



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

TERÄSSENKAN MUURAUKSEN AIKAISEN JÄÄHDYTYKSEN KEHITTÄMINEN

Ville Kähkönen

Ympäristötekniikka

Kandidaatintyö

Marraskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Teräksen muurauksen aikaisen jäähtymisen kehittäminen

Ville Kähkönen

Oulun yliopisto, Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintutkielma 2020, 38 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Jenni Ylä-Mella

Tässä kandidaatintutkielmassa tutkitaan erilaisia jäähtymismenetelmiä teräksen muurausprosessin aikana. Työssä selvitetään käytössä olevan paineilmajäähtymisen kannattavuutta sekä tutkitaan muita mahdollisia keinoja teräksen jäähtymiseksi. Lisäksi esitellään SSAB:n Raahen tehtaan teräksenvalmistusprosessia sekä keinoja kehittää paineilmajärjestelmiä yleisesti. Lopputuloksissa todetaan, että paineilmailla toteutettu jäähtymis on tehokas tapa saada teräskappale jäähtymään riittävästi, mutta samalla kuitenkin suositellaan käyttämään muita jäähtymiskeinoja aina kun se on mahdollista esimerkiksi energiatehokkuuden vuoksi. Lisäksi kiinnitetään huomiota vuorausmateriaalien muutoksilla mahdollisesti saataviin hyötyihin terästuotannon näkökulmasta.

Asiasanat: paineilma, terästeollisuus, jäähtymis

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintutkielma on tehty Oulun yliopiston teknillisen tiedekunnan prosessi- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelmaan kesä-marraskuun välisenä aikana vuonna 2020. Tutkielma on tehty toimeksiantona SSAB Europe Oy:n Raahen tehtaalle terässulaton tulenkestävien osastolle ja sen tarkoituksena oli selvittää terässenkan muurausprosessissa käytetyn jäähdytysmenetelmän kannattavuutta. Lisäksi tutkittiin muita mahdollisia keinoja toteuttaa terässenkan jäähdytys.

Haluan kiittää erityisesti työni ohjaajaa TkT Jenni Ylä-Mellaa, joka aktiivisella ohjaamisellaan auttoi ongelmakohtissa ja kannusti työn tekemisessä. Lisäksi haluan esittää erityiskiitokset DI Heikki Pärkälle, joka omalta osaltaan antoi mahdollisuuden tämän kaltaisen työn tekemiselle Raahen tehtaalle. Kiitokset kuuluvat myös Matias Kinokselle SSAB:lta, joka toimitti tarvittavia materiaaleja tutkielman tekemistä varten. Kiitän myös TkL Kaisu Ainassaarta Ympäristö- ja kemiantekniikan tutkimusyksiköstä, joka auttoi tutkielmassa tehtyjen laskujen kanssa. Lisäksi kiitän yhteistyökumppaneita Bet-Ker Oy:ssä sekä perhettäni ja ystäviäni.

Oulu, 3.11.2020

Ville Kähkönen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto	5
2 SSAB ja teräksen valmistus	7
2.1 SSAB Europe ja Raahen	7
2.2 Teräksen valmistusprosessi Raahessa	8
3 Paineilmajärjestelmät	10
3.1 Paineilman kustannukset	10
3.2 Paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden kehittäminen	10
4 Teräksen jähdyttäminen paineilmalla	13
4.1 Prosessikuvaus	13
4.2 Nykyisen prosessin heikkoudet	14
4.3 Mittaukset prosessista	15
4.4 Paineilmalla jähdyttämiseen kuluva aika	20
5 Teräksen muurausprosessin muuttaminen	24
5.1 Prosessi ilman jähdytystä	24
5.2 Esipoltetut tiilet	28
6 Teräksen jähdyttäminen puhaltimella	31
7 Yhteenveto	35

LÄHDELUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	pinta-ala
c_p	lämpökapasiteetti
D	halkaisija
g	putoamiskiihtyvyyys
Gr	Grashofin luku
h	lämmönsiirtokerroin
k	lämmönjohtavuus
L	karakteristinen mitta
m	dimensioton vastus
n	dimensioton paikka
Nu	Nusseltin luku
P	piiri
Pr	Prandtlin luku
Re	Reynoldsin luku
T	lämpötila
t	aika
v	nopeus
X	dimensioton aika
x_1	väliaineen säde
Y	dimensioton lämpötilan muutos
α	terminen diffuusiokerroin
β	lämpölaajenemisen kerroin
μ	viskositeetti
ρ	tiheys

1 JOHDANTO

Ilmastonmuutoksesta on puhuttu jo useiden kymmenien vuosien ajan, ja keskustelu on kiihtynyt entisestään viimeisten vuosien aikana. Etenkin hiilidioksidipäästöjen osuus ilmastokeskustelussa on noussut suureksi puheenaiheeksi. Myös terästeollisuudessa on herätty tämän aiheen tärkeyteen.

Teräs on erittäin kestävä ja pitkäikäinen materiaali, sekä lisäksi hyvin monikäyttöinen. Nyky-yhteiskunnassa terästä käytetään monissa sovelluksissa rakentamisesta lääketieteeseen. Näiden ominaisuuksien lisäksi teräksen yhtenä vahvoista eduista on sen kierrätettävyyttä. Vaikka terästä voidaan näiden syiden vuoksi pitää ilmastolle ystävällisenä, sen valmistaminen tuottaa kuitenkin suuren määrän päästöjä. Erityisesti hiilidioksidipäästöt ovat terästeollisuuden ongelma, minkä seurauksena teräksenvalmistusprosessia pyritään muuttamaan hiilineutraaliksi.

Hiilineutraaliutta tavoiteltaessa prosessin kaikilla vaiheilla on tärkeä rooli. Etenkin prosessien sähkönkulutusta tulee tarkastella ja saada se laskemaan. Yksi suurimmista sähkönkuluttajista teollisuudessa on paineilman valmistus ja paineilmaa tarvitaan suuria määriä myös terästeollisuudessa.

Tämän kandidaatintutkielman tarkoituksena on tutkia paineilman käyttöä terästehtaalla terässenkan muurausprosessin aikana. Työssä tutkitaan, paljonko nykyinen terässenkan jäähdytysprosessi kuluttaa paineilmaa sekä kerrotaan yleisiä vaihtoehtoja paineilmajärjestelmien optimointiin. Lisäksi tavoitteena on tarjota yritykselle vaihtoehtoisia ratkaisuja terässenkan jäähdytyksen toteuttamiseen. Lopuksi näitä erilaisia vaihtoehtoja verrataan keskenään, jotta saadaan selville sekä taloudellisesti, että teknillisesti kannattavin vaihtoehto.

Tutkielman toteuttamiseksi olemassa olevasta prosessista on tehty erilaisia mittauksia ja näiden mittauksien pohjalta suoritetaan laskentaa lämmönsiirtoon pohjautuvan teorian avulla. Tarkoituksena on vastata kysymyksiin, kauanko terässenkan jäähdyttäminen paineilmalla kestää, miten paineilmajärjestelmää voitaisiin kehittää, ja mitä muita mahdollisia ratkaisuja paineilmajäähdytyksen sijasta on olemassa. Tämä on ensimmäinen

kerta, kun kyseisen kaltaista tutkimusta tehdään SSAB:n Raahen tehtaalla ja näin ollen teräksen jähdytysprosessia ei ole aikaisemmin mitenkään optimoitu.

2 SSAB JA TERÄKSEN VALMISTUS

SSAB on maailmanlaajuinen teräsyhtiö, joka on erikoistunut erikoislujien terästen valmistukseen. Yhtiö valmistaa AHSS-teräksiä (Advanced High-Strength Steels) ja Q&T-teräksiä (Quenched & Tempered Steels) sekä nauha-, levy- ja putkituotteita. Lisäksi SSAB tuottaa erilaisia ratkaisuja rakentamiseen. Yhtiön tavoitteena on valmistaa kevyempiä ja pitkäikäisempiä lopputuotteita. (SSAB 2020a)

SSAB valmistaa terästä tuotantolaitoksissaan Ruotsissa, Suomessa ja Yhdysvalloissa sekä lisäksi viimeistelee terästuotteita muun muassa Kiinassa ja Brasiliassa. Yhtiön vuosittainen terästuotantokapasiteetti on noin 8,8 miljoonaa tonnia. Yhteensä SSAB:llä on työntekijöitä noin 14 500 yli 50 maassa. Liikevaihtoa yhtiöllä kertyi vuonna 2019 noin 76 miljardia Ruotsin kruunua. (SSAB 2020a)

SSAB:n tavoitteena on olla kestävä kehityksen edelläkävijä ja tähän tarkoitukseen on kehitetty niin kutsuttu HYBRIT-hanke. Hankkeen tarkoituksena on tuottaa hiilidioksidivapaata terästä markkinoille vuoteen 2026 mennessä. Lisäksi yhtiön suurena tavoitteena on olla täysin hiilidioksidivapaa vuoteen 2045 mennessä. (SSAB 2020a)

2.1 SSAB Europe ja Raaha

SSAB Europe on yksi SSAB:n divisiooneista ja se on alansa markkinajohtaja Pohjoismaissa 40–45 prosentin markkinaosuudellaan. Erityisesti AHSS-teräkset, maalipinnoitetut tuotteet ja putkituotteet ovat divisioonan erikoisalaa. Yhtiö keskittyy erityisesti premium-tuotteisiin, joilla voidaan tukea kestävä kehitystä. Divisioonan päätuotantolaitokset sijaitsevat Suomessa Raahessa ja Hämeenlinnassa sekä Ruotsissa Luulajassa ja Borlängessä. Yhteensä näissä tuotantolaitoksissa tuotetaan terästä vuosittain noin 4,9 miljoonaa tonnia. Lisäksi yhtiöllä on ympäri Eurooppaa muun muassa maalipinnoituslinjoja, putkituotantoa ja teräspalvelukeskuksia. (SSAB 2020b)

SSAB Raahan tehdas tuottaa standardi-, premium- ja erikoisteräksiä. Tehtaan päätuotteina toimivat kuumavalssatut levyt ja kelatuotteet. Tehdas on aloittanut toimintansa vuonna 1964 ja tällä hetkellä alueella toimii koksamo, kaksi masuunia, terässulatto, voimalaitos sekä kuumavalssaamo. Lisäksi alueelta löytyy raaka-aineiden ja

materiaalien käsittelytoiminnot ja satama. Henkilöstöä Raahessa on noin 2600 henkilöä. (SSAB 2020c)

2.2 Teräksen valmistusprosessi Raahessa

SSAB:n Raahen tehtaalla teräksen valmistusprosessi lähtee liikkeelle raaka-aineiden, kuten kivihiilen ja rautapellettien, tuomisella tehdasalueelle (SSAB 2020d). Vuosittain alueella käy noin 25 000 kuorma-autoa ja 500 laivaa (SSAB 2020c). Tehtaalle tuodut raaka-aineet käsitellään eri tavoin koksaamossa, kalkinpolttamossa ja briketöintilaitoksessa. Muun muassa koksaamalla tuotetaan kivihiilestä koksia, joka toimii masuuniprosessissa pelkistimenä. Raaka-aineiden käsittelyn jälkeen ne syötetään oikeassa suhteessa masuuniin, josta prosessin päätteeksi saadaan ulos raakarautaa. Sula raakarautaa kuljetetaan junalla raakarautasenkoissa sulatolle. (SSAB 2020d)

Sulatolla konvertteriin kaadetaan ensin kierrätysterästä, jonka jälkeen konvertteriin kaadetaan rikinpoiston kautta kulkenut raakarautaa. Konvertteriin lisätään myös erilaisia seosaineita ja seosta puhalletaan korkeassa lämpötilassa hapella. Tällöin lopputuotteena saadaan sulaa terästä, joka kaadetaan konvertterista terässenkkaan. Seuraavaksi terässenkka siirretään jatkokäsittelyyn joko senkkauuniin, vakuumikäsittelyyn tai CAS-OB:lle halutun teräslaadun mukaan. Jatkokäsittelyn jälkeen terässenkassa oleva sula teräs ohjataan jatkuvavalukoneen läpi, jolloin teräs jäähtyy ja siitä muodostuu teräsaihiot. (SSAB 2020d)

Sulaton jälkeen teräsaihiot kuljetetaan valssaamolle joko levyvalssaukseen tai kuumanauhavalssaukseen. Levyvalssauksessa aihiot lämmitetään läpityöntöuunissa, jonka jälkeen aihiota valssataan, oikaistaan ja jäähdytetään useassa eri vaiheessa. Vaiheiden välissä levyä lämmitetään uudestaan, jotta halutut ominaisuudet ja muokattavuus säilyisivät. Näiden vaiheiden jälkeen levyt jäähdytetään, tarkastetaan ja merkataan, jolloin lopputuotteena saadaan kvarttolevyjä. Näistä levyistä voidaan valmistaa esimerkiksi muotopolttoleikattuja levyjä. Kuumavalssauksessa aihiota ei jäähdytetä välissä, vaan valssausprosessissa lämpötila pysyy korkeana koko prosessin ajan. Aihiot kulkevat erilaisten valssaimien läpi ja lopulta prosessista saadaan tuotteena haluttu nauhalevy, joka jäähdytetään ja kelataan kelalle. Näistä keloista voidaan valmistaa esimerkiksi ranoja tai kohokuviolevyjä. (SSAB 2020d)

Kaikkien edellä mainittujen vaiheiden jälkeen tuotteet toimitetaan laivoilla, junilla tai kuorma-autoilla joko suoraan asiakkaille tai jatkojalostettavaksi muille tehtaalle. Raahan tehtaalla tuotteita voidaan toimittaa esimerkiksi SSAB:n Pulkkilan tehtaalle, joka valmistaa erilaisia putkituotteita. (SSAB 2020d)

3 PAINEILMAJÄRJESTELMÄT

Erilaisilla paineilmajärjestelmillä on merkittävä vaikutus terästeollisuuden toimivuuteen. Paineilman tuotantokustannusten vuoksi on tärkeää, että paineilmajärjestelmät on optimoitu mahdollisimman hyvin, eikä esimerkiksi turhaa käyttöä esiinny. Suurin osa paineilman kustannuksista syntyy tuotantovaiheen sähkönkulutuksesta, joten paineilman käytöllä ja järjestelmien tehokkuudella on suuri vaikutus myös terästeollisuuden hiilidioksidipäästöihin.

3.1 Paineilman kustannukset

Maailman laajuisesti teollisuus kuluttaa 50 prosenttia koko sähköntuotannosta ja samalla arvioiden mukaan noin 50 prosenttia kaikesta tuotetusta paineilmastasta. (Vittorini ja Cipollone 2016) Paineilman tuottaminen teollisuuden tarpeisiin kuluttaa keskimäärin noin 10 prosenttia teollisuuden sähkötarpeesta. Joillakin aloilla, kuten lasiteollisuudessa, sähkönkulutus on jopa 30 prosenttia paineilman osalta. Lisäksi on arvioitu, että Euroopan unionissa teollinen paineilman tuottaminen aiheuttaa vuosittain noin 55 miljoonaa tonnia hiilidioksidipäästöjä. (Radgen ja Blaustein 2001, s. 25)

3.2 Paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden kehittäminen

Paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden kasvattamiseen voidaan käyttää menetelmää, joka koostuu kahdeksasta eri vaiheesta. Kyseinen menetelmä soveltuu sekä uusien systeemien, että jo olemassa olevien systeemien parantamiseen. Nämä kahdeksan vaihetta ovat (Seslija et al. 2016):

- 1) järjestelmän tarkistus ja analysointi
- 2) järjestelmävaatimusten asettaminen
- 3) häviöiden minimoiminen
- 4) tuotannon ja kulutuksen harmonisointi
- 5) huippukuormitusten löytäminen
- 6) automatisointi
- 7) laitteiston kunnossapito

8) järjestelmän käytönaikainen valvonta

Vaiheet yksi, kaksi ja neljä ovat vahvasti kytköksissä toisiinsa. Järjestelmän tarkistus- ja analysointivaiheessa tutkitaan olemassa olevaa paineilmajärjestelmää ja selvitetään olennaisia tietoja esimerkiksi tuotetun ilman määrästä sekä kulutuksesta. Järjestelmävaatimusten asettaminen tarkoittaa sitä, että tuotetulle ilmalle asetetaan niin sanottuja sisäisiä vaatimuksia. Näitä voivat olla päälinjan paine, riittävä paineen taso, paineilman määrä sekä paineilman laatu. Yhdessä näiden kahden aiemman vaiheen avulla päästään tuotannon ja kulutuksen harmonisointiin. Tavoitteena on siis aiemmissa vaiheissa kerättyjen tietojen avulla optimoida järjestelmä siten, että tuotetun paineilman ominaisuudet vastaavat mahdollisimman hyvin kulutettua paineilmaa. (Seslija et al. 2016) Näin saavutetaan tilanne, jossa paineilmaa esimerkiksi tuotetaan juuri se määrä kuin sitä kulutetaan. Tällöin hukkaa syntyy huomattavasti vähemmän ja energiatehokkuus paranee.

Osittain edellisiin kohtiin liittyen myös huippukuormitusten löytämisellä on tärkeä rooli paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden parantamisessa. Tarkoituksena on siis löytää missä ja milloin järjestelmässä esiintyy suurin kuormitus. Näin ollen paineilman jakeluverkosto osataan mitoittaa oikein. Lisäksi huippukuormituksilla on suuri vaikutus paineilman varastointitankin tilavuuteen. Varastointitankin tulee olla riittävän suuri, jotta paineilma riittää suuren kuormituksen ajan, mutta toisaalta taas mahdollisimman pieni, jotta järjestelmän energiatehokkuus säilyy. (Seslija et al. 2016)

Yksi tärkeimmistä vaiheista paineilmajärjestelmien energiatehokkuuden parantamisessa on häviöiden minimoiminen. On arvioitu, että joissakin järjestelmissä jopa 50 prosenttia kaikesta tuotetusta paineilmosta menee hukkaan. (Seslija et al. 2016) Suurimpia häviöitä tuottavia asioita ovat järjestelmän vuodot. Vuodot voivat viedä pahimmillaan jopa kaksi viidesosaa kaikesta tuotetusta ilmasta. (Seslija et al. 2016) Yleensä vuodot luokitellaan kahteen osaan. Dynaamisia vuotoja ovat vuodot, jotka tapahtuvat toimilaitetasolla. Tällöin vuotamista tapahtuu vain laitteen ollessa toiminnassa. Staattiset vuodot ovat taas sellaisia, että vuotaminen on käytännössä jatkuvaa. Tällaista vuotamista tapahtuu lähinnä päälinjoissa. (Seslija et al. 2016) Useimmiten vuodot huomataan, kun mitataan ilman paineistamiseen käytettyä aikaa. Muita keinoja ovat lisäksi erilaiset ilmanvirtausmittarit, ultraääni- ja infrapunalaitteet. Ultraäänen käyttäminen vuotojen havaitsemiseen soveltuu

lähinnä paineilmalinjoihin, jotka on toteutettu letkuilla. Infrapunalaitteiden avulla vuodot voidaan havaita sekä letku- että putkilinjoista. (Seslija et al. 2016) Yksi varma tapa huomata vuotokohdat on käydä koko linjasto läpi järjestelmällisesti kohta kohdalta. Tällöin apuna voidaan käyttää erilaisia vuodonilmaisuaineita. Menetelmä on varmatoiminen ja yksinkertainen toteuttaa, mutta se on hyvin aikaa vievä. Vuotokohtien paikallistamisen jälkeen seuraava vaihe on korjata kyseiset kohdat.

Laitteiston kunnossapidolla ja huollolla on erittäin suuri vaikutus paineilmajärjestelmän energiatehokkuuteen. Kunnossapidon laiminlyönnillä energiankäytön tarve lisääntyy ja laitteiston tehokkuus laskee. Lisäksi kunnossapidon puute lyhentää erilaisten komponenttien käyttöikää, mikä voi pahimmassa tapauksessa nostaa kustannuksia huomattavasti laiterikkojen seurauksena. Näistä syistä paineilmajärjestelmän kunnossapidon tulisi olla säännöllistä ja järjestelmällistä. Paineilmajärjestelmän käytönaikainen valvonta liittyy osittain kunnossapitoon. Valvonnan avulla huomataan, jos järjestelmässä ilmenee puutteita tai vikoja, jolloin niihin voidaan puuttua ajoissa. Tarkoituksena on siis seurata, että järjestelmä tuottaa ilmaa, joka vastaa aiemmin asetettuja vaatimuksia. (Seslija et al. 2016)

4 TERÄSSENKAN JÄÄHDYTTÄMINEN PAINEILMALLA

SSAB:n yksi suurimmista tavoitteista on tuottaa täysin hiilivapaata terästä, minkä saavuttamiseksi myös sähkönkulutukseen on kiinnitettävä huomiota (SSAB 2020e). SSAB:n Raahen tehtaalla paineilmaa tarvitaan hyvin suuria määriä ja lähes jokaisessa prosessissa. Paineilmaa käytetään tehtaalla muun muassa laitteita pyörittävänä voimana, puhdistamisen apuvälineenä sekä terässenkkojen jäähdyttämiseen. Tämän seurauksena myös paineilmajärjestelmillä on suuri vaikutus yhtiön hiilidioksidipäästöihin.

Terässenkan jäähdyttäminen on oleellinen osa senkan muurausprosessia, jotta tulenkestäviä tiiliä asentaville henkilöille saadaan taattua turvalliset työskentelyolosuhteet. Vaikka jäähdyttäminen on perusteltua, ei nykyinen jäähdytysmenetelmä ole välttämättä kuitenkaan paras mahdollinen ja menetelmää on mahdollista optimoida tehokkaammaksi.

4.1 Prosessikuvaus

Terässenkan vuorausprosessi lähtee käyntiin muuraamossa vanhan vuorauksen purkamisella. Terässenkka puretaan kaivinkoneella piikkaamalla, jolloin puretaan kaikki tiilet senkan kuonarajalta ja tulenkestävästä massasta puretaan joko osa tai kaikki. (SSAB 2016) Seuraavaksi terässenkka menee käyttöhuoltomiehille tarkastukseen, missä terässenkan kunto tarkistetaan mekaanisilta osin ja tarvittaessa korjataan puutteet (SSAB 2017a).

Purkamisen ja tarkistusten jälkeen terässenkkaan valetaan uusi kulutusvuoraus. Valu aloitetaan asentamalla senkkaan huuhtelukivet sekä valumuotti. Tulenkestävä massa valetaan senkkaan pumpaamalla ja muotti poistetaan seuraavana päivänä massan kuivuttua. Muotin poistamisen jälkeen terässenkka nostetaan kuivaustelineeseen ja senkka kuivataan sähkökuivaimella. Kuivausohjelma kestää noin 68 tuntia ja sen tarkoituksena on poistaa kaikki mahdollinen kosteus, jota massaan on voinut jäädä. (SSAB 2017b) Kuivausohjelma on suunniteltu siten, että terässenkan lämpötilaa nostetaan vaiheittain. Tällöin vältetään massan liian nopealta kuivumiselta, mikä

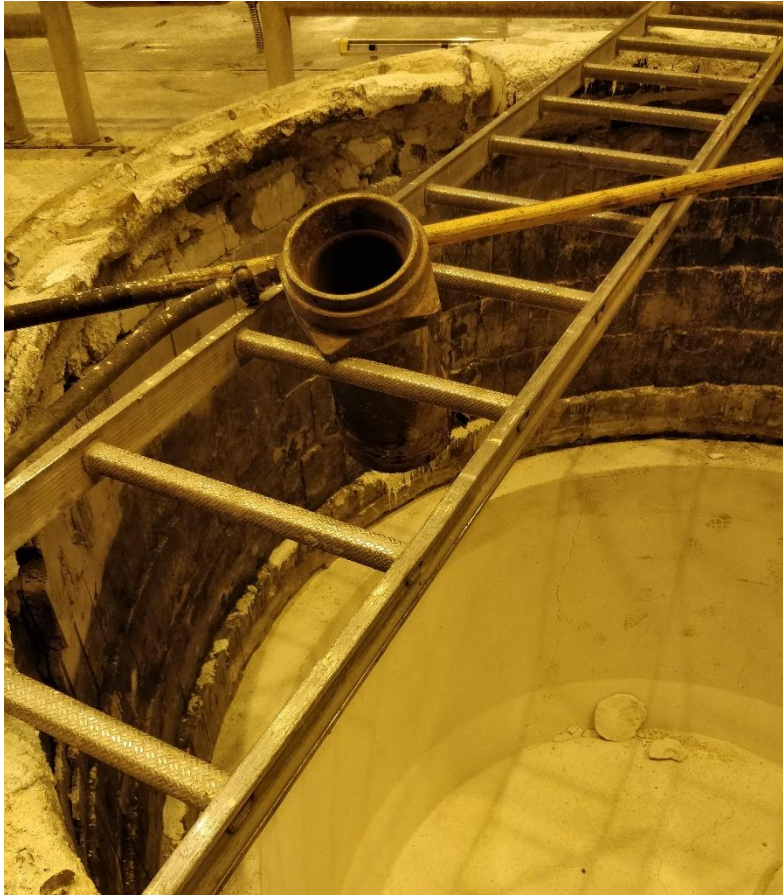
vähentää halkeamien määrää vuorauksessa. Kuivausohjelman loppuvaiheessa vuorauksen lämpötila nousee noin 400 celsiusasteeseen. (SSAB 2011)

Kuivauksen jälkeen terässenkkää jäähdytetään paineilmalla noin 16–18 tuntia, jotta senkka ei ole liian kuuma magnesiumoksidikivien asennusta varten. Terässenkan kuonarajalle asennetaan MgO-C-kivet kiertämällä senkkaa ympäri. Kivien asennuksessa ei käytetä laastia ja jokaisen muuratun varvin jälkeen levitetään magnesiajauhe tiivistämään mahdollisia rakoja kivien välissä. Näiden vaiheiden jälkeen terässenkka on valmis vietäväksi takaisin sulatolle, jossa se voidaan ottaa uudelleen tuotannon käyttöön. (SSAB 2017b)

4.2 Nykyisen prosessin heikkoudet

Suurin ongelmakohta nykyisessä terässenkan vuorausprosessissa on senkan kuivaamisen jälkeinen jäähdytys. Terässenkka kuumennetaan noin 400 celsiusasteeseen, joten ihmisen on mahdotonta mennä asentamaan magnesiumoksidikiviä välittömästi kuivausohjelman päättymisen jälkeen. Tästä syystä vuoraus ja itse terässenkka on saatava jäähtymään riittävästi, jotta senkan sisälle meneminen on mahdollista.

Tällä hetkellä jäähdytys toteutetaan kiinnittämällä paineilmaletkun päähän putki, joka suunnataan terässenkan yläosasta senkan pohjalle. Tämän jälkeen paineilma laitetaan puhaltamaan täydellä paineella ilmaa senkan sisälle. Tarkoituksena on puhaltaa senkkaan viileää ilmaa, joka sisään menessään työntää senkassa olevaa kuumaa ilmaa ylöspäin ja pois senkasta. Alla on esitetty havainnollistava kuva 1 nykyisestä jäähdytysmenetelmästä.



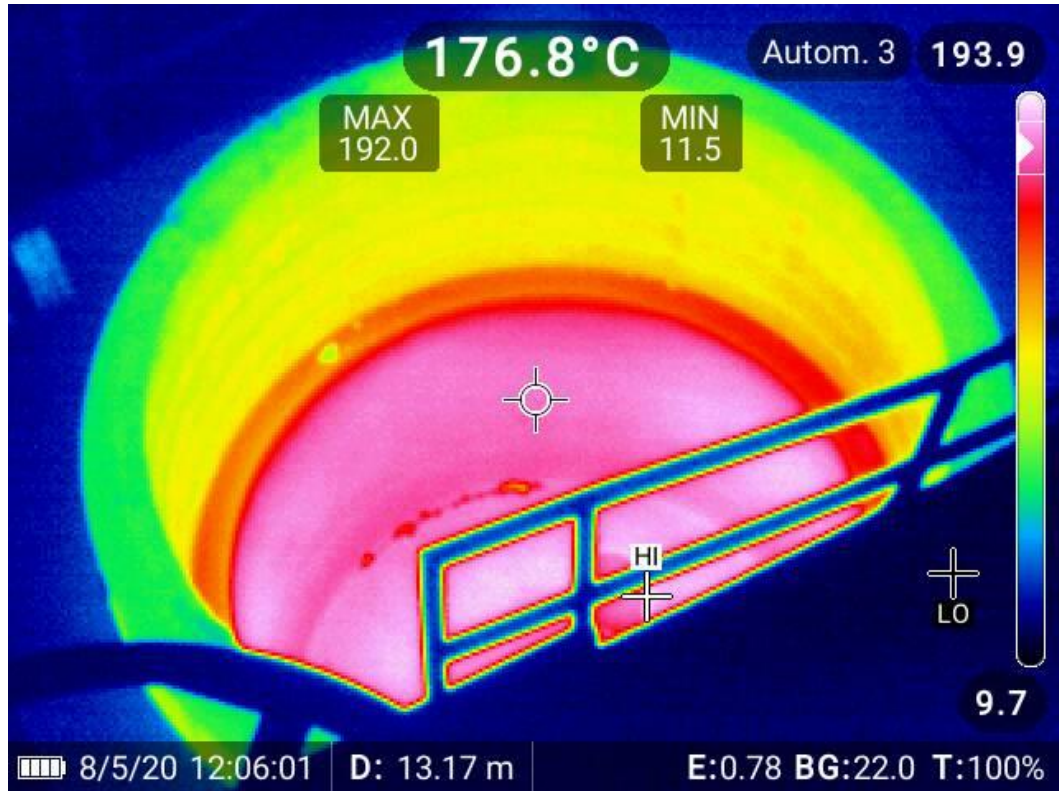
Kuva 1. Nykyinen terässenkan jäähdytysmenetelmä paineilmalla.

Kyseinen jäähdytysmenetelmä aiheuttaa kuitenkin jonkin verran kustannuksia. Järjestelmää ei ole optimoitu mitenkään, joten paineilmaa käytetään todennäköisesti liian paljon. Ilmaa syötetään joko turhan suurella paineella tai liian kauan, jolloin kustannukset nousevat huomattavasti. Toisin sanoen terässenka jäähtyisi riittävästi pienemmälläkin jäähdyttämällä.

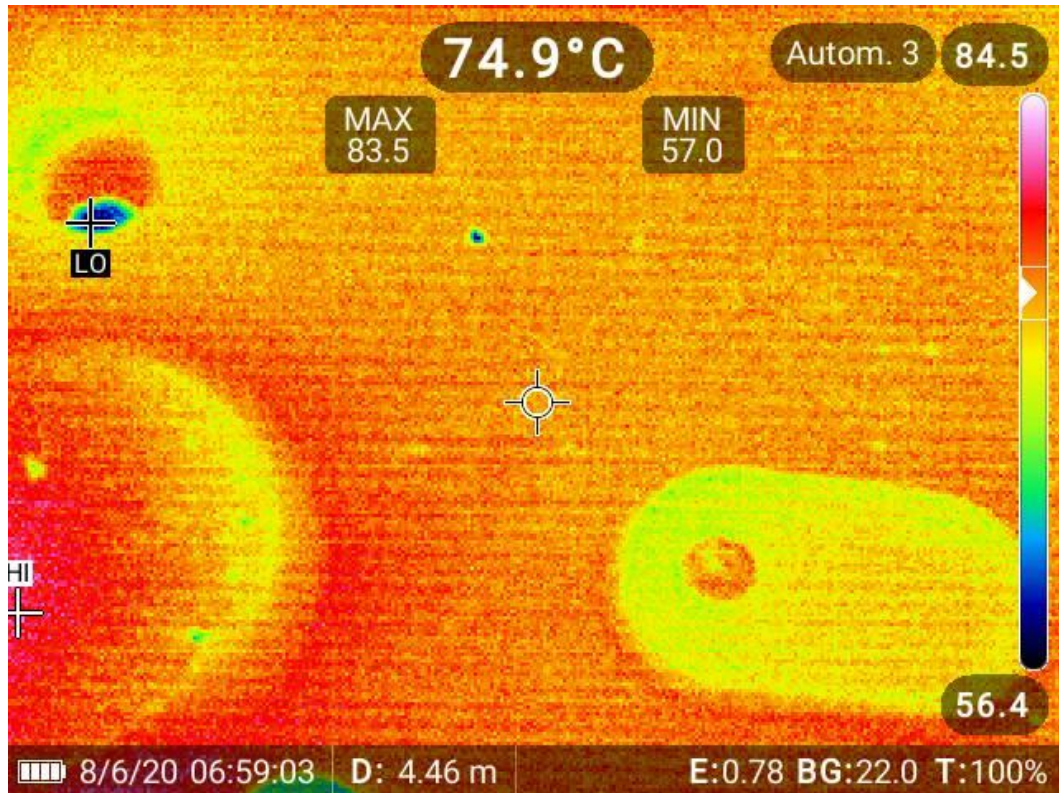
4.3 Mittaukset prosessista

Jotta paineilmajärjestelmän toimivuudesta saataisiin parempi kuva, nykyisestä prosessista suoritettiin lämpötilamittauksia. Lämpötilamittaukset suoritettiin Fluke Ti400-lämpökameralla siten, että kuvassa näkyy yksi pistelämpötila, mittausetäisyys sekä korkein ja matalin lämpötila. Mittaukset toteutettiin kahdelle eri terässenkalle. Molemmat terässenkat kuivattiin muuraamon sähkökuivaimilla kuivausohjelman mukaisesti. Tämän jälkeen toinen terässenkoista nostettiin muurausmonttuun ja siitä mitattiin lämpötila

(Kuva 2). Terässenkan annettiin jäähtyä ilman ulkopuolista jäähdytystä 17 tuntia, jonka jälkeen lämpötila mitattiin uudestaan (Kuva 3).



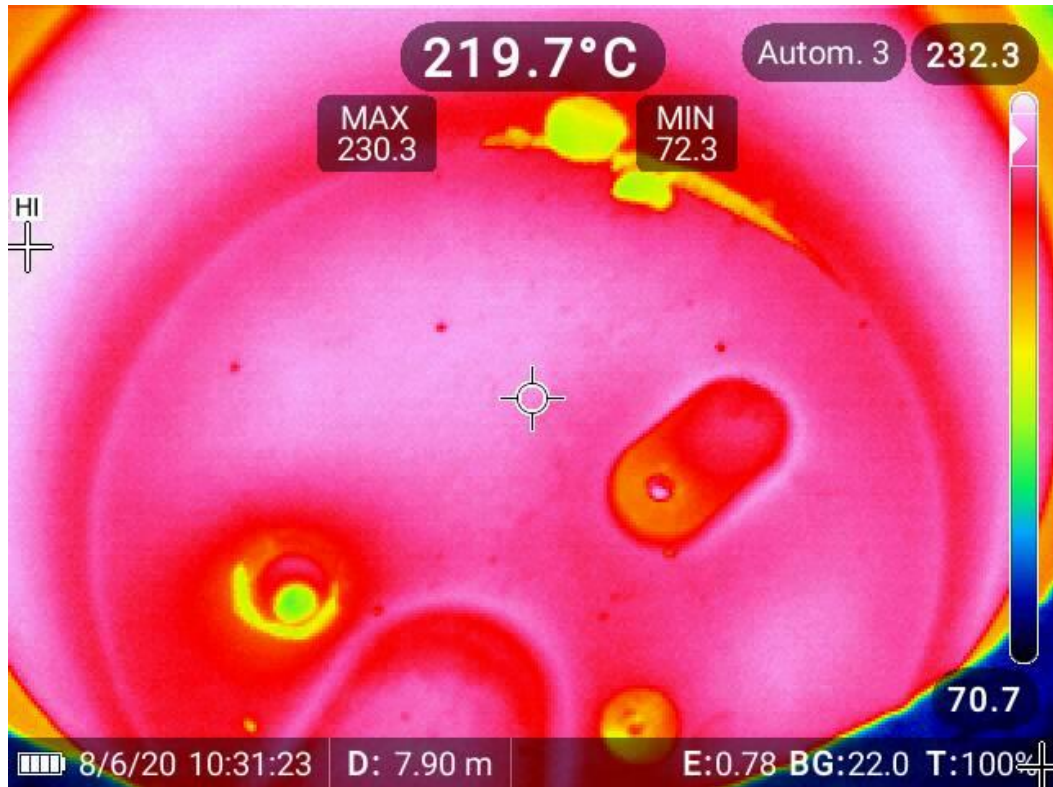
Kuva 2. Terässenkan nro. 21 lämpötila kuivauksen jälkeen.



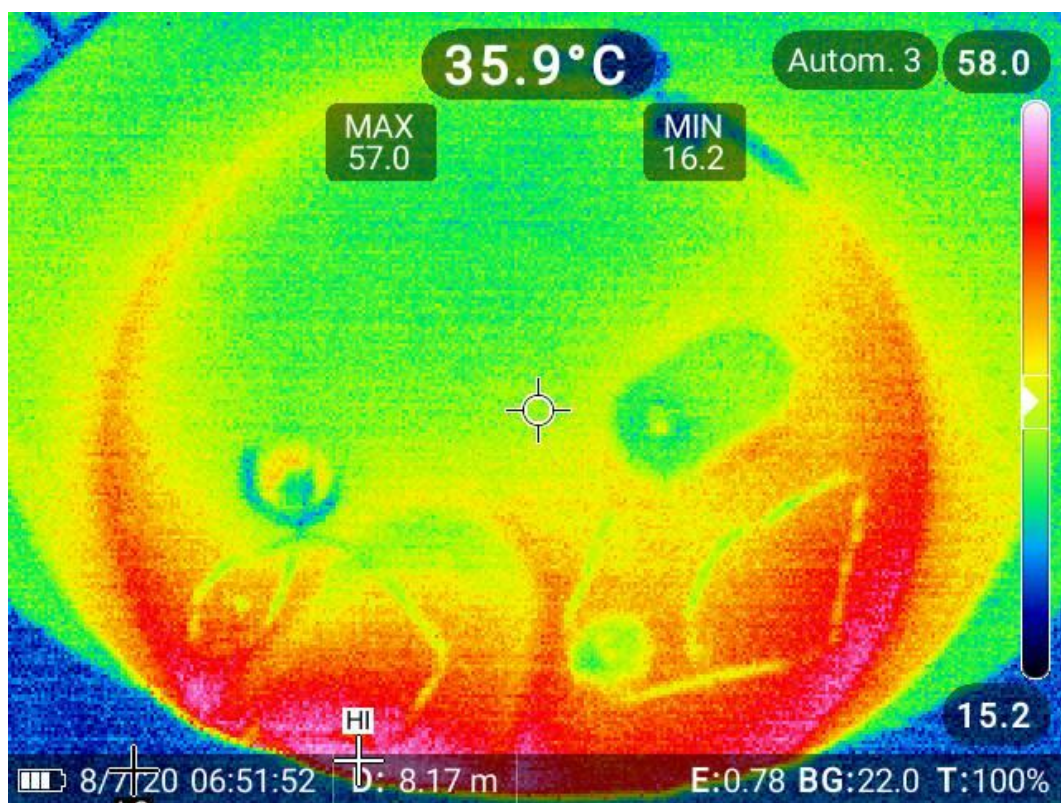
Kuva 3. Terässenkan nro. 21 lämpötila 17 tunnin jäähtymisen jälkeen.

Kuvista 2 ja 3 voidaan havaita, kuinka paljon terässenkan numero 21 lämpötila on muuttunut 17 tunnin aikana. Erityisesti tulee kiinnittää huomiota kuvissa näkyviin maksimilämpötiloihin. Kuvia vertailemalla voidaan havaita, että terässenkka on 17 tunnin itsenäisen jäähtymisen jälkeen liian kuuma, jotta ihminen voisi mennä senkan sisälle.

Toinen terässenkoista (nro. 17) nostettiin kuivaamisen jälkeen muurausmonttuun ja siitä mitattiin lämpötila (Kuva 4). Mittauksen jälkeen terässenkkaa jäähdytettiin kuvan 1 mukaisella paineilmajärjestelmällä 17 tunnin ajan. Tämän jälkeen terässenkan lämpötila mitattiin uudestaan (Kuva 5).



Kuva 4. Terässenkan nro. 17 lämpötila kuivauksen jälkeen.



Kuva 5. Terässenkan nro. 17 lämpötila 17 tunnin paineilmajäähdytyksen jälkeen.

Kuvista 4 ja 5 nähdään paineilmajäähdetyksen vaikutus terässenkan numero 17 lämpötilaan. Noin 17 tunnin jäähdetyksen jälkeen terässenkan lämpötila on laskenut riittävästi ja sen sisälle voidaan mennä asentamaan MgO-C-kiviä. Vaikka kuvassa 5 näkyvä maksimilämpötila voi vaikuttaa korkealta, tulee huomata, että kyseinen lämpötila on pienellä alueella senkan pohjalla.

Lämpötilamittauksista on koostettu taulukko 1, joka havainnollistaa paineilmajäähdetyksen vaikutusta terässenkan lämpötilan muutokseen.

Taulukko 1. Paineilman vaikutus terässenkan jäähtymiseen

	Lämpötila kuivauksen jälkeen		Lämpötila 17 tunnin jälkeen	
	(°C)		(°C)	
	Maksimi	Piste	Maksimi	Piste
Terässenka numero 21	192,0	176,8	83,5	74,9
Terässenka numero 17	230,3	219,7	57,0	35,9

Kuivauksen jälkeisten lämpötilojen erot selittyvät sillä, että terässenka 21 oli muurausmontussa noin kaksi tuntia pidempään ennen ensimmäistä mittausta, joten lämpötila ehti hieman pudota. Suurin merkitys mittauksissa on kuitenkin lämpötiloilla, jotka on mitattu noin 17 tunnin jäähtymisen jälkeen. Tässä huomataan merkittävä ero paineilmalla jäähdetytyn ja itsestään jäähtyneen terässenkan välillä. Tällöin maksimilämpötilojen ja pistelämpötilojen erot saadaan laskettua, kuten yhtälöissä (1) ja (2):

$$83,5 \text{ °C} - 57,0 \text{ °C} = 26,5 \text{ °C} \quad (1)$$

$$\frac{83,5 \text{ °C} - 57,0 \text{ °C}}{83,5 \text{ °C}} \times 100 \% = 31,7 \% \quad (2)$$

Maksimilämpötiloissa on yli 26 celsiusasteen ero, eli noin 32 prosenttia ja pistelämpötiloissa 39 celsiusasteen lämpötilaero, eli 52 prosenttia. Näistä mittauksista

voidaan todeta, että lisäjähdytyksellä on huomattava vaikutus teräsenkan jäähtymiseen ja muurausprosessin jatkamiseen.

4.4 Paineilmalla jäähdyttämiseen kuluva aika

Seuraavassa lasketaan teoreettinen aika, joka kuluu teräsenkan jäähdyttämiseen paineilmalla, kun senkan lämpötila on alussa 200 celsiusastetta ja haluttu loppulämpötila on 40 celsiusastetta. Tilanteessa on kyse pakotetusta konvektiosta, sillä paineistettua ilmaa puhalletaan teräsenkan sisään ja se saa senkassa olevan ilmamassan liikkeelle. Tulenkestävään massaan sitoutunut lämpö siirtyy tämän ilman mukana pois senkasta ja sen seurauksena massauksen lämpötila laskee. Ensimmäiseksi selvitetään, onko virtaus turbulენტista, eli onko Reynoldsin luku (3) suurempi kuin 2300 (Welty et al. 2015, s. 308):

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{1,20648 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 3,1 \text{m}}{1,81277 \times 10^{-5} \text{ Pas}} = 4,12638 \times 10^6, \quad (3)$$

missä ρ on tiheys,
 μ on viskositeetti,
 D on teräsenkan halkaisija ja
 v on paineilman nopeus.

Reynoldsin luvun laskemiseen tarvitaan väliaineen, eli tässä tapauksessa ilman ominaisuuksia. Ominaisuudet on katsottu 293 kelvinin lämpötilassa, joka on paineilman lämpötila kyseisessä tapauksessa (Welty et al. 2015, s. 631):

$$\rho = 1,20648 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1,81277 \times 10^{-5} \text{ Pas}$$

$$Pr = 0,70975$$

$$k = 2,56909 \times 10^{-2} \text{ W/mK}$$

Nyt virtaus on selvästi turbulenttista ja $Re > 10^4$, joten Nusseltin luvun laskemiseen voidaan käyttää Dittus & Boelter yhtälöä (4). Tässä tapauksessa fluidi, eli ilma, lämpenee prosessin aikana, joten yhtälössä $n = 0,4$ (Welty et al. 2015, s. 310):

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^n = 3932,11 \quad (4)$$

Nusseltin luku voidaan laskea myös kaavalla (Welty et al. 2015, s. 278), josta voidaan selvittää lämmönsiirtokerroin h :

$$Nu = \frac{hD}{k}, \quad (5)$$

missä h on lämmönsiirtokerroin,
 D on halkaisija ja
 k on fluidin lämmönjohtavuus.

Nyt lämmönsiirtokertoimeksi saadaan:

$$h = \frac{Nuk}{D} = \frac{3932,11 \times 2,56909 \times 10^{-2} \text{ W/mK}}{3,1 \text{ m}} = 32,5869 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (5)$$

Terässenkan jäähtymisessä on kyse muuttuvan tilan lämmönsiirrosta ja sen analyttinen ratkaiseminen on hankalaa. Tämän seurauksena ratkaisuja on esitetty graafisesti erilaisille geometrioille. Näissä graafisissa ratkaisuisissa on käytetty apuna niin sanottuja dimensiottomia lukuja. (Welty et al. 2015, s. 262) Dimensiottomien lukujen ja taulukoiden avulla voidaan selvittää terässenkan jäähtymiseen kuluva aika. Ensimmäiseksi lasketaan dimensioton lämpötilan muutos (Y):

$$Y = \frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_0} = \frac{293 \text{ K} + 313 \text{ K}}{293 \text{ K} - 473 \text{ K}} = 0,111 \quad (6)$$

Seuraavaksi selvitetään terminen diffuusiokerroin (α) (Welty et al. 2015, s. 277):

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{6 \text{ W/mK}}{3040 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 944 \text{ J/kgK}} = 2,090767 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad (7)$$

missä k on tulenkestävän massan lämmönjohtavuus,
 ρ on tiheys ja
 c_p on tulenkestävän massan lämpökapasiteetti (Ruotanen 2018).

Dimensioton vastus voidaan laskea yhtälöllä:

$$m = \frac{k}{hx_1} = \frac{6 \text{ W/mK}}{32,5869 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \times 0,160 \text{ m}} = 1,15077, \quad (8)$$

missä k on tulenkestävän massan lämmönjohtavuus,
 h on lämmönsiirtokerroin ja
 x_1 on tulenkestävän massan paksuus.

Dimensioton paikka (n) saadaan seuraavasti, koska lämpöä siirtyy vain yhteen suuntaan massauksen takana olevan eristekerroksen vuoksi:

$$n = \frac{x}{x_1} = \frac{0,160 \text{ m}}{0,160 \text{ m}} = 1 \quad (9)$$

Nyt näiden dimensiottomien lukujen avulla voidaan selvittää dimensioton aika kaaviosta (Welty et al. 2015, s.612), jolloin arvoksi saadaan $X=2$. Seuraavaksi voidaan laskea terässenkan jäähtymiseen kuuluva aika dimensiottoman ajan yhtälön avulla:

$$t = \frac{Xx_1^2}{\alpha} = \frac{2 \times (0,160 \text{ m})^2}{2,090767 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 24\,488 \text{ s} \approx 408 \text{ min} \approx 7 \text{ h} \quad (10)$$

Terässenikka on siis riittävän paljon jäähtynyt noin 7 tunnin paineilmajäähdytyksen jälkeen. Lasketaan seuraavaksi, paljonko paineilman tuotannosta aiheutuu kustannuksia tällaisessa jäähdytyksessä. Nykyisessä järjestelmässä paineilmaa virtaa linjastosta 0,47 kuutiometriä minuutissa. Näin ollen 7 tunnin aikana ilmaa virtaa:

$$420 \text{ min} \times \frac{0,47 \text{ m}^3}{\text{min}} = 197,4 \text{ m}^3 \quad (11)$$

SSAB:n Raahen tehtaalla paineilman tuotantohinnaksi on ilmoitettu 0,015 €/m³ (SSAB 2018). Nyt 7 tunnin mittaisen paineilmajäähdytyksen hinnaksi saadaan 2,96 €. Tuloksesta

huomataan, että paineilmajäähdytys on alkuodotuksista poiketen yllättävän edullinen toteuttaa. Lisäksi kyseinen menetelmä on helppo käyttää ja sen avulla voidaan varmistaa riittävä teräksen jäähtyminen. On kuitenkin syytä muistaa, että paineilmaa tarvitaan myös muissa prosesseissa ja sen ylimääräinen käyttö voi vaarantaa muiden prosessien toimivuuden esimerkiksi paineilmalaitteiston ylikuumentumisen vuoksi. Laskuista tulee myös huomata, että ilman jäähdytysprosessin optimointia jäähdytyksen hinta on yli kaksi kertaa kalliimpi. Toisin sanoen, jos paineilmaa puhalletaan nykyisen systeemin mukaisesti 17 tuntia, hinta nousee yli 7 euroon yhtä jäähdytyskertaa kohden. Lisäksi tehtaassa tavoitellessa hiilineutraalisuutta, voivat muut vaihtoehdot olla ympäristöystävällisempiä.

5 TERÄSSENKAN MUURAUSSPROSESSIN MUUTTAMINEN

Teräsenkan muurausprosessia on mahdollista muuttaa kahdella eri tavalla. Ensimmäinen tavoista koskee itse prosessin muuttamista siten, että muurauksen aikaista jäähdystä ei tarvittaisi ollenkaan. Toinen tavoista koskee lähinnä muurausprosessissa käytettäviä materiaaleja. Käytettävien materiaalien muutoksilla on myös mahdollista päästä eroon jäähdystä.

5.1 Prosessi ilman jäähdystä

Teräsenkan muurausprosessi on mahdollista suorittaa ilman prosessin aikana tapahtuvaa jäähdystä. Tämä tarkoittaa kuitenkin sitä, että prosessiaikaa täytyy kasvattaa vähintään yhdellä vuorokaudella. Käytännössä teräsenkkaan valetaan tulenkestävä massa ja senkka kuivataan sähkökuivaimella. Kuivauksen jälkeen teräsenkka nostetaan pois kuivaimelta ja sen annetaan jäähtyä vapaasti ilman ylimääräistä jäähdystä. Kuten kappaleessa 3.3 esitetyistä mittauksista ilmenee, vapaasti jäähtynyt teräsenkka on liian kuuma alle vuorokauden jäähtymisen jälkeen. Jos tähän jäähtymisaikaan lisätään toinen vuorokausi, teräsenkka on jäähtynyt tarpeeksi muurausta varten.

Edellä mainittua prosessimallia, missä jäähdystä ei muurauksena tehdä, on järkevää toteuttaa etenkin silloin, kun tehtaan tuotantotahti on normaalia alhaisempi. Tällaisia tilanteita voivat olla esimerkiksi täysseisakit tai vuosihuolloista johtuvat puolituotantojaksot. Näinä aikoina, kun tuotantotahti on hitaampi, on järkevää pidentää muurausprosessia vähintään yhdellä päivällä, jolloin teräsenkan jäähdystuskulut saadaan käytännössä nolleen. Tällöin saadaan aikaan säästöjä ja voidaan saada umpeen menetetyistä tuotannosta aiheutunutta tappiota.

Seuraavaksi lasketaan teräsenkan teoreettinen jäähtymisaika, silloin kun ulkopuolista jäähdystä ei käytetä. Tarkoituksena on varmistua siitä, että teräsenkka on tarpeeksi jäähtynyt, kun muurausprosessia kasvatetaan yhdellä päivällä. Teräsenkan lämpötila jäähtymisen alussa on todettu olevan 200 celsiusastetta ja jäähtyneen teräsenkan tavoitelämpötilaksi valitaan 40 celsiusastetta.

Ensimmäiseksi on selvitettävä ilman lämmönsiirtokerroin. Tilanteessa on kyse vapaasta konvektiosta, jolloin tiheyserot ja niiden muutos saavat aikaan energian siirtymistä ja näin fluidi alkaa liikkua kiintoaineen pinnalla. Tämän seurauksena systeemin geometrialla on suuri vaikutus lämmönsiirtokertoimiin ja käytettäviin yhtälöihin. (Welty et al. 2015, s. 277) Kyseisessä tapauksessa terässenikka on käytännössä sylinterin muotoinen, josta puuttuu toinen pääty. Vapaassa konvektiossa riittää, että tarkastellaan pelkästään senkan pohjan lämpötilan muutosta, koska kun pohja on jäähtynyt tarpeeksi, myös seinät ovat riittävän kylmiä. Näin ollen tarkastellaan vapaata konvektiota pyöreän levyn pinnalla.

Fluidin ominaisuudet lasketaan filmin keskimääräisessä lämpötilassa (Welty et al. 2015, s. 301):

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{473 \text{ K} + 295 \text{ K}}{2} = 384 \text{ K}, \quad (12)$$

missä T_f on filmin keskimääräinen lämpötila,
 T_s on terässenikan pohjan lämpötila ja,
 T_∞ on fluidin lämpötila.

Seuraavaksi lasketaan Grashofin luku yhtälöllä:

$$Gr = \frac{\beta g \rho^2 L^3 \Delta T}{\mu^2}, \quad (13)$$

missä Gr on Grashofin luku,
 β on lämpölaajenemisen kerroin,
 g on putoamiskiihtyvyys,
 ρ on fluidin tiheys
 L on pituusmuuttuja ja
 μ on fluidin viskositeetti.

Grashofin luvun laskemiseksi haetaan taulukosta ilmalle seuraavat ominaisuudet (Welty et al. 2015, s. 631):

$$\frac{\beta g \rho^2}{\mu^2} = 0,45248 \times 10^8 \text{ 1/Km}^3$$

$$Pr = 0,6914$$

$$k = 3,25022 \times 10^{-2} \text{ W/mK}$$

Pituusmuuttuja L lasketaan:

$$L = \frac{A}{P} = \frac{\pi r^2}{2\pi r} = \frac{r}{2} = \frac{1,55 \text{ m}}{2} = 0,775 \text{ m}, \quad (14)$$

missä A on pinta-ala ja
P on piiri.

Nyt Grashofin luku yhtälön (13) mukaan on:

$$Gr = 0,45248 \times 10^8 \frac{1}{\text{Km}^3} \times (0,775 \text{ m})^3 \times (473 \text{ K} - 295 \text{ K}) = \\ 3,74908 \times 10^9 \quad (13)$$

Seuraavaksi lasketaan Rayleghin luku:

$$Ra = GrPr = 3,74908 \times 10^9 \times 0,6914 = 2,59211 \times 10^9 \quad (15)$$

Vaakasuoralle levyille, jossa kuuma pinta on ylöspäin, saadaan yhtälö Nusseltin luvulle (Welty et al. 2015, s. 302):

$$Nu = 0,14Ra^{1/3} = 0,14 \times (2,59211 \times 10^9)^{1/3} = 192,315 \quad (16)$$

Nusseltin luku voidaan laskea myös kaavalla (Welty et al. 2015, s. 278), josta voidaan selvittää lämmönsiirtokerroin h:

$$Nu = \frac{hL}{k}, \quad (5)$$

missä h on lämmönsiirtokerroin,
 L on pituusmuuttuja ja
 k on fluidin lämmönjohtavuus.

Nyt lämmönsiirtokertoimeksi saadaan:

$$h = \frac{Nuk}{L} = \frac{192,315 \times 3,25022 \times 10^{-2} \text{ W/mK}}{0,775 \text{ m}} = 8,06537 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (5)$$

Muuttuvan tilan lämmönsiirron tapauksissa ratkaisuja on esitetty graafisesti erilaisille geometrioille. Näiden graafisten ratkaisuiden selvittämiseksi tarvitaan niin sanottuja dimensiottomia lukuja. (Welty et al. 2015, s. 262) Teräksen jäähtymiseen kuluva aika voidaan ratkaista käyttäen näitä muuttuvan tilan lämmönsiirron ratkaisuja. Ensimmäiseksi lasketaan dimensioton lämpötilan muutos (Y):

$$Y = \frac{T_{\infty} - T}{T_{\infty} - T_0} = \frac{295 \text{ K} + 313 \text{ K}}{295 \text{ K} - 473 \text{ K}} = 0,101 \quad (6)$$

Seuraavaksi selvitetään terminen diffuusiokerroin (α) (Welty et al. 2015, s. 277):

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{6 \text{ W/mK}}{3040 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 944 \text{ J/kgK}} = 2,090767 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad (7)$$

missä k on tulenkestävän massan lämmönjohtavuus,
 ρ on tiheys ja
 c_p on tulenkestävän massan lämpökapasiteetti (Ruotanen 2018).

Dimensioton vastus voidaan laskea yhtälöllä:

$$m = \frac{k}{hx_1} = \frac{6 \text{ W/mK}}{8,06537 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \times 0,214 \text{ m}} = 3,47627, \quad (8)$$

missä k on tulenkestävän massan lämmönjohtavuus,
 h on lämmönsiirtokerroin ja
 x_1 on tulenkestävän massan paksuus.

Dimensioton paikka (n) saadaan seuraavasti, koska lämpöä siirtyy vain yhteen suuntaan massauksen takana olevan eristekerroksen vuoksi:

$$n = \frac{x}{x_1} = \frac{0,214 \text{ m}}{0,214 \text{ m}} = 1 \quad (9)$$

Nyt näiden dimensiottomien lukujen avulla voidaan selvittää dimensioton aika kaaviosta (Welty et al. 2015, s.612), jolloin arvoksi saadaan $X=4,95$. Seuraavaksi voidaan laskea terässenkan jäähtymiseen kuluva aika dimensiottoman ajan yhtälön avulla:

$$t = \frac{Xx_1}{\alpha} = \frac{4,95 \times 0,214 \text{ m}}{2,090767 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 108\,424 \text{ s} \approx 1807 \text{ min} \approx 30 \text{ h} \quad (10)$$

Näin ollen terässenkan jäähtymiseen vapaalla konvektiolla kuluu aikaa noin 30 tuntia, kun terässenkan halutaan jäähtyvän 40 celsiusasteeseen.

Taloudelliselta kannalta edellä kuvatun kaltainen niin sanottu vapaa jäähtyminen on aina edullisempaa kuin esimerkiksi paineilmalla toteutettu terässenkan jäähdytys. Tämä johtuu siitä, että muurausprosessin aikana terässenkan jäähdytykseen ei tarvita ulkopuolista energiaa. Vapaasti jäähdyttämällä myös ympäristön kuormitus pienenee, kun esimerkiksi sähköenergian tarve häviää. Lisäksi on huomattava, että muun muassa paineilmalla toteutettu jäähdytys, eli niin sanottu pakotettu konvektio, voi aiheuttaa terässenkan vuoraukselle turhia lämpöshokkeja suurien ja nopeiden lämpötilavaihteluiden vuoksi. Näiden edellä mainittujen syiden vuoksi terässenkan olisi hyvä antaa jäähtyä rauhassa ilman ulkopuolista jäähdytystä aina kun se on mahdollista.

5.2 Esipoltetut tiilet

Yksi terästeollisuuden käytetyimmistä vuorausmateriaaleista on magnesiumoksidi-tiilet. Kyseistä materiaalia käytetään terässenkkojen vuorauksessa materiaalin ominaisuuksien vuoksi. Terästeollisuudessa lämpötilat voivat kohota jopa 1700 celsiusasteeseen ja

olosuhteet ovat muutenkin erittäin kuormittavat tulenkestäville materiaaleille. Teräsenkkojen vuoraus joutuu kestävämmän muun muassa kovia lämpöshokkeja sekä syövyttävää kuonaa. (Kujur et al. 2018)

SSAB:n tehtaalla teräsenkka kuivataan sähkökuivaimella tulenkestävän massan asentamisen jälkeen ja kun senkka on jäähtynyt tarpeeksi, siihen asennetaan MgO-C tiilet (SSAB 2017b). Magnesiumoksidi-tiilet asennetaan yleensä vasta teräsenkan kuivaamisen jälkeen, koska tiilistä vapautuu kaasuja ensimmäisen kuumentamisen yhteydessä. Jos kuivaaminen suoritettaisiin tiilien ollessa paikallaan, vapautuisivat nämä kaasut muuraamorakennuksen sisään, mikä voisi aiheuttaa esimerkiksi erinäisiä terveydellisiä haittoja rakennuksessa työskenteleville. Poikkeuksen kyseiseen menettelytapaan aiheuttavat niin sanotut sulattokuivattavat teräsenkat. Näillä tarkoitetaan esimerkiksi senkkoja, joihin tehdään täysin uusi taustavuoraus. Tällöin teräsenkkaan asennetaan MgO-C tiilet heti tulenkestävän massan asennusta seuraavana päivänä. Tämän jälkeen teräsenkka toimitetaan terässulatolle kuivattavaksi kaasukäyttöisille kuivaimille.

Eräs tapa välttää teräsenkan jäähtymistä sähkökuivaimella kuivaamisen jälkeen, on käyttää senkan vuoraamiseen esipoltettuja MgO-C-tiiliä. Esipoltetulla magnesiumoksidi-tiilellä tarkoitetaan tiiltä, joka on lämmitetty tiiliä valmistavalla tehtaalla korkeissa lämpötiloissa (Mayerton 2020). Muurausprosessin kannalta esipoltetun tiilen etuna tavalliseen tiileen verrattuna on sen käryämättömyys. Tiilestä ei vapaudu samaan tapaan kaasuja, koska se on jo valmiiksi lämmitetty korkeissa lämpötiloissa. Tämän seurauksena muurausprosessi voidaan toteuttaa siten, että teräsenkka vuorataan ensin tulenkestävällä massalla. Massan kuivuttua muotti poistetaan ja kuonarakenteelle asennetaan MgO-C-tiilet. Tämän jälkeen teräsenkka nostetaan muuraamon sähkökuivaimelle ja kuivataan kuivausohjelman mukaisesti. Kuivausohjelman päätyttyä teräsenkka on valmis toimitettavaksi terässulatolle tuotannon käyttöön.

Nykyinen muurausprosessi vaatii kokonaisuudessaan aikaa noin viikon. Koska esipoltettuja tiiliä käyttämällä teräsenkka voidaan kuivata tiilien asentamisen jälkeen, saadaan muurausprosessia lyhennettyä vuorokaudella, kun senkkaa ei tarvitse erikseen jäähtyttää. Näin säästetään sekä jäähtytuskustannuksissa, että työvoimakustannuksissa, koska työaika saadaan käytettyä paremmin hyödyksi. Lisäksi vuoden aikana

tuotantomäärä terässenkkaa kohden mahdollisesti kasvaa, kun tuotannosta pois oleva aika lyhenee.

Tehtaalla on käytössä 21 terässenkkaa, joista jokainen käy muurausprosessin läpi noin 10 kertaa vuodessa. Näin ollen yksi terässenkka on vuodessa noin 70 vuorokautta pois tuotannon käytöstä. Yleensä terässenkkoja on riittävästi terästuotannon käyttöön, mutta vuoden aikana voi ilmetä tilanteita, joissa terässenkat eivät riitä täyden tuotannon aikana. Tällaisia tilanteita voi syntyä esimerkiksi, jos jokin tuotantolaite hajoaa muuraamossa. Tällöin terässenkkoja ei saada muurattua riittävän nopeasti ja teräksentuotantokapasiteettia joudutaan pienentämään. Esipoltettuja tiiliä käyttämällä tällaisilta tilanteilta voitaisiin mahdollisesti välttyä, koska muurausprosessi toimisi nopeammin. Näin ollen tehdas voisi välttää terästuotannon tarpeettoman pienentämisen ja liikevaihto kasvaisi.

Esipoltetut tiilet ovat kuitenkin kalliimpia kuin muunlaiset vuorauksessa käytettävät tiilet. Näin ollen terässenkkojen vuorauksenkustannukset nousisivat vuodessa noin 500 000 euroa, jos kaikki senkat vuorattaisiin esipoltetuilla tiilillä. (SSAB 2020f) Tämän seurauksena vuosittaiset materiaalikulustannukset kasvaisivat, mutta toisaalta kyseessä ei ole kovin merkittävä investointi, jos ratkaisun avulla voidaan pitää terästuotantoa paremmin käynnissä ongelmatilanteiden ilmetessä.

6 TERÄSSENKAN JÄÄHDYTTÄMINEN PUHALTIMELLA

Terässenkan muurauksen aikainen jäähdytys on mahdollista toteuttaa myös teollisuuspuhaltimella. Käytännössä jäähdytys toteutetaan siten, että teollisuuspuhaltimeen asetetaan putki, jonka avulla ilma ohjataan terässenkan sisään. Menetelmän toimintaperiaate on siis hyvin samankaltainen kuin paineilmajäähdytyksen. Suurimpana erona näiden kahden jäähdytyksen välillä on ilman lämpötila. Paineilmajäähdytyksen etuna on se, että käytettävä ilma on tasalaatuista ja sen lämpötila pysyy suhteellisen vakiona koko prosessin ajan. Teollisuuspuhallin käyttää puolestaan hallissa olevaa sisäilmaa, jonka lämpötila voi vaihdella rajusti muun muassa vuodenaikojen mukaan. Lisäksi teollisuuspuhallin lämmittää puhallettavaa ilmaa, sitä mukaa kun puhallin kuumenee käytön aikana.

Seuraavaksi lasketaan teoreettinen aika, missä terässenka on jäähtynyt 200 celsiusasteen lämpötilasta 40 celsiusasteeseen. Laskentaan käytetään puhallinta, joka puhaltaa 0,8 kuutiometriä ilmaa sekunnissa halkaisijaltaan 200 millimetriä olevan putken läpi. Puhallettavan ilman nopeus on 23,7 metriä sekunnissa. Laskennassa pyritään ottamaan huomioon puhallettavan ilman lämpiäminen prosessin aikana, joten fluidin ominaisuudet lasketaan filmin keskimääräisessä lämpötilassa (Welty et al. 2015, s. 301):

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{473 \text{ K} + 298 \text{ K}}{2} = 386 \text{ K}, \quad (12)$$

missä T_f on filmin keskimääräinen lämpötila,

T_s on terässenkan pohjan lämpötila ja,

T_∞ on fluidin lämpötila.

Ensimmäiseksi selvitetään Reynoldsin luvun (3) avulla, onko virtaus turbulenttista vai laminaarista (Welty et al. 2015, s. 308):

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{0,9166 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 23,7 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 3,1 \text{ m}}{2,2268 \times 10^{-5} \text{ Pas}} = 3,02419 \times 10^6, \quad (3)$$

missä ρ on tiheys,
 μ on viskositeetti,
 D on teräsenkan halkaisija ja
 v on paineilman nopeus.

Reynoldsin luvun laskemiseksi on selvitetty ilman ominaisuuksia. Ominaisuudet on katsottu filmin keskimääräisessä lämpötilassa, eli 386 kelvinin lämpötilassa (Welty et al. 2015, s. 631):

$$\rho = 0,9166 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 2,2268 \times 10^{-5} \text{ Pas}$$

$$Pr = 0,6911$$

$$k = 3,26458 \times 10^{-2} \text{ W/mK}$$

Virtaus on selvästi turbulenttista, koska Reynoldsin luku on selvästi suurempi kuin 2300. Lisäksi $Re > 10^4$, joten Nusseltin luvun laskemiseen voidaan käyttää Dittus & Boelter yhtälöä (4). Koska fluidin avulla jäähdytetään teräsenkkaa, niin ilma lämpenee prosessin aikana, joten yhtälössä $n = 0,4$ (Welty et al. 2015, s. 310):

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^n = 3034,11 \quad (4)$$

Nusseltin luvun laskemiseen voidaan käyttää myös kaavaa (5) (Welty et al. 2015, s. 278), josta voidaan selvittää lämmönsiirtokerroin h :

$$Nu = \frac{hD}{k}, \quad (5)$$

missä h on lämmönsiirtokerroin,
 D on halkaisija ja
 k on fluidin lämmönjohtavuus.

Nyt lämmönsiirtokertoimeksi saadaan:

$$h = \frac{Nuk}{D} = \frac{3034,11 \times 3,26458 \times 10^{-2} \text{ W/mK}}{3,1 \text{ m}} = 31,9519 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (5)$$

Kuten aikaisemmissakin laskuissa, kyseessä on muuttuvan tilan lämmönsiirto. Näin ollen jäähtymiseen kuluvan ajan ratkaisemiseen käytetään dimensiottomia lukuja. (Welty et al. 2015, s. 262) Ensimmäiseksi lasketaan dimensioton lämpötilan muutos (Y):

$$Y = \frac{T_{\infty} - T}{T_{\infty} - T_0} = \frac{298 \text{ K} + 313 \text{ K}}{298 \text{ K} - 473 \text{ K}} = 0,09 \quad (6)$$

Seuraavaksi selvitetään terminen diffuusiokerroin (α) (Welty et al. 2015, s. 277):

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{6 \text{ W/mK}}{3040 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 944 \text{ J/kgK}} = 2,090767 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad (7)$$

missä k on tulenkestävän massan lämmönjohtavuus,
 ρ on tiheys ja
 c_p on tulenkestävän massan lämpökapasiteetti (Ruotanen 2018).

Dimensioton vastus voidaan laskea yhtälöllä:

$$m = \frac{k}{hx_1} = \frac{6 \text{ W/mK}}{31,9519 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \times 0,160 \text{ m}} = 1,17364, \quad (8)$$

missä k on tulenkestävän massan lämmönjohtavuus,
 h on lämmönsiirtokerroin ja
 x_1 on tulenkestävän massan paksuus.

Dimensioton paikka (n) saadaan seuraavasti, koska lämpöä siirtyy vain yhteen suuntaan massauksen takana olevan eristekerroksen vuoksi:

$$n = \frac{x}{x_1} = \frac{0,160 \text{ m}}{0,160 \text{ m}} = 1 \quad (9)$$

Edellä laskettujen dimensiottomien lukujen avulla voidaan selvittää dimensioton aika kaaviosta (Welty et al. 2015, s.612), jolloin arvoksi saadaan $X=2,8$. Seuraavaksi voidaan laskea teräsenkan jäähtymiseen kuluva aika dimensiottoman ajan yhtälön avulla:

$$t = \frac{Xx_1}{\alpha} = \frac{2,8 \times 0,160 \text{ m}}{2,090767 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 34\,284 \text{ s} \approx 571 \text{ min} \approx 9,5 \text{ h} \quad (10)$$

Näin ollen teräsenkan saadaan jäähtymään teollisuuspuhaltimen avulla riittävästi noin 9,5 tunnin kuluessa.

Edellä laskettu tulos on mielenkiintoinen, sillä sen perusteella teollisuuspuhaltimella toteutettu teräsenkan jäähdytys olisi lähes yhtä tehokas kuin paineilmajäähdytys, kun verrataan käytettyä aikaa. On kuitenkin muistettava, että laskennassa on vaikea arvioida teollisuuspuhaltimella puhalletun ilman lämpiämistä ja tällä seikalla on suuri vaikutus jäähdytysaikaan. Näin ollen paineilmajäähdytyksessä on se etu teollisuuspuhaltimeen verrattuna, että jäähdytykseen käytettävä ilma on tasalaatuista koko prosessin ajan. Näistä syistä teollisuuspuhaltimen käyttö teräsenkan jäähdytyksessä vaatisi käytännön mittauksien suorittamista ja menetelmän kannattavuuden arviointia niiden pohjalta.

7 YHTEENVETO

Työssä tutkittiin erilaisia keinoja terässenkan jäähdyttämiseen muurausprosessin aikana. Tarkoituksena oli selvittää erilaisten jäähdytysratkaisuiden hyviä ja huonoja puolia sekä vertailla niitä keskenään. Erityisesti työssä keskityttiin jo käytössä olevan paineilman avulla toteutetun jäähdytyksen tutkimiseen.

Ensimmäiseksi työssä esiteltiin SSAB:n toimintaa yleisesti sekä käytiin läpi teräksenvalmistusprosessia Raahen tehtaalla, jotta lukijalle muodostuu yleiskuva aiheesta. Seuraavaksi käsiteltiin paineilmajärjestelmiä yleisellä tasolla, kuten myös erilaisia keinoja olemassa olevien paineilmajärjestelmien parantamiseen ja kehittämiseen. Kyseisen luvun tarkoituksena on herättää lukijaa paineilmajärjestelmien monimuotoisuudesta ja niiden käytöstä aiheutuvista kustannuksista sekä keinoista kustannusten minimoimiseen.

Neljännessä luvussa käytiin läpi terässenkan muurausprosessi Raahen tehtaalla ja esiteltiin käytössä oleva menetelmä terässenkan jäähdyttämiseen paineilman avulla. Lisäksi luvussa esiteltiin lämpötilamittauksia prosessista, joiden avulla havainnollistettiin jäähdytyksen tärkeyttä sekä vallitsevia olosuhteita. Kyseisessä luvussa laskettiin myös terässenkan jäähtymiseen kuluva aika, kun käytetään paineilmajäähdytystä sekä jäähdytyksestä aiheutuvat kustannukset.

Viidennessä luvussa käytiin läpi kaksi keinoa, jolla nykyistä terässenkan muurausprosessia on mahdollista muuttaa. Ensimmäinen keinoista oli muurausprosessiin käytetyn kokonaisajan pidentäminen vähintään yhdellä vuorokaudella, jolloin terässenkan voidaan antaa jäähtyä ilman ulkopuolista jäähdytystä. Samalla laskettiin, kuinka kauan tällainen vapaalla konvektiolla tapahtuva jäähdytys vie teoriassa aikaa. Samassa luvussa esiteltiin myös mahdollisuus muuttaa käytettäviä materiaaleja terässenkan vuorauksessa. Esipoltettuja tiiliä käyttämällä muurausprosessia saadaan lyhennettyä vuorokaudella, jolloin voitaisiin varmistaa terästuotannon katkeamattomuus.

Viimeisimpänä, kuudennessa luvussa esiteltiin keino käyttää teollisuuspuhallinta terässenkan jäähdyttämiseen. Myös tässä luvussa laskettiin, kuinka kauan kyseisellä

menetelmällä toteutettava jäähdytys veisi aikaa. Tarkoituksena oli siis tarjota vaihtoehtoinen ratkaisu paineilmalla toteutettavan jäähdytyksen tilalle.

Työssä saadut lopputulokset ovat mielenkiintoisia ja jopa hieman yllättäviä. Odotetusti paineilma todettiin tehokkaaksi menetelmäksi toteuttaa teräksenkan jäähdytys, mutta vastoin odotuksia kyseinen menetelmä on yllättävän edullinen. Myös tulokset teräksenkan vapaasta jäähtymisestä vastaavat hyvin käytännöstä saatuja tietoja ja kokemusta. Teollisuuspuhaltimella toteutetusta jäähdytyksestä saadut tulokset ovat lupaavia, mutta menetelmän käyttöönotto vaatii lisätutkimuksia laskentaan liittyvien monimutkaisuuksien vuoksi.

Yhteenvetona suosittelen hyödyntämään muurausprosessissa teräksenkan vapaata jäähtymistä aina kun se on mahdollista, koska näin säästetään energiaa ja mahdollisesti teräksenkan vuorausta. Totean paineilman hyväksi keinoksi teräksenkan jäähdyttämiseen, mutta turhaa paineilman käyttöä olisi syytä välttää. Näin ollen esimerkiksi paineilmajäähdytykseen käytettyä aikaa olisi syytä rajoittaa nykyisestä ja optimoida prosessi siten paremmin. Kuten luvussa kuusi totesin, teollisuuspuhaltimen käyttäminen teräksenkan jäähdytykseen vaatii lisätutkimuksia ja käytännön kokeita, mutta vaihtoehto tarjoaa kuitenkin erilaisia etuja paineilmaan verrattuna. Teollisuuspuhaltimen avulla jäähdytys voidaan esimerkiksi toteuttaa käytännössä missä tahansa sijainnissa muuraushallissa eikä se ole paikkariippuvainen, kuten paineilmajäähdytys. Viimeisimpänä suosittelen tutkimaan esipoltettujen tiilien käyttämistä teräksenkan vuorauksessa muun muassa muurausprosessin lyhenemisen vuoksi.

LÄHDELUETTELO

Kostukov R., Nachev V. & Titova T., 2019. System Analysis and Opportunities for Optimization of Pneumatic Systems in Manufacturing Plants. TEM Journal, 8 (3), s. 749 – 763.

Kujur M., Roy I., Kumar K., Chintaiyah P., Ghosh S. & Ghosh N., 2018. Raw materials for manufacturing of Superior quality MgO-C bricks. Materials Today: Proceedings, 5 (1), s. 2359 – 2366.

Mayerton, 2020. Products, shaped [verkkodokumentti]. Kiina: Mayerton. Saatavissa: <https://www.mayerton.com/products/shaped> [viitattu 7.9.2020]

Radgen P. & Blaustein E., 2001. Compressed Air Systems in the European Union – Energy, Emissions, Savings Potential and Policy Actions [verkkodokumentti]. Stuttgart: LOG_X Verlag GmbH. Saatavissa: http://air.avexa.se/air/down/eu_compressed_air.pdf [viitattu 4.7.2020]. 162 s. ISBN 3-932298-16-0

Ruotanen K., 2018. Käyttöohjeet-Yleiset ohjeet, AL-9310P, 2183, SSAB Europe Oy [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Kähkönen V. Lähetetty 07.09.2020 klo 12.04 (GMT +0200)

Seslija D. D., Milenkovic I. M., Dudic S. P. & Sulc J. I., 2016. Improving energy efficiency in compressed air systems. Thermal science, 20 (2), s. 355–370.

SSAB, 2011. Teräs- ja panossenkköjen kaasupolttimoiden kuumennuskäyrät. SSAB Raahe eWorx/sisäinen materiaali

SSAB, 2016. Terästuotannon tulenkestävät, Menettelyohjeet, Senkkojen purkaminen. SSAB Raahe eWorx/sisäinen materiaali

SSAB, 2017a. Terästuotannon tulenkestävät, Menettelyohjeet, Käyttöhuoltomies. SSAB Raahe eWorx/sisäinen materiaali

SSAB, 2017b. Terästuotannon tulenkestävät, Työohjeet, Senkkojen vuoraus-, korjaus- ja huoltotyöt. SSAB Raahe eWorx/sisäinen materiaali

SSAB, 2018. Yksikköhinnat, Menettelyohjeet. SSAB Raahe eWorx/sisäinen materiaali

SSAB, 2020a. SSAB-konserni, Tietoja SSAB:stä, SSAB lyhyesti [verkkodokumentti]. SSAB. Saatavissa: <https://www.ssab.fi/ssab-konserni/tietoja-ssabsta/ssab-lyhyesti> [viitattu 18.9.2020]

SSAB, 2020b. SSAB-konserni, Tietoja SSAB:stä, Liiketoiminta, SSAB Europe [verkkodokumentti]. SSAB. Saatavissa: <https://www.ssab.fi/ssab-konserni/tietoja-ssabsta/liiketoiminta/ssab-europe> [viitattu 18.9.2020]

SSAB, 2020c. SSAB-konserni, Tietoja SSAB:stä, Tuotantopaikkakunnat Suomessa, Raahe [verkkodokumentti]. SSAB. Saatavissa: <https://www.ssab.fi/ssab-konserni/tietoja-ssabsta/tuotantopaikkakunnat-suomessa/raahe> [viitattu 18.9.2020]

SSAB, 2020d. SSAB Raahen prosessikaaviot. SSAB Raahe eWorx/sisäinen esittelymateriaali

SSAB, 2020e. SSAB-konserni, Kestävä kehitys, Kestävät toiminnot, HYBRIT [verkkodokumentti]. SSAB. Saatavissa: <https://www.ssab.fi/ssab-konserni/kestava-kehitys/kestavat-toiminnot/hybrit> [viitattu 23.9.2020]

SSAB, 2020f. ARTTU, Varasto, Nimikkeen tiedot. SSAB Raahe ARTTU-järjestelmä/sisäinen materiaali

Vittorini D. & Cipollone R., 2016. Energy saving potential in existing industrial compressors. *Energy*, 102, s. 502 – 515.

Welty J., Rorrer G. & Foster D., 2015. *Fundamentals of momentum, heat and mass transfer*. 6 painos. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte, 658 s. ISBN 978-1-118-80887-0