuonamäärä on laskettuna molemmilla tavoilla ja laskennalliseksi kuonamääräksi on otettu näiden keskiarvo 11 092 kg, jonka avulla on laskettu kuonaan sitoutuneeksi energiaksi noin 4 653 kWh.

5.5.4 Jäähdytysvedet

Uunin ja holvin jäähdytyksessä prosessissa poistuva energia saadaan laskettua kaavalla 8. Holvin ja seinäpaneelien massavirrat ja vesien lämpötilat nähdään taulukosta 8. Veden tiheytenä käytetään 995 kg/m³ ja ominaislämpökapasiteettina 4,2 kJ/(kg K).

TAULUKKO 8. Prosessin jäähdytysvesien massavirrat ja lämpötilat

Seinäpaneelit	
Massavirta [m ³ /h]	820
Syöttöveden It [°C]	25
Paluuveden It [°C]	30
Holvi	
Massavirta [m ³ /h]	660
Syöttöveden It [°C]	25
Paluuveden It [°C]	32

Jäähdytysvesien mukaan prosessista poistuva energia saadaan yhdistämällä taulukon 8 tiedot kaavaan 6.

$$\sum E_{\text{jäähdytys}} = E_{\text{seinä}} + E_{\text{holvi}}$$

$$E_{\text{jäähdytys}} = \frac{c_{\text{vesi}} * \rho * q_v * (T_1 - T_0)}{3600} * \frac{t}{60 \text{ min}}$$

$$E_{\text{seinä}} = \frac{995 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 820 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * (30 \text{ °C} - 25 \text{ °C}) * 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}}}{3600} * \frac{54 \text{ min}}{60 \text{ min}} = 4283,5 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{holvi}} = \frac{995 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 660 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * (32 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C}) * 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \text{ }^\circ\text{C}}}{3\ 600} * \frac{54 \text{ min}}{60 \text{ min}} = 4\ 826,7 \text{ kWh}$$

$$\sum E_{\text{jäähdytys}} = 4\ 283,5 \text{ kWh} + 4\ 826,7 \text{ kWh} = 9\ 110,2 \text{ kWh}$$

Sulatuksessa 31662 jäähdytysvesien mukana poistui noin 9 110 kWh energiaa.

5.5.5 Säteilöhäviöt

Sulatuksessa raaka-aineiden panostus tapahtui kahdella romukorilla, jolloin holvin avaaminen tapahtuu kaksi kertaa. Lasketaan uunin säteilöhäviöt kaavoilla 9 ja 10. Uunin sisäpinta-ala on $3,5 \text{ m}^2 * \pi = 38,48 \text{ m}^2$ ja avaukseen kuluva aika on noin 5 minuuttia eli 0,08 tuntia (10, s. 86).

Ensimmäisellä avauksella uunin lämpötilan oletetaan olevan $1\ 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ja toisella avauksella $1\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$, jolloin kaavan 9 avulla voidaan laskea holvin avauksen aiheuttama säteilöhäviö.

$$E_{\text{säteily-avaus}} = [\varepsilon\sigma(T_{\text{panos}}^4 - T_{\text{ympäristö}}^4)] * A_{\text{uuni}}$$

$$E_{\text{säteily-1.avaus}} = 0,5 * 38,48 \text{ m}^2 * (1873^4 \text{ K}^4 - 298^4 \text{ K}^4) * 5,67 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} * 0,08 \text{ h}$$

$$= 1\ 073,37 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{säteily-2.avaus}} = 0,5 * 38,48 \text{ m}^2 * (1273^4 \text{ K}^4 - 298^4 \text{ K}^4) * 5,67 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} * 0,08 \text{ h}$$

$$= 228,50 \text{ kWh}$$

Uunin pohjan pintalämpötilaksi valitaan $235 \text{ }^\circ\text{C}$ ja yläosan eli holvin ja seinien lämpötilaksi $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (10, s. 87). Vuorauksen voidaan olettaa pysyneen samanalaisena.

Uunin pinta-alat saadaan esitietojen perusteella (18, s. 21).

$$A_{\text{pohja}} = r^2 * \pi = (4 \text{ m})^2 * \pi = 50,26 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{seinä}} = 2\pi r h = 2\pi * 4 \text{ m} * 6 \text{ m} = 150,80 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{holvi}} = A_{\text{pohja}}$$

Uunin pintojen läpi säteilevä energia saadaan laskettua kaavalla 10.

$$E_{\text{säteily-pinta}} = A * h [T_{\text{pinta}} - T_{\text{ympistö}}] * \frac{h * t}{60 \frac{\text{min}}{\text{h}} * 1000 \frac{\text{W}}{\text{kW}}}$$

$$E_{\text{säteily-pohja}} = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} [[50,26 \text{ m}^2 * (235 - 25)\text{K}] + [(50,26 \text{ m}^2 + 150,80 \text{ m}^2) * (100 - 25)\text{K}] * \frac{54 \text{ min}}{60 \frac{\text{min}}{\text{h}} * 1000 \frac{\text{W}}{\text{kW}}}$$

$$= 346,06 \text{ kWh}$$

Yhdistämällä avaussäteilyn ja pintasäteilyn energiat saadaan selville koko sulatuksen säteilyhäviö.

$$E_{\text{säteily}} = 1073,37 \text{ kWh} + 228,50 \text{ kWh} + 346,06 \text{ kWh} \approx 1648 \text{ kWh}$$

Sulatuksesta poistui lämpösäteilynä yhteensä noin 1650 kWh energiaa.

5.5.6 Sähkönsiirto häviö ja elektrodien lämpösisältö

Sulatuksessa 31662 sähköenergiaa kului yhteensä 67061 kWh ja kaavalla 11 saadaan sulatuksen sähkönsiirtohäviö.

$$E_{\text{sähkönsiirto}} = E_{\text{sähkö}} - \frac{E_{\text{sähkö}}}{\eta}$$

$$= 67061 \text{ kWh} - \frac{67061 \text{ kWh}}{0,95} = 3533,05 \text{ kWh}$$

Sulatuksen sähköenergiasta poistuu lämpöhäviöinä yhteensä noin 3533 kWh.

Elektrodien massa on 4500 kg ja niiden ominaislämpökapasiteetti on 0,709 kJ/(kg*K) (10.). Mikäli elektrodien lämpötila on 600 °C, elektrodien lämpösisältöksi saadaan kaavalla 12:

$$E_{\text{elektrodit}} = (3 * m) * T * c_{\text{elektrodit}}$$

$$E_{\text{elektrodit}} = \frac{(3 * 4\,500 \text{ kg} * 0,709 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} * 873 \text{ K})}{3\,600} \approx 2\,321,1 \text{ kWh}$$

Elektrodeihin sitoutui sulatuksen aikana yhteensä noin 2 300 kWh energiaa.

5.5.7 Muut energiahäviöt

Aiemmin todettiin energian häviöttömyys prosessista, joten sisään menevän energian tulee olla suurempi kuin hyöty- ja häviöenergian. Energioiden erotus saadaan laskettua kaavalla 13.

$$E_{\text{erotus}} = E_{\text{sähkö}} + E_{\text{kemia}} - E_{\text{hyöty}} - E_{\text{häviöt}}$$

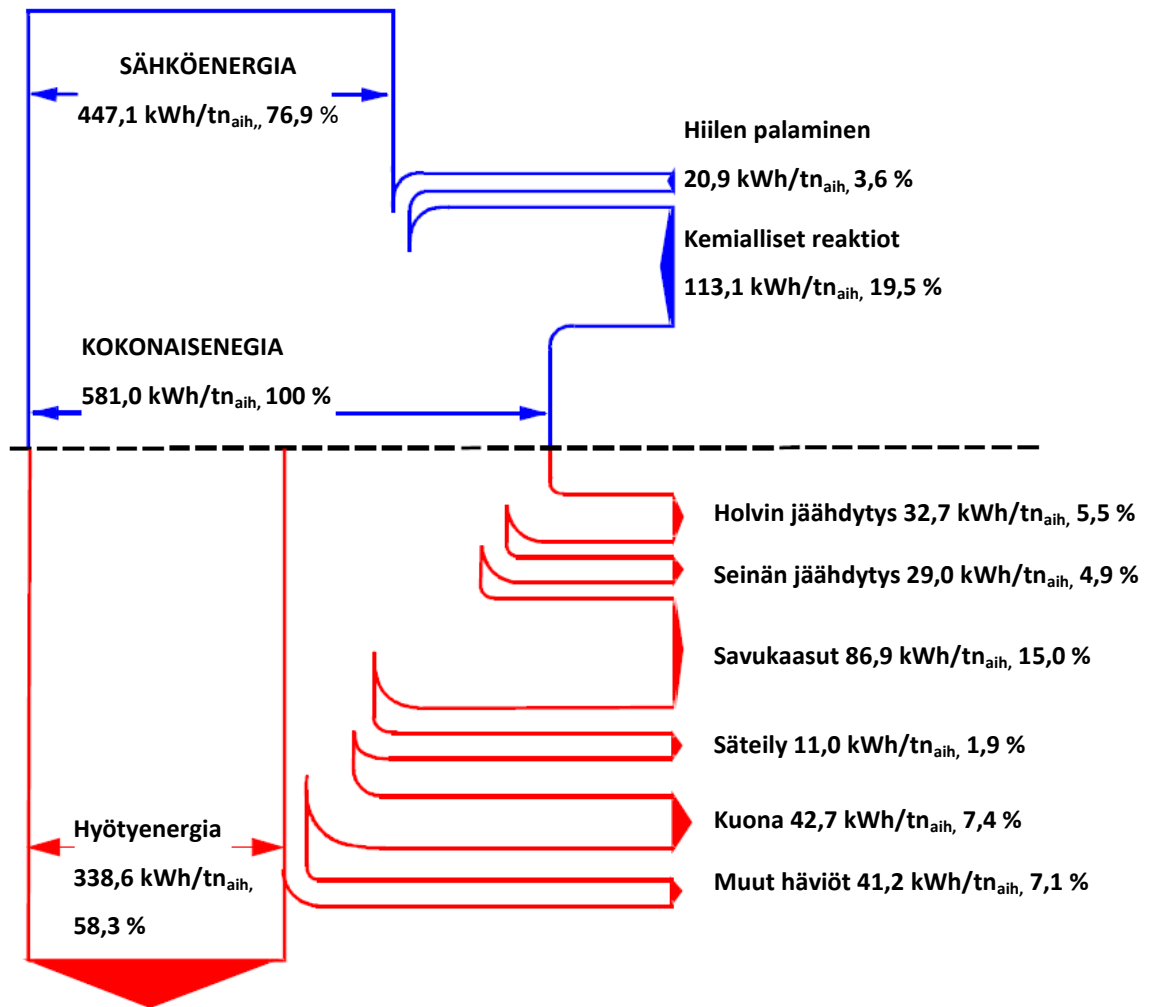
$$E_{\text{erotus}} = (67\,061 + 20\,090 - 50\,783 - 13\,029 - 6\,400 - 9\,110 - 7\,322) \text{ kWh} \\ \approx 499 \text{ kWh}$$

Energian häviämättömyyden perusteella saadaan muiden häviöiden määräksi noin 477 kWh.

5.5.8 Energiatase

Edellä laskettujen tietojen perusteella voidaan koostaa sulatukselle 31662 energiataase, joka on nähtävissä kuvassa 3. Energiataseen arvot on muutettu muotoon kilowattituntia aihiotonnia kohden.

Kuvasta 3 nähdään yläpuolella sisään menevä energia ja alapuolella hyöty- ja energiahäviöt. Sulatuksen energiasta noin 77 % tuodaan sähköenergian muodossa ja loput noin 23 % kemiallisena energiana ja hiilen palamisena. Prosessin hyötysuhde oli sulatuksessa noin 58,3 % ja lähteisiin verrattuna voidaan todeta energiataaseen tuloksien oikealla tasolla (10, 13).



KUVA 3. Rengasrouheen vaikutus energiataseeseen aihiotonna kohden

6 KEHITYSMAHDOLLISUUDET

Testijaksojen perusteella voidaan todeta rengasrouheen käytön olevan mahdollista jokapäiväisesti terässulatolla, mutta tämä vaatii muutoksia prosessiin. Suurimpana ongelmana rengasrouheen käytössä on savukaasulämpötilojen nousu, joka aiheuttaa ongelmatilanteita prosessiin. Tämä aiheuttaa energiahukkaa ja heikentää prosessin hyötysuhdetta. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää ratkaisuja, joilla savukaasuihin kulkeutuva energia saadaan hyödynnettyä prosessiin. Salassapitosyistä luvussa 6 laskettujen hyötylaskelmien tulokset on poistettu työn julkisesta versiosta.

6.1 Post Combustion

Savukaasujen sisältämän energian häviöenergian määrää on mahdollista pienentää jälkipolttajärjestelmän avulla. Jälkipolttajärjestelmän käytössä on kaksi erilaista mahdollisuutta, happipuhallus ja kaasupolttimet.

6.1.1 Happipuhallus

Valokaariuunin savukaasut koostuvat pääasiassa hiilen oksideista, typestä, vedystä ja vesihöyrystä, joista suuren kemiallisen energian potentiaalin sisältävät hiilimonoksidi (CO) ja vety (H₂) (9). Edellä mainittujen kaasujen palaminen ei ole täydellistä hapen puutteen vuoksi, jolloin ne joudutaan polttamaan savukaasukanavassa. CO- ja H₂-kaasujen palamisreaktiot ja niistä saatavat energiat ovat seuraavat (19, s. 102 - 109):



Post Combustion -menetelmässä periaatteena on syöttää happea valokaariuuniin, jotta sulatuksessa syntyvät hiilimonoksidi ja vety -kaasut palavat täydellisesti edellä mainittujen yhtälöiden mukaisesti. Hapen puhallus uuniin tapahtuu, kun mainittujen kaasujen pitoisuudet alkavat nousta. Tämä edellyttää savukaasuanalysaattorin ja virtausmittauksen varmatoimisuutta. (20, s. 5.) Järjestelmän avulla saatava energiahyöty voidaan laskea kaavalla 14 (19, s. 102 – 109).

$$E_{PC} = \frac{q_v * CO\% * \rho}{M} * t * \Delta H_{CO} * \eta_{PC}$$

KAAVA 14

Jälkipolttojärjestelmän hyöty perustuu sulamattomien romujen energian vastaanottamiskykyyn ja teräsromun ja kaasujen suureen lämpötilaeroon. PC-järjestelmän hyöty on suurimmillaan sulatuksen alussa, jolloin sulamatonta metallia on eniten. (20, s. 3.) Järjestelmän käyttöaika on noin 20 minuuttia jokaista sulatusta kohden. CO-kaasun pitoisuus savukaasuissa voi nousta jopa 40 prosenttiin, jolloin palaminen tapahtuu uunin ulkopuolella. Sulatuksen sähköenergiaa säädellään portaittain välillä 1 - 18 ja CO-kaasun muodostuminen on suurimmillaan portaalla 16. (9.) Outokummun tuotantojärjestelmän sulatustiedoista nähdään, että esimerkkisulatuksella 31662 portaan 16 aika on 16,27 minuuttia.

Jälkipolttojärjestelmän hyöty voidaan laskea suoraan savukaasuanalyysin perusteella. VKU2:lla ei ole käytössä virtausmittaria, jolloin tiedettäisiin koko ajan virtaavan savukaasun määrä. Vuonna 2008 keskimääräiseksi savukaasujen virtaukseksi on tutkittu noin 300 m³/min. (10, s. 84.) On myös tutkittu järjestelmän hyötysuhteen olevan noin 0,5 (10, s. 55).

$$E_{PC} = \frac{300 \frac{m^3}{min} * 30\% * 1,25 \frac{kg}{m^3}}{28,01 \frac{kg}{kmol}} * 16,27 min * 283 \frac{kJ}{mol} * 0,5 * \frac{1 kWh}{3 600 kJ} \approx 2 568,5 kWh$$

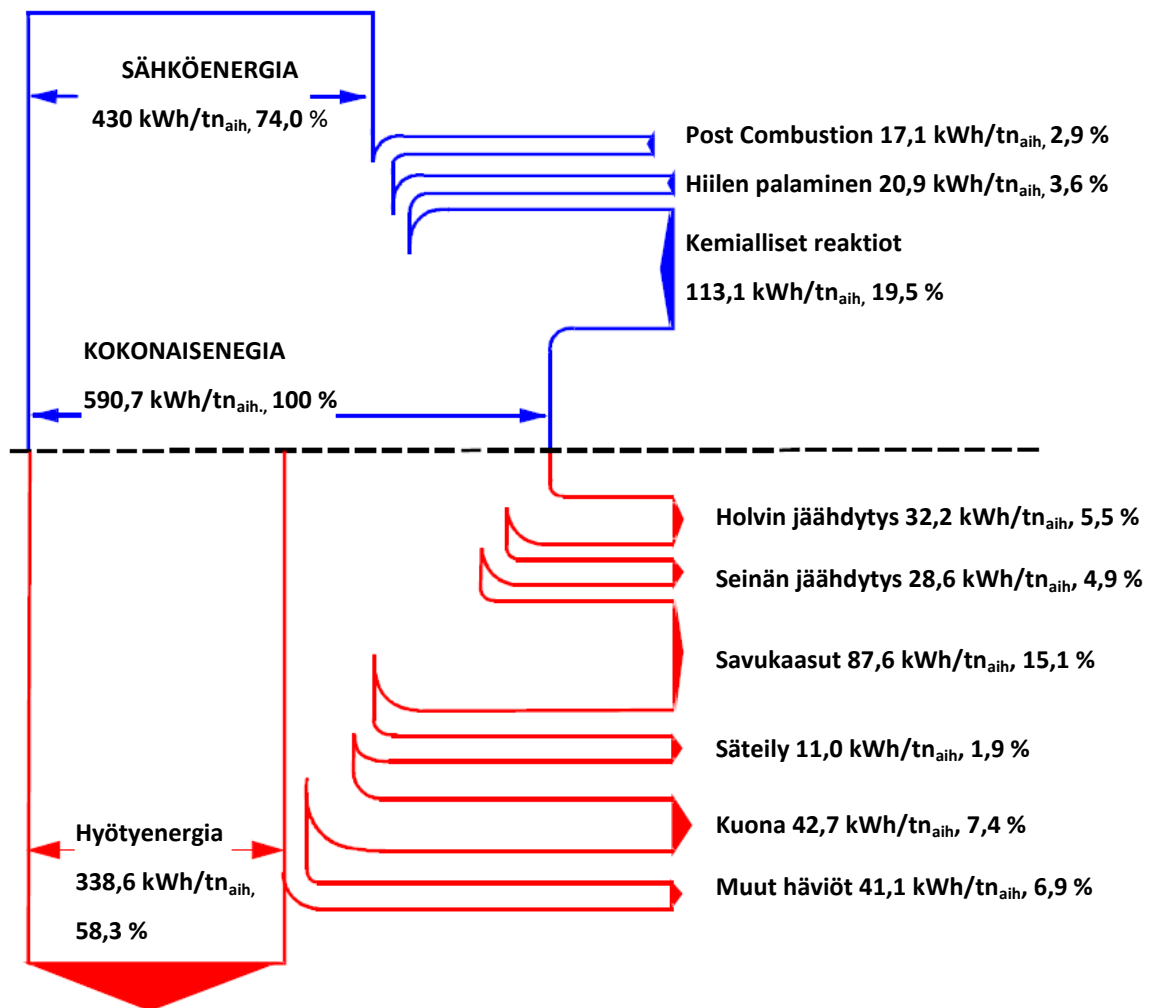
PC-järjestelmä vaatii toimiakseen happea, jonka tarve voidaan laskea aiemmin todetun reaktioyhtälön kautta. Kahta moolia CO-kaasua tarvitaan yksi mooli happea. CO-kaasun ainemäärä saadaan laskettua kaavan 14 alkuosalla.

$$n_{CO} = \frac{300 \frac{m^3}{min} * 30\% * 1,25 \frac{kg}{m^3}}{28,01 \frac{kg}{kmol}} * 16,27 min = 65 347,2 mol$$

CO:n ainemäärän ollessa 65 347,2 mol, tarvitaan happea 32 673,6 mol. Hapen moolimassa on 32 g/mol ja tiheyden ollessa noin 1,43 kg/m³, saadaan hapen tilavuudeksi noin 731,7 m³.

Tunnettujen arvojen perusteella saadaan laskettua jälkipolttajärjestelmän hyötyenergiaksi noin 2,57 MWh. Mikäli saadulla hyötyenergialla korvataan sähköenergian kulutusta prosessissa ja sähkön hinnaksi arvioidaan X snt/kWh, saadaan säästöksi X €/aihiotonni. Linjan tuotanto on vuositasolla noin X sulatusta, jolloin vuotuinen säästö on noin X €.

Kuvista 3 ja 4 nähdään sähkönkulutuksessa noin 17 kilowattitunnin pienentyminen jokaista aihiotonnia kohden. PC-järjestelmän ja rengasrouheen yhdistelmä sulatuksessa 31662 savukaasuhäviöiden nousu on mahdollista, mutta nousu on kuitenkin prosessin kokoluokassa erittäin pieni, vain noin 0,69 kWh aihiotonnia kohden. PC-järjestelmän vaikutukset sulatuksen 31662 energiataaseeseen on nähtävissä liitteessä 4.



KUVA 4. Post Combustionin ja rengasrouheen käytön yhteisvaikutus energiataaseeseen

Sulatuksen energioiden pysyessä samalla tasolla, voidaan jälkipolttojärjestelmän avulla lyhentää sulatuksen kestoa. Sulatusajan lyhentyessä pienentyvät myös sulatuksen häviöenergiat. Kaavan 6 avulla voidaan laskea mahdollinen holvin jäähtymyksessä säästyvä energia, mikäli ”tehot päällä” -aika lyhenee kaksi minuuttia.

$$\begin{aligned} \Delta E_{holvi} &= E_{holvi} - E_{holvi-2min} \\ &= 4\,283,5 \text{ kWh} - \frac{4\,283,5 \text{ kWh}}{54 \text{ min}} * 52 \text{ min} = 178,8 \text{ kWh} \end{aligned}$$

”Tehot päällä” -ajan lyhentyessä kaksi minuuttia pienentää holvin jäähtymyksen tarvetta noin 180 kWh sulatuksen aikana.

PC-järjestelmän käyttö vaatii savukaasuanalysaattorin täydellistä toimintaa, jotta hapen syöttäminen prosessiin on oikea-aikaista. Suurin hyöty saadaan, kun happisuuttimet suunnataan uunin virtauksia vastaan. (20, s. 4.)

Rengasrouheen ja PC-järjestelmän yhdistämisellä voidaan saavuttaa erilaisia taloudellisia hyötyjä, nämä saadaan selville laskemalla seuraavat tekijät:

- Rengasrouheen hintahyöty koksen suhteen
- Rengasrouheen sisältämän rautamäärän arvo
- PC-järjestelmän avulla saavutettava sähköenergian vähentyminen

Rengasrouhe on hinnaltaan noin yksi kymmenesosa antrasiitin hinnasta. Arvioidaan rengasrouheen hinnaksi X € tonnilta ja otetaan samalla huomioon, että 1,7 tonnia rengasrouhetta vastaa yhtä tonnia antrasiittia. Mikäli rengasrouheella korvataan 3 000 tonnia antrasiittia vuodessa, saadaan hintahyödyksi:

$$Hyöty_a = \left(3\,000 \text{ tn} * \frac{0,5}{0,05} * \frac{X \text{ €}}{\text{tn}} \right) - (1,7 * 3\,000 \text{ tn}) * X \frac{\text{€}}{\text{tn}} = X \text{ €}$$

Korvaamalla vuoden aikana 3 000 tonnia antrasiittia rengasrouheella, voidaan säästää noin X € vuodessa. Korvaamiseen tarvittavasta rengasrouhemäärästä saadaan lisäksi rautaa 15 % jokaista rengasrouhetonnia kohden, joka olisi tässä tapauksessa 765 tonnia rautaa, jonka arvo on noin X € raudan hinnan ollessa X € tonnilta.

Kun lasketaan yhteen rengasrouheen ja PC-järjestelmän erilaiset hyötytekijät, saadaan yhteisjärjestelmän rahalliseksi hyödyksi noin X €.

6.1.2 Kaasupolttimet

Kaasupolttimien käyttäminen sulatuksen alussa oikealla ilmamäärällä ja CO-pitoisuuden noustessa savukaasuissa, käytetään polttimia ilmaylimäärällä, jolloin saadaan CO poltettua uunin sisällä eikä palamista tapahdu savukaasukanavassa. (20, s. 3.) VKU2:lle on suunniteltu hankittavaksi kaasupolttimet (9), joiden avulla sulatuksia voidaan nopeuttaa, joten ilmaylimäärän käyttöä voidaan mahdollisesti kokeilla tulevaisuudessa.

Ilmaylimäärän käyttö polttimissa voi olla haasteellista, sillä polttimet vaativat hapen käyttämistä korkealla nopeudella. Tämä saattaa aiheuttaa elektrodien nopeampaa kulumista. (20, s. 3.)

6.2 Uunin ulkoiset hyödyntämiskohteet

Rengasrouheen tuomaa energiaa voidaan hyödyntää myös uunin ulkopuolisiin toimintoihin. Uunista poistuu energiaa savukaasujen mukana erittäin paljon, ja tällä energialla on paljon hyödyntämispotentiaalia.

6.2.1 Romukorien lämmitys ja kuivaus

Savukaasujen sisältämää energiaa on myös mahdollista käyttää romukorien esilämmitykseen, joka ei sisälly uunin tasealueeseen. Tässä tilanteessa voidaan käyttää myös Post Combustion -mallia, jolloin savukaasuissa jäljellä olevat häkä ja vety poltetaan romun kuivauksen yhteydessä.

Romujen kuivaaminen ja lämmittäminen vaatii muutoksia savukaasukanavaan ja lisäksi ei ole tarkalleen tiedossa, kuinka suuri hyöty järjestelyllä saadaan. Lisäksi savukaasujärjestelmän lämpötilat eivät saa nousta entisestään, sillä tämä aiheuttaa lisäongelmia suodatinlaitoksella. Toisaalta voidaan olettaa jokaisessa romukorissa olevan vähintään 50 tonnia teräsromua, joka voi ottaa vastaan lämpöenergiaa (9).

6.2.2 Siilojen ja seosainehallin lämmittäminen

Osa siilojärjestelmän kautta panostettavista materiaaleista ovat kosteita, kun ne toimitetaan raaka-ainevarastoon. Talvella siilojärjestelmän lämpötila voi olla alle 0 °C, jolloin kosteat materiaalit voivat jäätyä siiloihin. Ylimääräistä kosteutta vähentämällä, voidaan uunin energia hyödyntää paremmin sulatukseen eikä veden höyrystämiseen. Tarvittavat muutokset olisivat todennäköisesti pieniä, sillä uunin ympäristössä on valmiina jäähdytysvesijärjestelmä, josta tarvittavat kytkenät voitaisiin hoitaa.

Savukaasujen sisältää energiaa voidaan myös käyttää seosainehallin lämmittämiseen katon tai seinien kautta. Tällöin energiaa voidaan käyttää hyödyksi kosteiden materiaalien kuivaamiseen ja jäätyneiden sulattamiseen. Edellä mainitut materiaalit tuottavat ongelmia prosessissa. Tämä vaatii lämmöntalteenottojärjestelmän kehittämistä.

6.3 Jatkuva panostus

Tässä luvussa tarkastellaan jatkuvan panostuksen mahdollisuutta Tornion teerässulatolla. Tarkastelu suoritetaan teoreettiselta pohjalta, sillä voidaan todeta investoinnin vaativan suuria panostuksia ja muutoksia VKU2:n ympäristöön ja raaka-aineisiin. Suunniteltu panostustapa on yhdistelmä perinteistä romukoripanostusta ja jatkuvaa panostusta, jota käytetään vain kahden korin sulatuksiin. Sulatuksiin, joissa käytetään vain yhtä romukoria, panostus tapahtuu perinteisellä romukoripanostuksella.

6.3.1 Tarvittavat muutokset ja vaikutukset

Yhdistetyn panostustavan mallissa VKU2:lle rakennetaan sekundäärinen savukaasukanava, jonka avulla panostus tapahtuu. Kuten aiemmin todettiin, ensimmäisen korin panostus tapahtuu perinteiseen tyyliinsä, mutta toinen kori panostetaan uuden savukaasukanavan kautta, jolloin raaka-aineet lämpiävät savukaasujen vaikutuksesta ennen panostusta uuniin.

Muutosten myötä vaikutukset prosessiin voidaan olettaa olevan merkittävät, sillä esimerkiksi jatkuva panostus poistaa holvin avaamisen tarpeen, minkä seu-

rauksena tehot voivat olla päällä koko sulatuksen ajan. Rengasrouheen käyttöä voidaan lisätä, sillä savukaasujärjestelmän jäähdytysteho kasvaa uuden kanavan ja raaka-aineiden sitoman lämpöenergian myötä.

6.3.2 Järjestelmän heikkoudet

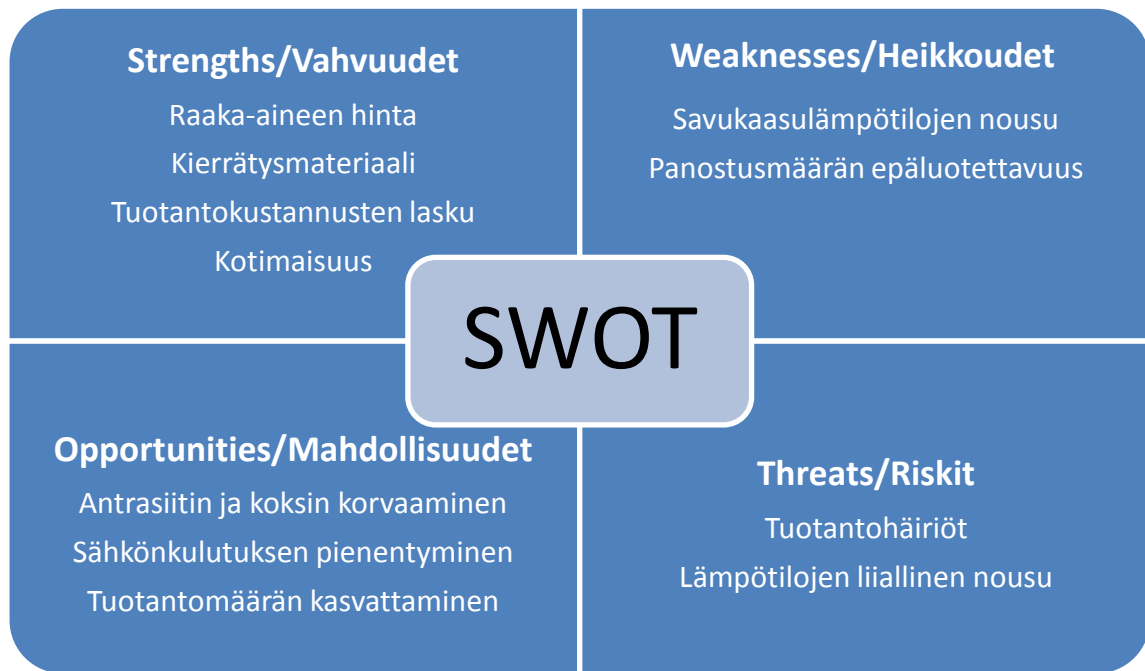
Järjestelmän toimintaan saattaminen vaatii suuria investointeja ja muutoksia uunin ympäristöön, minkä vuoksi kustannukset ovat liian suuret nopeaan toteuttamiseen. Lisäksi haasteita tuottaa teräsromun vaihteleva laatu, joka voi vaihdella paljon perättäisten sulatusten välillä.

7 YHTEENVETO

Työssä tarkasteltiin rengasrouheen vaikutuksia valokaariuunin prosessiin energiateknisestä näkökulmasta. Työssä mietittiin mahdollisia kehitysideoita, joilla rengasrouheen sisältämä energia saadaan maksimaalisesti hyödynnettyä. Työn tarkoituksena oli kehittää terässulatun linjan 2 energiatehokkuutta ja mahdollisesti myös tuotantokapasiteettia.

Ei voida todeta, että työn tavoitteet täyttyivät, sillä jätestatuksen vuoksi rengasrouheen testaaminen on haastavaa eikä kehiteltäviä ratkaisuja ole mahdollista kokeilla. Toisaalta voidaan todeta, että testijaksojen avulla saatiin tarvittava määrä tietoa rengasrouheen käytöstä ja vaikutuksista valokaariuunin prosessiin, minkä pohjalta käytön kehittäminen voidaan aloittaa. Lisäksi huomattiin rengasrouheen ja muiden hiilimateriaalien yhteensopivuus, josta on hyötyä tulevaisuuden testauksessa.

Rengasrouheen ja PC-järjestelmän käytöstä tehdystä SWOT-analyysistä voidaan todeta käytöllä olevan suuri potentiaali, joka voidaan hyödyntää kohtuullisilla kustannuksilla ja riskeillä. Rengasrouheen käyttöä puoltavat sen kotimaisuus, kierrätysmateriaali ja hinta. Rengasrouheen saatavuus on lähes rajaton, minkä vuoksi sen hyödyntäminen on erittäin kannattavaa. Lisäksi PC-järjestelmän investointi on pieni verrattuna sen mahdollistamaan hyötyyn (9). Rengasrouheen ja PC-järjestelmän yhteiskäytön SWOT-analyysi on nähtävissä kuvassa 5.



KUVA 5. SWOT-analyysi

Rengasrouheen käytöllä on suuret mahdollisuudet, sillä se on raaka-aineena huomattavasti halvempaa kuin koksi ja antrasiitti. Lisäksi rengasrouheen avulla saadaan hyötykäyttöön renkaiden metallivahvikkeet, jotka menevät muissa käyttötarkoituksissa hukkaan. Samalla huomataan rengasrouheen jatkuvan käytön olevan hyödyntöä ilman tehokasta PC-järjestelmää, sillä savukaasujen kemiallista energiaa ei saada hyödynnetty uunin sisällä ilman sitä.

Rengasrouheen käytöllä voidaan myös hyödyntää paikallisten ihmisten aktiivisuutta, sillä rengasrouhetta on saatavilla lähialueilta. Jatkuvan käytön tilanteessa paikalliset ihmiset voisivat kierrättää vanhat renkaansa teräksen valmistukseen, joka on mahdollisesti paras tapa niiden kierrätykseen.

LÄHTEET

1. Kehittyneiden materiaalien markkinajohtaja 2014. Outokumpu Oy. Saatavissa: <http://www.outokumpu.com/fi/yritys/Sivut/default.aspx>. Hakupäivä 14.5.2014.
2. Kromimalmista ruostumattomaan teräkseen. 2004. Esite. Outokumpu Stainless Oy, Tornio Works.
3. Tervetuloa terässulatolle. 2013. Esite. Outokumpu Stainless Oy, Tornio Works.
4. Keskinen, Raimo – Niemi, Pekka 2011. Valumetallien valmistus: Valokaariuunit. Tampere: Valuatlas & Tampereen ammattiopisto. Saatavilla: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN_sulatustekniikka_06.pdf. Hakupäivä 30.10.2013.
5. Aurinko, Hannu 2012. Ohje rengasrouheen käyttämisestä ja mitoittamisesta kaatopaikkarakenteissa. Oulu: Laatuinsinöörit. Saatavilla: http://www.rengaskierratys.com/materials/Ohje_rengasrouheen_kayttamises ta_kaatopaikkarakenteissa_01102012.pdf. Hakupäivä 30.10.2013.
6. Joulazadeh, M.H 2008. Using Scrap Tires in EAFs as Substitute for Carbon. International Journal of ISSI, vol 5. Isfahan, Iran.
7. Tuominen Leena 2012. Tutkimustodistus. Heinola: Kuusakoski Oy
8. Kunelius, Juho – Vallo Kimmo. 2013. Rengasmursketesti 1 VKU2 2013. Tornio: Outokumpu Stainless, Tornio Works.
9. Vallo, Kimmo 2013. Terässulaton kehitysinsinööri, Outokumpu Stainless Oy. Keskustelut 17.10.2013 - 25.5.2014.
10. Karassaari, Olli-Pekka 2008. Valokaariuunin energiatase ja kaatolämpötilan mallinnus. Diplomityö. Oulu: Oulun yliopisto, prosessi- ja ympäristötekniikan osasto.

11. Marttila, Seppo 2012. T350106 Tekninen termodynamiikka 6 op. Opintojakson luentomateriaali lukuvuonna 2011 - 2012. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
12. Wilson, E. – Kan, M. – Mirle, A 1998. Intelligent Technologies for Electric Arc Furnace Optimization. Minnesota: North Star Steel: Saatavissa: http://www.intellization.com/files/eaf_optimization_paper_EFC_98.pdf. Hakupäivä 7.1.2014.
13. Pfeifer, H. – Kirschen, M. Thermodynamic analysis of EAF energy efficiency and comparison with a statistical model of electrical energy demand. Aachen, Germany: Institute of Industrial Furnaces and Heat engineering in Metallurgy.
14. Simulainen, Jukka 2013, Kehitysteknikko, Outokumpu Stainless Oy. Keskustelu 2.12.2013.
15. Mäkelä, Veli-Matti 2012. T630303 Lämmönsiirtotekniikka 3 op. Opintojakson luentomateriaali lukuvuonna 2011 - 2012. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
16. Zaharia, M. – Sahajwalla, V. – Kim, B-C. – Khanna, R. – Saha-Chaudhury, N. – O’Kane, P. – Dicker, J. – Skidmore, C. – Knights, D. 2009. Recycling of Rubber Tires in Electric Arc Furnace Steelmaking: Simultaneous Combustion of Metallurgical Coke and Rubber Tyres Blends. Sydney, Australia: Energy & Fuels.
17. Kunelius, Juho – Vallo, Kimmo 2013. Rengasmursketesti 2 VKU2 2013. Tornio: Outokumpu Stainless, Tornio Works.
18. Mäkelä, Mikko – Soininen, Lauri – Tuomola, Seppo – Öistämö, Juhani 2010. Tekniikan kaavasto. 8., painos. Tampere: Tammertekniikka
19. Antila, A-M. – Karppinen, M. – Leskelä, M. – Mölsä, H. – Pohjakallio, M. 2003. Tekniikan Kemia. Helsinki: Edita Publishing Oy.

20. Grant, M.G. 2000. Principles and strategy of EAF Post-combustion. Illinois, USA: Air Liquide America Corporation.

Saatavissa:

http://www.americancombustion.com/file/otherelement/pj/15%20pyrejet_orlando_nov48729.pdf. Hakupäivä 7.1.2014.

21. Combustion Enthalpy tables 2009. Israel Urieli. Saatavissa:

http://www.ohio.edu/mechanical/thermo/property_tables/combustion/. Hakupäivä 22.5.2014.



LÄHTÖTIETOMUISTIO

Työn tiedot	Tekijä ¹ Miikka Laitinen	Tilaaaja ² Outokumpu Stainless Oy Terästie 1 9420 Tornio
	Tilaaajan yhdyshenkilö ja yhteystiedot ³ Kimmo Vallo	
	Työn nimi ⁴ Rengasrouheen energiansisällön talteensaannin maksimointi VKU2:ssa	
	Työn kuvaus ⁵ Rengasrouhe on valokaariuunissa uusi pelkistin ja energian tuoja. Rengasrouheen tuoma energia tulee saada uunin sulatusprosessin käyttöön eli romun sulatukseen mahdollisimman tehokkaasti. Miten?	
	Työn tavoitteet ⁶ Rengasrouheen käyttömäärän maksimointi. Sen energia sisällön maksimaalinen hyödyntäminen ja sitä kautta sähköenergian käytön vähentäminen. Mahdollinen sulatusajan lyheneminen. Selvitys keinoista ja testijakso(t) keinojen todentamiseksi.	
	Tavoiteaikataulut ⁷ Aloitus 1.10.2013. Valmis 1.2.2014	
	Päiväys ja allekirjoitukset ⁸ 22/8/2013 Tornio Tekijän allekirjoitus	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Tekijän nimi, puhelinnumero ja sähköpostiosoite. 2. Työn teettävän yrityksen virallinen nimi. 3. Sen henkilön nimi ja yhteystiedot, joka yrityksessä valvoo työn suoritusta. 4. Työn nimi voi olla tässä vaiheessa työnimi, jota myöhemmin tarkennetaan. 5. Työ kuvataan lyhyesti. Siinä esitetään muun muassa työn tausta, lähtötilanne ja työssä ratkaistavat ongelmat. 6. Esitetään lyhyesti ja selvästi työn tavoitteet. 7. Esitetään projektin tavoiteaikataulu. Silloin, kun työllä on välitavoitteita, myös ne merkitään aikatauluun. Tavoiteaikataulun ja oppilaitoksen yleisaikataulun perusteella tekijä laatii oman aikataulunsa. 8. LähtötietomuiSTIO päivätään ja sen allekirjoittavat tekijä ja tilaaajan yhdyshenkilö 		

Sulatuksen 31662 tiedot terässulaton tuotantojärjestelmästä

- Tehot päällä-aika: 54 min
- Laji ja laatu: Ruostumaton, 720-1
- Energia [kWh]: 67 061,08
- Kaatopaino [tn]: 137
- Kaatolämpötila [°C] = 1 597
- Panospaino [tn]: 147,5
- Saanti: 92,9

Panoslaskelma

Sulatuksen 31662 panoslaskelma on poistettu työn julkisesta versiosta salassapitosyistä.

Raaka-aineanalyysit

Sulatuksen 31662 raaka-aineanalyysit on poistettu työn julkisesta versiosta salassapitosyistä.

	CaO	MgO%	Saanti
KAMU	95 %	0 %	60 %
TIMU	60 %	40 %	95 %

Panostetut materiaalit ja niiden sisältämät alkuaineet:

Sulatuksen 31662 panostetut materiaalit ja niiden sisältämät alkuaineet on pois-tettu työn julkisesta versiosta salassapitosyistä.

Kuonaan sitoutunut energia CaO:n ja SiO₂ mukaan (10).

$$\frac{CaO_{panostettu}}{CaO_{kuona-analyysissä}} = \frac{3,97 \text{ tn}}{0,465} \approx 8,54 \text{ tn}$$

$$\frac{Si_{panostettu} - Si_{sulassa}}{M_{Si}} * M_{SiO_2} * m - \%_{SiO_2}$$

$$= \frac{(1846,2 \text{ kg} - 562 \text{ kg}) * 60,1 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{28,01 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} * 20,2\% = 13\,644,61 \text{ kg}$$

Kuonamäärän keskiarvo:

$$\frac{8\,540 \text{ kg} + 13\,644,61 \text{ kg}}{2} = 11\,092,3 \text{ kg}$$

Kuonaan hapettuneiden metallinen synnyttämä kemiallinen energia laskettuna kaavalla 4. Kaatopainon tilalla käytetään kuonamäärän keskiarvoa. Kuonaan sitoutuneeseen energiaan on huomioitu merkittävimmät oksidit.

Oksidi	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	
Pitoisuus	46,5 %	20,2 %	11,5 %	2,5 %	2,4 %	5,4 %	1,2 %	0,9 %	
massa [kg]	5 157,9	2 240,6	1 275,6	277,3	266,2	599,0	133,1	99,8	10 049,6
h [kWh/kg]	0,41	0,53	0,54	0,42	0,38	0,57	0,41	0,35	
E [kWh]	2 133,7	1 183,5	692,6	115,5	100,7	338,6	54,3	34,6	4 653,3

Kuonaan hapettuneet metallit

Metallioksidi	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	
Osuus kuonasta [%]	20,20 %	11,50 %	2,50 %	2,40 %	0,90 %	1,20 %	
Oksidimassa [kg]	2 240,6	1 275,6	277,3	266,2	99,8	133,1	
Alkuainemassa [kg]	1 047,6	675,3	207,9	182,1	77,3	93,1	
M [oksidi]	60,1	102,0	127,8	152,0	70,9	159,6	
M [alkuaine]	28,1	54,0	95,8	104,0	54,9	111,6	
Energia [kWh/kg]	8,7	8,61	5,47	3,05	1,95	2,03	kWh/kg
Energia [kWh]	9 114,3	5 814,6	1 137,1	555,5	150,7	188,9	16 961,2

Hiilen palamisesta syntynyt kemiallinen energia sulatuksessa 31662.

$$E_{hiili} = E_{C \rightarrow CO_2} + E_{C \rightarrow CO} = 6,2 \frac{kg}{min} * 54 min * 9,1 \frac{kWh}{kg_C} + 0,6 * 54 min * 2,55 \frac{kWh}{kg_C}$$

$$E_{hiili} = 3\,129,3 kWh$$

Savukaasujen aiheuttamat energiahäviöt saadaan laskettua kaavalla 5. Savukaasuhäviöt on jaettu portaan 16 ajalle ja muun sulatuksen aikana.

SULATUKSEN KESTO [MIN]		54				
PORRAS 16 ILMAN PC:TÄ [MIN]		16,27				
VIRTAUS [m3/min]		300				
KAASU	CO	CO2	N2	H2O	H2	
ENTALPIA (1707 K) [kJ/kmol] (21.)	56 015,0	90 242,0	55 421,0	71 669,0	60 715,5	
MOOLIMASSA [kg(kmol)]	28,0	44,0	28,0	18,0	2,0	
ENTALPIA [kWh/kg]	0,56	0,57	0,55	1,11	8,37	
TIHEYS [kg/m3]	1,25	1,98	1,26	0,80	0,09	
OSUUS VIRTAUKSESTA [%]	30 %	20 %	45 %	5 %	0 %	
OSAVIRTAUS [m3/min]	90	60	135	15	0	
MASSAVIRTA [kg/min]	112,5	118,6	170,1	12,0	0,0	
	1 016,8	1 099,3	1 521,6	215,8	0,0	3 853,50

YHTEINEN OSUUS [MIN]		37,73				
KAASU	CO	CO2	N2	H2O	H2	
ENTALPIA (1707 K) [kJ/kmol]	56 015,0	90 242,0	55 421,0	71 669,0	60 715,5	
MOOLIMASSA [kg(kmol)]	28,0	44,0	28,0	18,0	2,0	
ENTALPIA [kWh/kg]	0,6	0,6	0,5	1,1	8,4	
TIHEYS [kg/m3]	1,3	2,0	1,3	0,8	0,1	
OSUUS VIRTAUKSESTA [%]	15 %	25 %	55 %	5 %	0 %	
OSAVIRTAUS [m3/min]	45,0	75,0	165,0	15,0	0,0	
MASSAVIRTA [kg/min]	56,3	148,3	207,9	12,0	0,0	
	1 179,0	3 186,6	4 312,8	500,3	0,0	9 178,71

Post Combustionin mahdollinen vaikutus sulatuksen 31662 energiataseeseen:

Energitase [kWh]	Ilman PC:tä	PC:n kanssa	ΔE [%]
Sähköenergia	67 061,1	64 493,6	-2 569
Kemiallinen energia	16 961,2	16 961,2	0
Hiilen palaminen	3 129,3	3 129,3	0
PC Hyöty	0,0	2 569,5	2 569
Energia sisään	87 151,5	87 121,5	0
			0
Teräkseen sitoutunut energia	50 782,9	50 783,9	0
Savukaasu	13 029,2	13 133,2	104
Kuona	6 408,5	6 408,5	0
Jäähdytysvedet	9 110,2	9 110,2	0
Säteily	1 647,9	1 647,9	0
Sähkönsiirtohäviö	3 353,1	3 353,1	0
Elektrodien lämpösisältö	2 321,1	2 321,1	0
Ulos tuleva energia	86 652,9	86 756,8	
Ylijäämäenergia	498,6	395	-104

Savukaasuhäviöt PC-järjestelmällä:

PORRAS 16 PC:N KANSSA [MIN]		16,3				
KAASU	CO	CO2	N2	H2O	H2	
ENTALPIA (1707 K) [kJ/kmol]	56 015,0	90 242,0	55 421,0	71 669,0	60 715,5	
MOOLIMASSA [kg(kmol)]	28,0	44,0	28,0	18,0	2,0	
ENTALPIA [kWh/kg]	0,6	0,6	0,5	1,1	8,4	
TIHEYS [kg/m3]	1,3	2,0	1,3	0,8	0,1	
OSUUS VIRTAKUUKSESTA [%]	10 %	25 %	60 %	5 %	0 %	
OSAVIRTAUS [m3/min]	30,0	75,0	180,0	15,0	0,0	
MASSAVIRTA [kg/min]	37,5	148,3	226,8	12,0	0,0	
	338,9	1 374,1	2 028,8	215,8	0,0	3 957,66