



# CHALMERS

---



## **Simulering av smältprocess**

### Simulation of meltingprocess

Examensarbete inom maskinteknik (180 hp)

Martin Ohlsson

Asghar Ramezani



Examensarbete 15hp  
Inom högskoleingenjörsprogrammet i maskinteknik

## **Simulering av smältprocess**

Simulation of meltingprocess

Martin Ohlsson  
Asghar Ramezani



**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper  
avdelningen för förbränning  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg & Vetlanda, Sverige 2019

Simulering av smältprocess  
Simulation of meltingprocess  
MARTIN OHLSSON  
ASGHAR RAMEZANI

© Martin Ohlsson & Asghar Ramezani, 2019

Handledare: Karin Munch, Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper  
Handledare: Oskar Altzar, Hydro Extrusion Sweden AB  
Examinator: Karin Munch, Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper

Examensarbete 2019:06:03  
Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper  
Avdelningen för förbränning  
Chalmers Tekniska Högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Telefon +46 31 772 1000

Omslag: Aluminium cylindrar (göt)

Typsatt i Microsoft Word  
Utskriven av [*Name of printing company*]  
Göteborg & Vetlanda, Sverige 2019

# Förord

Detta examensarbete är resultatet av ett samarbete mellan Chalmers tekniska högskola och Hydro Extrusion Sweden AB. Arbetet utfördes under vårterminen 2019.

Vi vill tacka alla som har ställt upp och bidragit till att vi har kunnat genomföra detta arbete. Ett stort tack till våra handledare Karin Munch och Oskar Altzar.

Vi vill också tacka:

Christoffer Johansson, Smätverkschef

Christian Gröhn, Produktionsledare

Christer Svahn, Processtekniker

Tim Porter, Teknisk Utvecklingschef

Oscar Siggeström, Automationstekniker

Smältverkets operatörer

# Sammanfattning

Arbetet handlade huvudsakligen om att hitta ett sätt att beräkna smälttiden för aluminium i en ugn. Statistik som bestod av mätdata och intervjuer samlades in för att beskriva problemet. Från statistiken skapades en lathund avsedd för operatörer. Den beskriver vilken typ av aluminumskrot och i vilken ordning skroten skall skjutas in i ugnen. Teoretiska beräkningar gjordes för att bestämma smälttid, förluster och geometrins inverkan. Simuleringar i *MATLAB* och *COMSOL multiphysics* utfördes för att kontrollera resultaten från beräkningarna.

Slutsatser från beräkningarna och simuleringar verifierades mot verkligheten i produktion. Beräkningarna användes dessutom för att skapa en timer så att operatörerna ska veta när de ska tillsätta aluminium i ugnen. Det visade sig att om aluminium tillsätts vid rätt tidpunkt i ugnen effektiviserar smältprocessen.

# Summary

This thesiswork was mainly about finding a way to calculate the melting time of aluminum in an oven. Statistics that consisted of measurement data and interviews were collected to describe the problem. From the statistics was created a crib intended for operators. It describes the type of scrap aluminum and the order in which the scrap have to be pushed into the oven. Theoretical calculations were made to determine melting time, losses and the influence of geometry. Simulations in *MATLAB* and *COMSOL multiphysics* were performed to check the results of the calculations.

Conclusions from the calculations and simulations were verified against reality in production. The calculations were also used to create a timer so that the operators should know when to add aluminum to the oven. It turned out that if aluminum is added at the right time in the oven, the melting process is made more efficient.

# Innehållsförteckning

<b>1. Inledning</b> .....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte.....	1
1.3 Avgränsningar .....	1
1.4 Precisering av frågeställningen .....	2
<b>2. Teoretisk referensram</b> .....	3
2.1 Process .....	3
2.1.1 Charging.....	4
2.1.2 Smältugn .....	4
2.2 Typ av skrot .....	6
2.3 Smältprocess .....	7
2.4 Aluminiums fysiska egenskaper .....	9
2.4.1 Specifik värmekapacitet.....	9
2.4.2 Aluminiums värmeledningsförmåga .....	9
2.4.3 Energiåtgång för att smälta aluminium .....	10
<b>3. Metod</b> .....	11
3.1 Intervjuer .....	11
3.2 Statistikinsamling .....	11
3.3 Teoretiska beräkningar .....	12
3.3.1 Smälttid .....	12
3.3.2 Smältprocessens förluster .....	13
3.3.3 Geometrins inverkan .....	15
<b>4. Modellering och Analys</b> .....	18
4.1 Matlab modellering.....	18
4.1.1 Matlab statistik plottar.....	18
4.1.2 Matlab simulering .....	20
4.2 Modellering i Comsol Multiphysics .....	21
4.2.1 Beskrivning av simulering.....	21
4.2.2 Temperatur-tid diagram .....	22
4.2.3 Grafisk illustration .....	23
<b>5. Miljö</b> .....	25
5.1 Energiåtgång för framställning av ren aluminium .....	25
5.2 Koldioxidavtryck .....	25



<b>6. Verifiering</b> .....	27
6.1 Verifiering av formens betydelse .....	27
6.2 Verifiering av Lathund .....	27
6.3 Verifiering av beräkningar i produktion.....	27
<b>7. Resultat</b> .....	29
7.1 Modellering i Matlab .....	29
7.2 Chargerering med hjälp av Lathund och beräkningar .....	30
7.3 Chargetimer .....	30
<b>8. Diskussion</b> .....	31
<b>9. Slutsats</b> .....	32
<b>Referenser</b> .....	33
<b>Bilagor</b> .....	34

# Terminologi

**Bad:** Smält aluminium

**Badtemperatur:** Det smälta aluminiumets temperatur.

**Brygga:** Den första delen av smältugnen, där blöt skrot torkas innan den skjuts in i smältbadet.

**Charger:** Vagnen som aluminiumskrotet lastas på.

**Charging:** En inskjutning av aluminiumskrot i ugnen, synonym till sättning.

**Chargetimer:** Timer som bestämmer när aluminium ska tillsättas i ugnen.

**Extrudering:** Strängpressning, tillverkningsprocess för profilerna.

**Göt:** Långa solida cylindrar vilka är slutprodukten av smältverket.

**Kokill:** En typ av gjutform.

**LNI (Low Nitrogen Injection):** En typ av brännare.

**Smälta:** Smält aluminium.

**Sättning:** En inskjutning av aluminiumskrot i ugnen, synonym till charging.

**Taktemperatur:** Temperaturen vid taket i smältugnen.

**Tapphål:** Hålet där smältan tappas ut ur ugnarna.

**Tap to tap:** Tiden för en smältproces, alltså tiden då smältugnen tappas på smälta tills att nästa smälta töms.

**Travers:** En typ av lyftkran.

# 1. Inledning

## 1.1 Bakgrund

Nedsmältningen av aluminiumskrot på Hydro Extrusions smältverk i Sjunnen förlitar sig idag på främst erfarenhet hos operatörerna. För att effektivisera detta bör smältningen simuleras för att kunna skapa en mer effektiv process och för att operatörerna ska veta när de ska tillsätta mer skrot i ugnen. Det finns metoder för att beräkna detta idag men de förlitar sig på antagande och rådande erfarenheter. En simulering av processen skulle därför hjälpa till att effektivisera detta.

## 1.2 Syfte

Projektet syftar på att effektivisera smältprocessen med avseende på tid, samtidigt ska processens säkerhet hålla samma nivå eller förbättras. Smältprocessen ska också undersökas ifall det finns möjligheter att göra förändringar som kan öka produktionskapaciteten. Slutresultatet ska dessutom verifieras i produktion

Projektet ska på sikt leda till en mer automatiserad process, så att operatörerna inte ska behöva avgöra när det är lämpligt att skjuta in aluminiumskrotet i ugnen utan det ska signaleras till dem.

Även om företaget inte har gett oss det som uppgift är vi intresserade att undersöka processens hållbarhetsaspekt. Alltså hur mycket energi behövs för att återvinna det material som redan finns jämfört med att producera nytt aluminium.

## 1.3 Avgränsningar

Nedan redogörs de avgränsningar som kommer göras i projektet. Verkligheten är komplicerad, därmed kommer ett antal antagande göras för att göra modellen mer lätthanterlig.

- Endast smältugnen och chargeringen ska studeras detaljerat.
- Inga fysiska detaljsimuleringar.
- Smältprocessen kommer endast studeras från start till att det sista aluminiumet har börjat tappas ut ur ugnen.(tap to tap tid)

## 1.4 Precisering av frågeställningen

Frågeställningen preciseras från syftet med följande punkter.

- När ska aluminiumskrotet tillsättas i ugnen för att få en optimal smälttid?
- Hur mycket kan processen optimeras jämfört med den nuvarande?
- Hur ska operatörerna veta när det är dags att tillsätta skrot i ugnen?
- Hur ska operatörerna tillsätta skrot i ugnen?
- Vilka förbättringar kan göras i den befintliga processen?
- Vilka säkerhetsaspekter ska tas hänsyn till?
- Vilka säkerhetsaspekter kan förbättras?
- Hur påverkar typen av skrot smältprocessen?
- Hur tas hänsyn till miljöaspekter i processen?

## 2. Teoretisk referensram

I detta kapitel beskrivs den teoretiska bakgrund som ligger till grund för projektet.

### 2.1 Process

Processen i smältverket kan generellt delas in i fem steg. En kort beskrivning av det centrala i varje steg följer nedan. En schematisk bild över de olika stegen kan ses i figur 1.

#### Charger

Processen börjar med att chargeringsvagnen lastas med aluminiumskrot med en hjullastare, när vagnen är full åker den automatiskt efter aktivering till smältugnen och skjuter in aluminiumskroten.

#### Smältugn

I smältugnen smälts sedan totalt cirka 30 000 kg aluminium, som motsvarar 5-7 st chargeringsvagnar. Ett prov tas ur smältugnen för att beräkna hur mycket legeringsämnen som ska tillsättas. Efter att aluminiumet har smält och rörts om med en elektromagnetisk omrörare i cirka 2 timmar, transporteras det vidare via ett rännsystem till hållugnen.

#### Hållugn

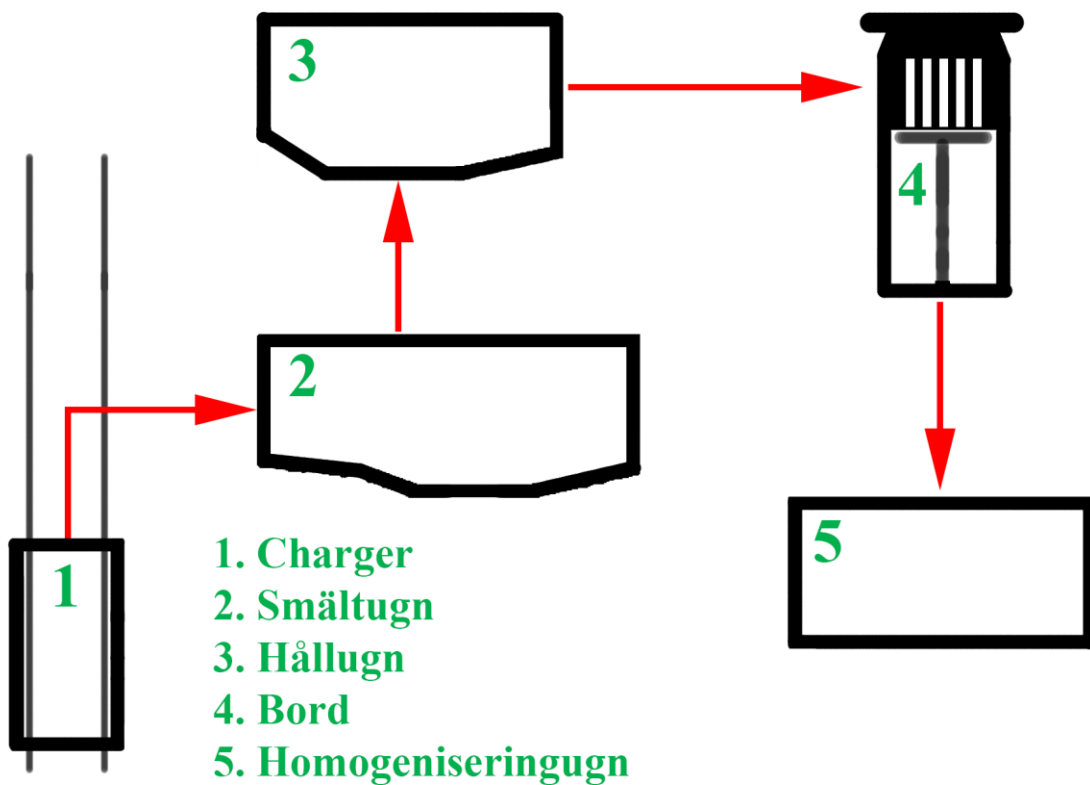
Smältan transporteras till hållugnen efter att badtemperaturen har nått rätt temperatur. I hållugnen sjunker också eventuella föroreningar till botten. Det tas ett ytterligare prov i hållugnen, för att kontrollera kvaliteten samt säkerställa att det finns rätt mängd av de olika legeringsämnena. Smältan hålls i hållugnen i cirka en timme för att sedan transporteras till gjutbordet. Ett annat viktigt syfte med hållugnen är att man kan hålla smältan medans smältan bli klar för gjutning och börja med en ny smältprocess i smältugnen.

#### Gjutbord

Efter att smältan har kontrollerats transporteras den till gjutbordet. Det finns två olika gjutbord med olika diametrar. Smältan rinner sedan via en kanal till gjutbordet som består av 18 eller 22 st kokiller. Samtidigt som smältan formar sig efter kokillen så åker den ner in i marken medans de kyls ner långsamt först med hjälp av luft som är blandad med olja och sedan med vatten. Det sista provet tas efter att gjutbordet är fyllt, provresultatet lämnas sedan till kunden. Metoden kallas för "*airslip casting*" och resulterar i ett göt av hög jämn kvalite utan luftbubblor. När gjutningen är klar lyfts göten med en travers och läggs på ett transportband som transporterar dem till homogeniseringsugnen.

#### Homogeniseringsugn

Cylindrarna transporteras sedan till homogeniseringsugnen. Götet värms upp till cirka 600°C och sedan kyls ner med hjälp av luft och vatten. De färdiga göten kapas av en bit i båda ändarna för att säkerställa slutproduktens sammansättning. Sedan är cylindrarna färdiga för att användas i produktion.



**Figur 1:** Schematisk bild över de olika stegen i processen.

### 2.1.1 Chargering

Chargeringsvagnen laddas med ca 3000 - 6000 kg aluminiumskrot beroende på geometrin av skroten. Det finns flera olika typer av skrot vilket medför olika kombinationer av hur vagnen kan lastas. Utifrån erfarenhet använder de mest erfarna operatörer följande metod:

- Den första och andra laddningen består av långa och ihåliga profiler, eftersom enligt operatörerna kyler inte denna skrot ner ugnen lika mycket och den smälter snabbare jämfört med de tyngre och solida skroten. Detta gör att man har ett bad av aluminium i ugnen som innehåller mycket värmeenergi.
- Den tredje och fjärde laddningen innehåller blandad skrot med lång och ihålig samt tyngre och solid skrot som placeras i mitten av ugnen.
- Den sista laddningen består av lång och ihålig skrot eller annan typ av lätt skrot. Eftersom då skjuter man ner den resterande skroten i aluminumbadet. Lättare skrot med hålrum medför också att de går snabbare att smälta.

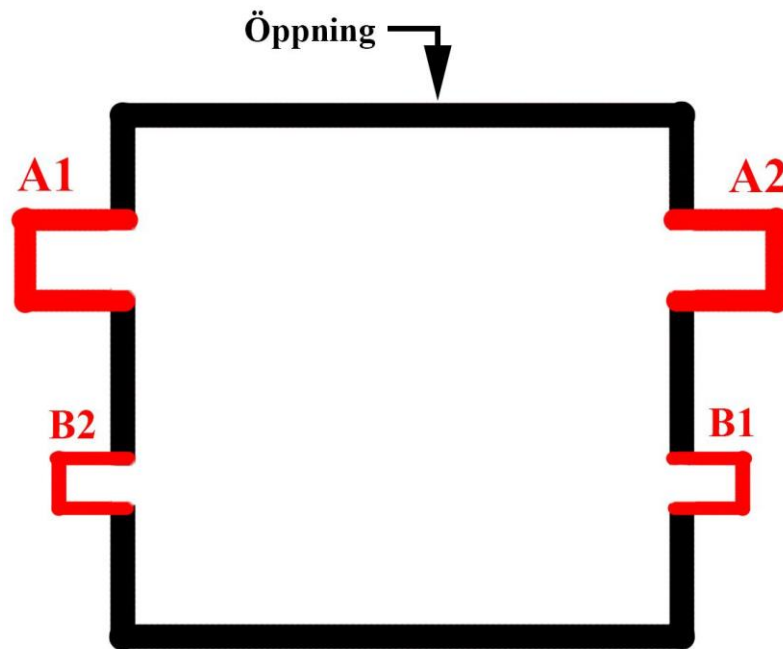
### 2.1.2 Smältugn

Smältningen sker i en gasoleldad ugn med LNI system. Ugnen har fyra brännare med två olika i varena sida (A brännarna är större än B brännarna). Brännarna arbetar växelvis, alltså i var sin sida bränner en brännare och den andra suger in luft (t.ex A2 och B1 bränner medans A1 och B2 suger in luft). Detta medför att det blir ett luft-värme flöde inuti i ugnen. LNI systemet funkar på så sätt, att det finns rör i ugnen som sprutar gasol som självantänds så att det finns eld över hela ugnen istället för att värmen blir koncentrerad på en punkt. Insidan av

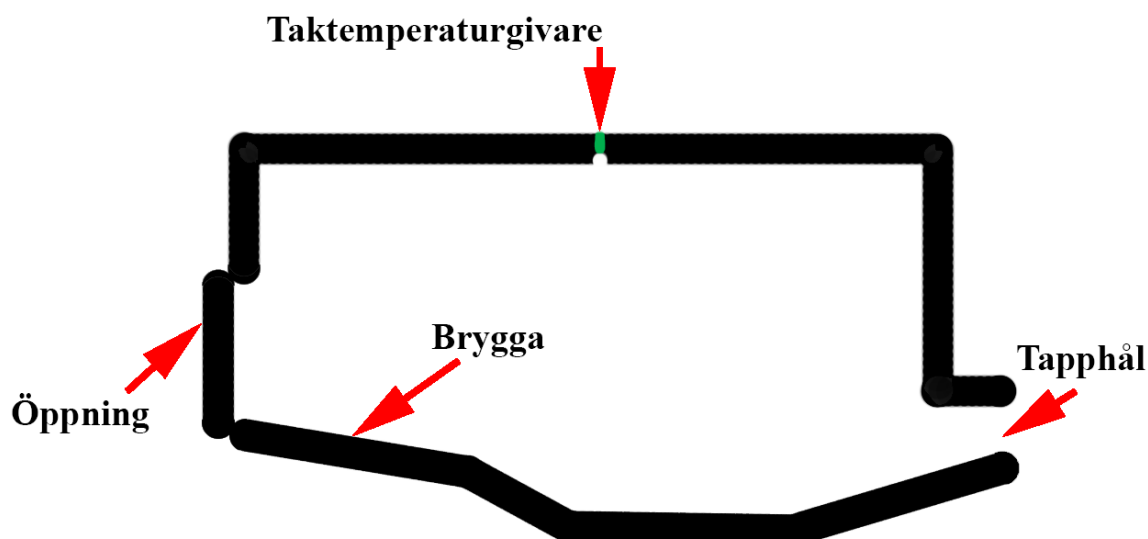
ugnen är isolerad med en typ av keramisk legering. Smältugnen sett ovanifrån representeras i figur 2.

Ugnen består av två delar; en brygga och en smältplats. Taktemperaturgivaren sitter inskjuten i taket på smältugnen för att den ska påverkas mindre av varierande lufttemperatur, medans badtemperaturgivaren sitter en bit ifrån botten. Detta medför att badtemperaturen visas rätt efter att man har smält 15 000 -20 000 kg aluminiumskrot.

Bryggan möjliggör att skrotet glider ner långsamt. Det medför att förekommande vatten hinner avdunsta och bryggan minskar risken för att blöt skrot rullar ner i smältbadet. Detta är en säkerhetsaspekt med tanke på att det finns risk för explosion om det finns ett smält bad och om det kommer in vatten, eftersom då expanderar vattenmolekylerna mycket på grund av den stora temperaturskillnaden. Under smältbadet finns en elektromagnetisk omrörare som sätts igång automatiskt. Omrörare är igång i ungefär 120 minuter eller tills smälttemperaturen är ca 740°C. Syftet med magnetomröraren är att den skyndar på smältprocessens slutfas, det ger metallen en homogen sammansättning. Smältugnen sett från sidan visas i figur 3.



**Figur 2:** Toppvy över smältugnen.



**Figur 3:** Sidovy över smältugn.

## 2.2 Typ av skrot

Den aluminiumskrot som smälts kan delas in enligt följande, Massiv-, medeltung- och lätt skrot. En stor del av skroten består av strängpressade profiler med mycket varierande geometri. Ju massivare skroten är desto mer aluminium kan lastas på chargeringsvagnen och desto längre blir smälttiden. En illustration av de vanligaste förekommande skrottyperna kan ses i figur 4. En beskrivning av de olika skrot typerna följer nedan.

### Massiv skrot

Den massiva skroten består av skrot som är solid eller har en tjock tvärsnittsarea. Den innefattar bland annat götändar som är tjocka solida cylindrar, extruderade tjocka profiler samt klippt skrot. En chargeringsvagn lastad med massiv skrot väger mer jämfört med om den vore lastad med de andra skrottyperna.

### Medeltung skrot

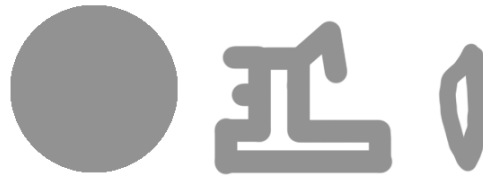
Medeltung skrot utgörs av medeltjocka profiler med en del luft emellan. Dessa är vanligtvis långa. Vid en jämn blandning mellan massiv och lätt skrot i chargeringsvagnen kan medeltung skrot antas.

### Lätt skrot

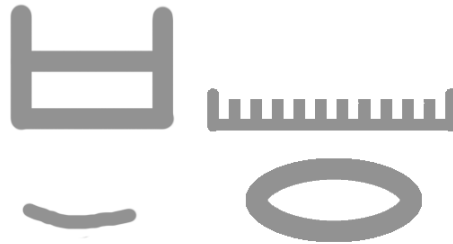
Den lätta skroten består av smala profiler med mycket luft emellan. De profiler med stort hålrum är vanligtvis långa. Detta medför att en chargeringsvagn lastad med lätt skrot väger minst jämfört med om den vore lastad med de andra skrot typerna.



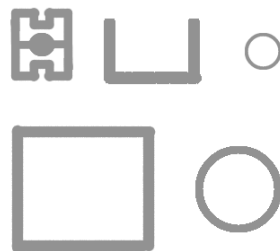
### Massiv skrot



### Medeltung skrot



### Lätt skrot

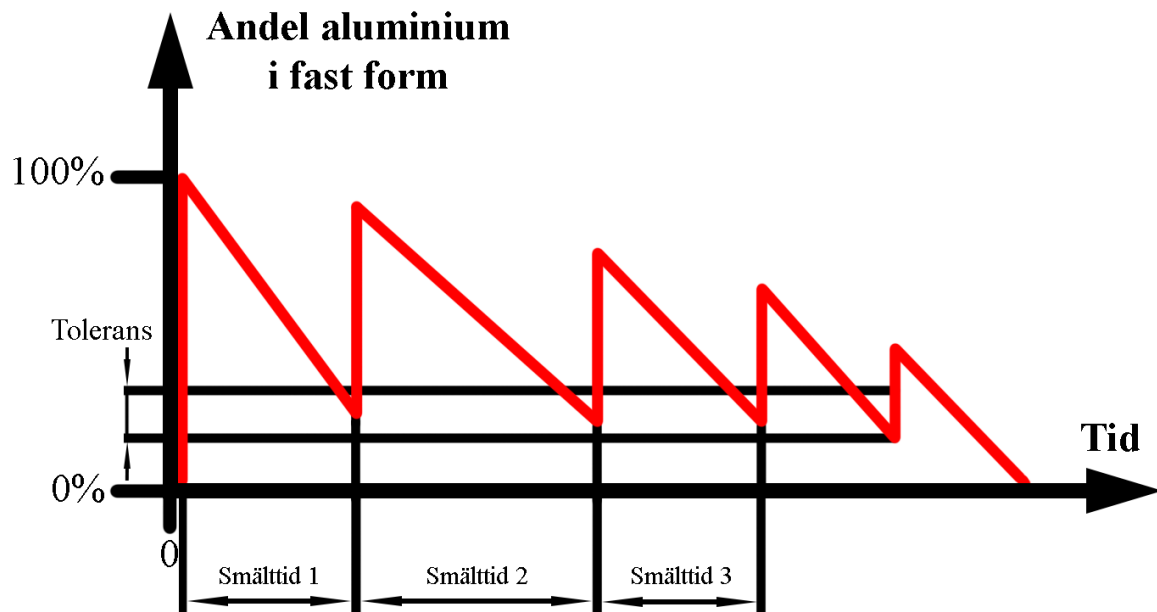


**Figur 4:** Exempel på skrot typernas tvärsnitt.

## 2.3 Smältprocess

För att kunna beräkna när aluminiumskrot ska tillsättas i ugnen vid en smältprocess är det av central betydelse att veta hur stor del av aluminiumet i ugnen som befinner sig i fast form. Det innebär att vid beräkningar måste hänsyn tas till föregående inskjutningar.

Någon form av tolerans måste definieras när det är lämpligt att göra en inskjutning. Om en inskjutning görs för tidigt blir processen ineffektiv, om en inskjutning görs för sent finns risken att skrotet skjuts in i ett helt smält aluminiumbad vilket riskerar göra processen osäker. Någon säkerhetsåtgärd bör läggas till om toleransen passeras. En illustration av problemet ses i figur 5.



**Figur 5:** *Aluminium i fast form i smältugnen över tid.*

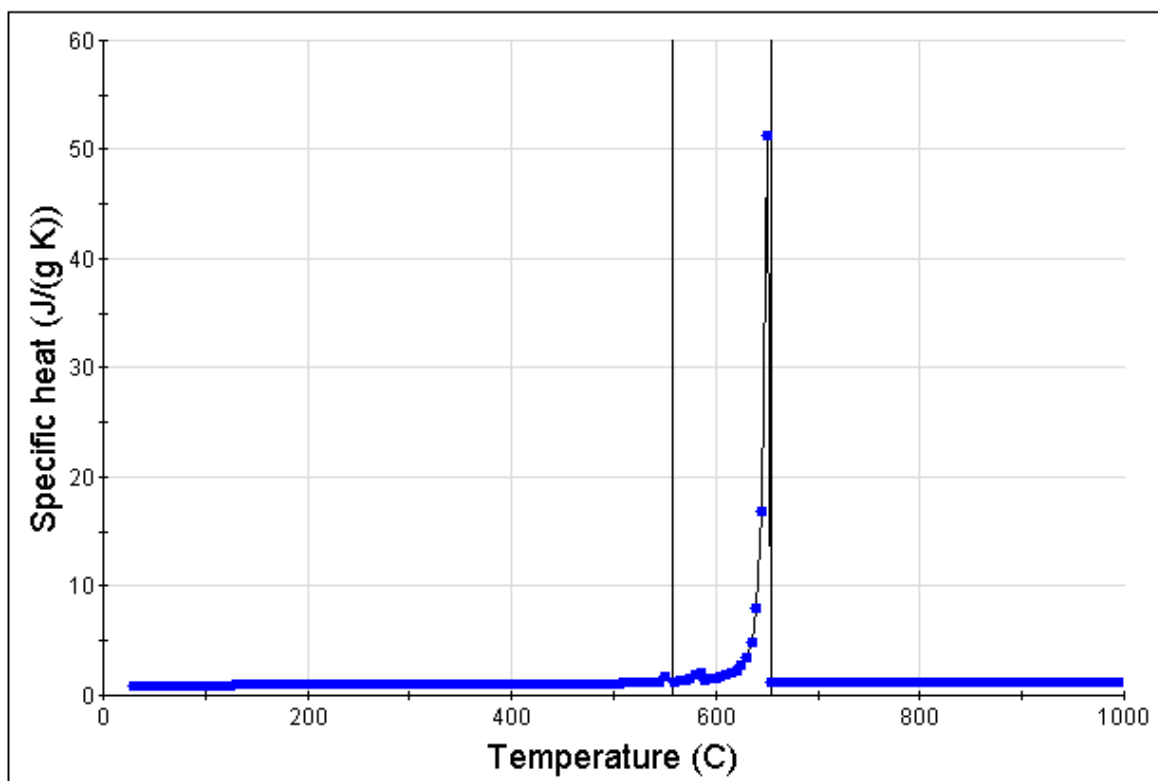
## 2.4 Aluminiums fysiska egenskaper

Energiåtgången för att smälta ett material är beroende av dess specifika värmekapacitet och värmeledningsförmåga. Alltså den mängden energi som krävs för att värma upp ett kg av ett ämne en Kelvin och egenskapen hos materialet att leda värme.

### 2.4.1 Specifik värmekapacitet

Värmekapaciteten är uppskattningsvis konstant före och efter fasomvandling för aluminium, detta visas i

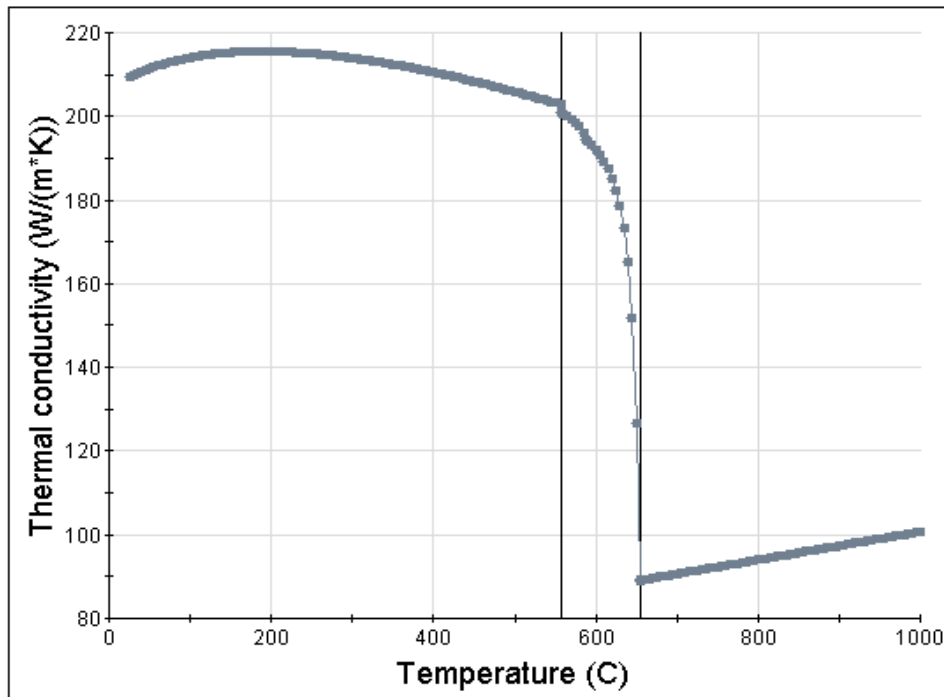
figur 6 som har simulerats med hjälp av *JMat Pro*. Enligt simuleringen så krävs det betydligt mer energi för att värma aluminium en grad när materialet närmar sig smälttemperaturen jämfört med den normala behandlingstemperaturen. Detta beror på att det är vid gränsen till fasomvandling och då krävs det mycket energi för att bryta ner bindningarna mellan de solida aluminiumets molekyler.



**Figur 6:** Diagram över specifika värmekapacitet före och efter fasomvandling  
(*Thermophysical Properties of solid and Liquid Aluminium, simulated with JMat Pro*)

### 2.4.2 Aluminiums värmeledningsförmåga

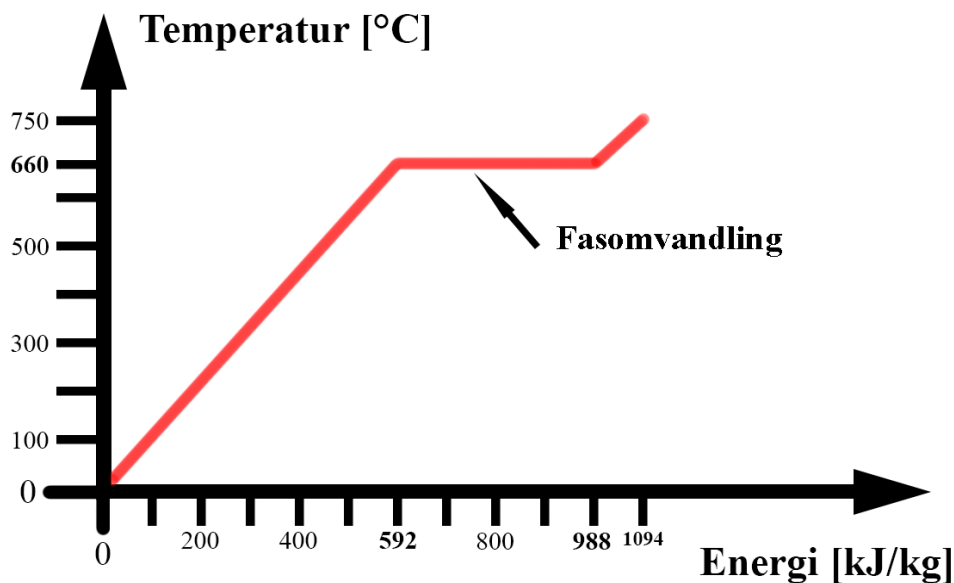
Aluminium har en mycket god värmeledningsförmåga. Aluminium hamnar på fjärde plats i värmeledning bland grundämnen med silver, koppar och guld före. Vid fasomvandlingen från solid till flytande aluminium sänks dock värmeledningsförmågan med strax över 50%, se figur 7. På grund av denna anledningen bör solider undvikas att skjutas ner i aluminiumbadet i smältugnen. Figur 7 beskriver aluminiumets värmeledningsförmåga som funktion av temperaturen.



**Figur 7:** Diagram över aluminiumets temperatur med avseende på värmeledningsförmåga. (Thermophysical Properties of Liquid Aluminium, simulated with JMat Pro)

### 2.4.3 Energiåtgång för att smälta aluminium

Energiåtgången som krävs för nedsmältning av aluminium är beroende av värmekapaciteten och värmeledningsförmågan vilket har nämnts tidigare i kapitel 2.4. Notera att fasomvandlingen tar upp motsvarande andel energi som att värma upp solid aluminium till 450 °C. Detta beror på att samtidigt som den specifika värmekapaciteten ökar kraftigt då temperaturen närma sig smälttemperaturen så minskar värmeledningsförmågan. Alltså det krävs mycket energi för att öka temperaturen en grad och för att värmen ska ledas genom hela kroppen. Figur 8 illustrerar erforderlig energi för att värma upp aluminium.



**Figur 8:** Diagram över erforderlig energi för att värma upp aluminium till 750 °C.

## 3. Metod

I detta kapitel redovisas hur arbetet har genomförts och vilka metoder som har använts. Intervjuer, statistikinsamling, MATLAB beräkningar är de metoder som har använts under projektet.

### 3.1 Intervjuer

Ett antal intervjuer har gjorts med de mest erfarna på företaget samt experter inom området. Intervjuer med operatörer gjordes under arbetspasset med öppna frågor med syftet att informera oss om hur smältugnen fungerar och härigenom få en bättre förståelse för de faktorer som påverkar smältprocessen. En intervju gjordes med en av de mest erfarna av operatörerna samt en processtekniker. Detta genom att ta fram ett frågeformulär [Se bilaga 3] på de mest relevanta och intressanta områden såsom miljö, säkerhet, smältprocess, etc. [Se bilaga 3]. Dessa intervjuer resulterade i en lathund(Chargering instruktion) [Bilaga 4, 5], samt besvarade andra frågor som är anknutna till problemet.

### 3.2 Statistikinsamling

Innan beskrivningen av lathunden arbetade operatörerna på olika sätt, det vill säga operatörerna använde sig av olika strategier i de olika sättningarna för att fylla vagnen med aluminiumskrot. Detta leder i sin tur till en ojämn produktion samt varierande tap to tap tid, detta tycktes vara intressant. För att kunna se vilken metod är effektivast gjordes en enkät [Se bilaga 1] för hela smältprocessen, operatörerna fyller i vilken typ av skrot de chargerar maskinen med i varje sättning. Sedan för att kunna undersöka processen noggrannare valde vi att ha med andra faktorer såsom tid, temperatur före och efter chargering (båda badtemperatur och taktemperatur) med i enkäten. [Se figur 6, 7 och 8]

### 3.3 Teoretiska beräkningar

Teoretiska beräkningar gjordes för att utgöra grunden till en modell som beskriver smältprocessen. Beräkningar gjordes av smälttiden, ugnens verkningsgrad och för att bestämma inverkan av olika geometrier på aluminiumskroten.

#### 3.3.1 Smälttid

Smälttiden för aluminium beräknades genom att beräkna energin som krävs för att smälta aluminium och dividera den med smältugns effekt. Då endast aluminiumets massa är obekant får en funktion som smälttiden med avseende på massa. Data för beräkningen ses i tabell 1.

Antagande:

- Ugnstrycket är konstant under smältprocessen.
- Aluminiumets temperatur innan inskjutning i ugnen antas vara 20 °C.
- Aluminiumet antas vara rent från legeringsämnen och föroreningar, vilket ger en smältpunkt på 660 °C.

Smälttiden ges av:

$$t = \frac{Q_{Al}}{P_{ugn}} = \frac{J}{J/s} = s \quad \dots (1)$$

Energien som krävs för att smälta aluminium:

$$Q_{Al} = m * (C_p * \Delta T + H_{Al}) = m * (C_p * (T_{smält} - T_{rum}) + H_{Al}) \quad \dots (2)$$

Effekten som går åt för att smälta aluminium:

$$P_{ugn} = \eta_{ugn} * P_{Brännare} \quad \dots (3)$$

Detta resulterar i:

$$t = \frac{Q_{Al}}{P_{ugn}} = \frac{m * (C_p * (T_{smält} - T_{rum}) + H_{Al})}{\eta_{ugn} * P_{Brännare}} \quad \dots (4)$$

**Tabell 1:** Data för beräkning av smälttiden.

$m$	–	Aktuell inskjutningsmassa
$C_p$	897 J/(K*kg)	Specifik värmekapacitet
$T_{smält}$	660 °C	Smälttemperatur för aluminium
$T_{rum}$	20 °C	Aluminiumets temperatur innan inskjutning i ugnen.
$H_{Al}$	0,396 MJ/kg	Fasomvandlingsenergin
$P_{Brännare}$	6,4 MW	Brännarnas effekt
$\eta_{ugn}$	0,54	Smältugns verkningsgrad

### 3.3.2 Smältprocessens förluster

Smältprocessens förluster utvärderades genom att beräkna smältprocessens verkningsgrad och sedan kontrollera förlusterna genom beräkningar av förluster via avgaser och värmeledning, samt från information via företaget. Beräkningarna samt en utvärdering följer nedan.

#### 3.3.2.1 Smältprocessens verkningsgrad

Verkningsgraden för smältprocessen beräknades genom att dividera den teoretiska energiåtgången för att smälta aluminium med den verkliga energin som går åt. Den verkliga energin tas fram från hur mycket gasol som går åt för en genomsnittlig smältprocess. Data för beräkningen återfinns i tabell 2.

$$\eta_{ugn} = \frac{E_{teoretisk}}{E_{verklig}} = \frac{m_{Al} * (C_p * \Delta T + H_{Al})}{H_{gasol} * V_{gasol} * \rho_{gasol}} = 0,54 \quad \dots (5)$$

**Tabell 2:** Data för beräkning av smältugns verkningsgrad.

$m_{Al}$	–	Smältprocessens totala massa.
$C_p$	897 J/(K*kg)	Specifik värmekapacitet
$\Delta T$	720 °C	Temperaturdifferensen
$H_{Al}$	0,396 MJ/kg	Fasomvandlingsenergin
$H_{gasol}$	46,1 MJ/kg	Energin gasol ger vid förbränning.
$V_{gasol}$	–	Gasolens volym
$\rho_{gasol}$	2 kg/m <sup>3</sup>	Gasolens densitet

#### 3.3.2.2 Avgasförluster

Avgasförlusten beräknades genom att dividera energin för den uppvärmda luften som går ut i avgaser med energin som gasolen ger vid förbränning. Data för beräkningen återfinns i tabell 3.

$$\eta_{avgas} = \frac{E_{avgas}}{E_{gasol}} = \frac{m_{luft} * C_p * \Delta T}{H_{gasol} * V_{gasol} * \rho_{gasol}} = \frac{r_m * C_p * \Delta T}{H_{gasol}} = 0,227 \quad \dots (6)$$

**Tabell 3:** Data för beräkning av avgasförlusten

$r_m$	15,67:1	Massförhållandet mellan luft och gasol vid förbränning.
$C_p$	1115 J/(K*kg)	Specifika värmekapaciteten för luft.
$\Delta T$	600 °C	Temperaturdifferensen
$H_{gasol}$	46,1 MJ/kg	Energin gasol ger vid förbränning.

### 3.3.2.3 Värmeledningsförluster

Värmeledningsförlusterna för smältugnen beräknades genom att först beräkna den termiska resistansen för varje skikt i ugnen. Därefter beräknades värmeledningseffekten genom att dividera temperaturdifferensen med den totala termiska resistansen. Slutligen får förlusten genom att dividera värmeledningseffekten med brännarnas effekt. Data för beräkningen återfinns i tabell 4.

Termiska resistansen fås genom:

$$R_{tot} = R_{Al203} + R_{Isolering} + R_{Stål} = \frac{1}{A} \left( \frac{L_1}{k_{Al203}} + \frac{L_2}{k_{Iso}} + \frac{L_3}{k_{Stål}} \right) = 0,024 \quad \dots (7)$$

Värmeledningseffekten:

$$P_{värmeledning} = \frac{\Delta T}{R_{tot}} = 29,2 \text{ kW} \quad \dots (8)$$

Förlusten fås genom:

$$\eta_{värmeledning} = \frac{P_{värmeledning}}{P_{brännare}} = 0.0046 \quad \dots (9)$$

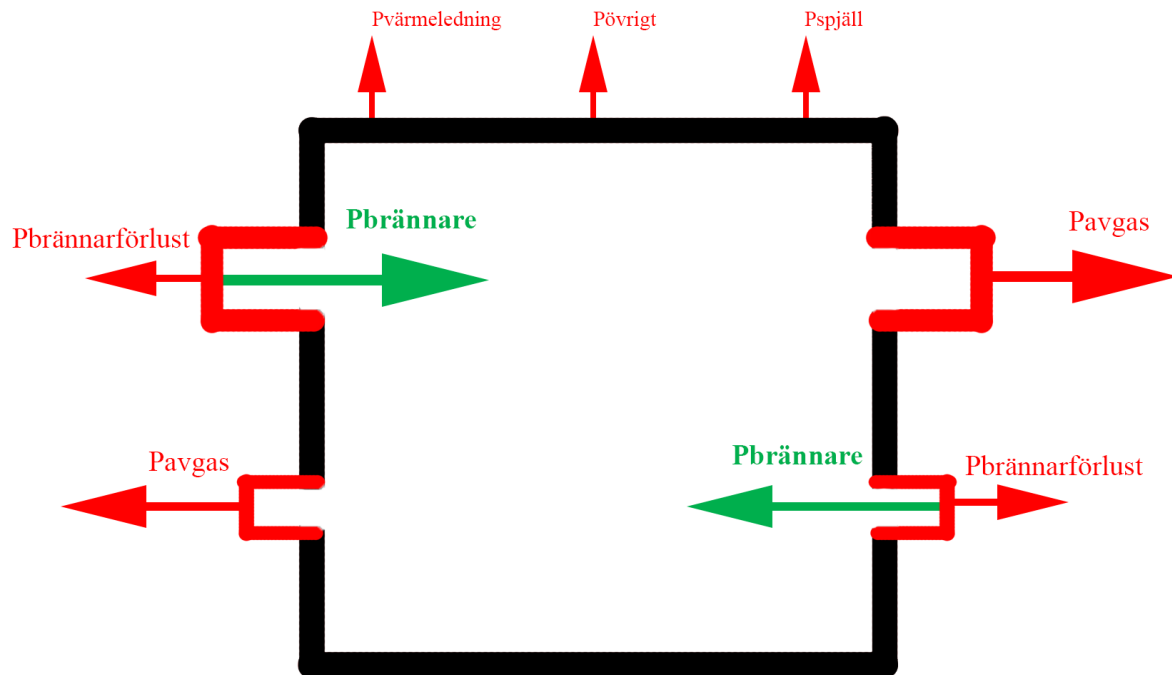
**Tabell 4:** Data för beräkning av smältugns värmeledningsförluster.

$R_{Al203}$	72u (m <sup>2</sup> *K) /W	Termiskresistans för aluminiumoxid.
$R_{Isolering}$	0,24 (m <sup>2</sup> *K) /W	Termiskresistans för ugnens isolering.
$R_{Stål}$	7,2u (m <sup>2</sup> *K) /W	Termiskresistans för stål.
$A$	138 m <sup>2</sup>	Ugnsarean, approximerad med ett 6m*1,5m* 8m rätblock.
$L_x$	–	Tjockleken för ugnens olika skikt.
$k_{Al203}$	30 m/(W*K)	Värmeledningskoefficienten för aluminiumoxid.
$k_{Iso}$	0,03 m/(W*K)	Värmeledningskoefficienten för ugnens isolering.
$k_{Stål}$	50 m/(W*K)	Värmeledningskoefficienten för stål.
$\Delta T$	700 °C	Temperaturdifferensen
$P_{brännare}$	6,4 MW	Brännarnas effekt



### 3.3.2.4 Utvärdering av förluster

Verkningsgraden för smältprocessen beräknades till 54 %. Alltså utgör förlusterna 46 %. Beräkningarna ovan visar att 23 % går ut som avgasförluster och 0,5 % går ut via värmeledning. Brännarna har en förlust på cirka 20% och spjället på smältugnen står för cirka 2 % enligt information från företaget. Detta ger en total förlust på drygt 45 %. Effektflöde för smältprocessen kan ses i figur 9.



Figur 9: Effektflöde för smältprocessen.

### 3.3.3 Geometrins inverkan

Följande beräkning gjordes för att kontrollera geometrins inverkan på smälttiden. Beräkningen avser en aluminiumcylinder med en diameter på 12,5", alltså 31,25 cm. Detta är vanligtvis den massivaste kroppen som smälts.

Antagande:

- Endimensionell värmeöverföring.
- Kroppen kan identifieras som en cylinder.
- Temperaturen i smältugnen antas vara en oändlig värmekälla på 750°C.

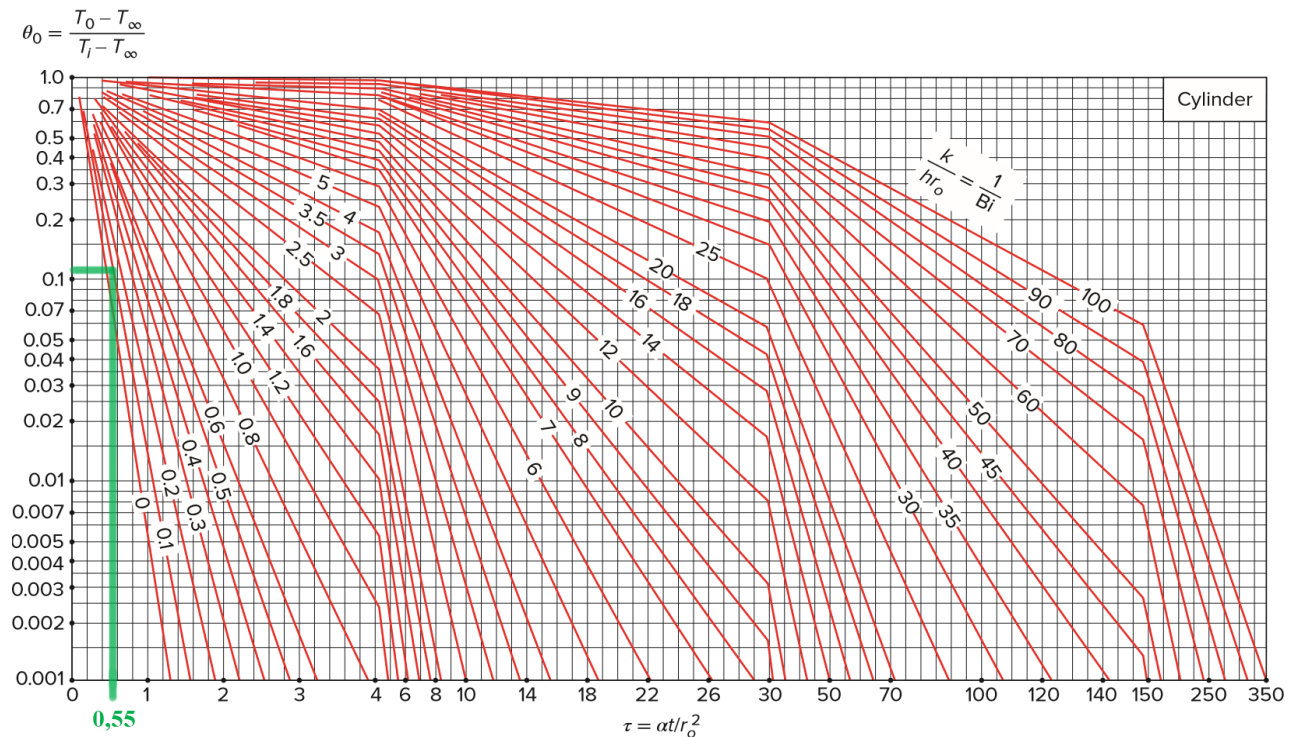
Då  $\theta$  och  $1/Bi$  kan beräknas kan  $\tau$  bestämmas ur figur 10.

$$\theta = \frac{T_{smält} - T_{\infty}}{T_{rum} - T_{\infty}} = \frac{660^{\circ}\text{C} - 750^{\circ}\text{C}}{20^{\circ}\text{C} - 750^{\circ}\text{C}} = 0,123 \quad \dots (10)$$

$$\frac{1}{Bi} = \frac{k}{h * r} = \frac{237 \text{ W/(mK)} * 0,156\text{m}}{3640 \text{ W/(m}^2\text{K)}} = 0,01 \quad \dots (11)$$

Avläsning i figur 10 ger:

$$\tau = 0,55$$



**Figur 10:** Diagram över temperatur längst centrumlinjen för en cylinder.  
(Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences, Transient heat conduction)

Då  $1/Bi$  och  $\tau$  är känt kan  $Q/Q_{max}$  bestämmas ur figur 11.

$$\frac{1}{Bi} = 0,01 \quad , \quad \Rightarrow \quad Bi = 100$$

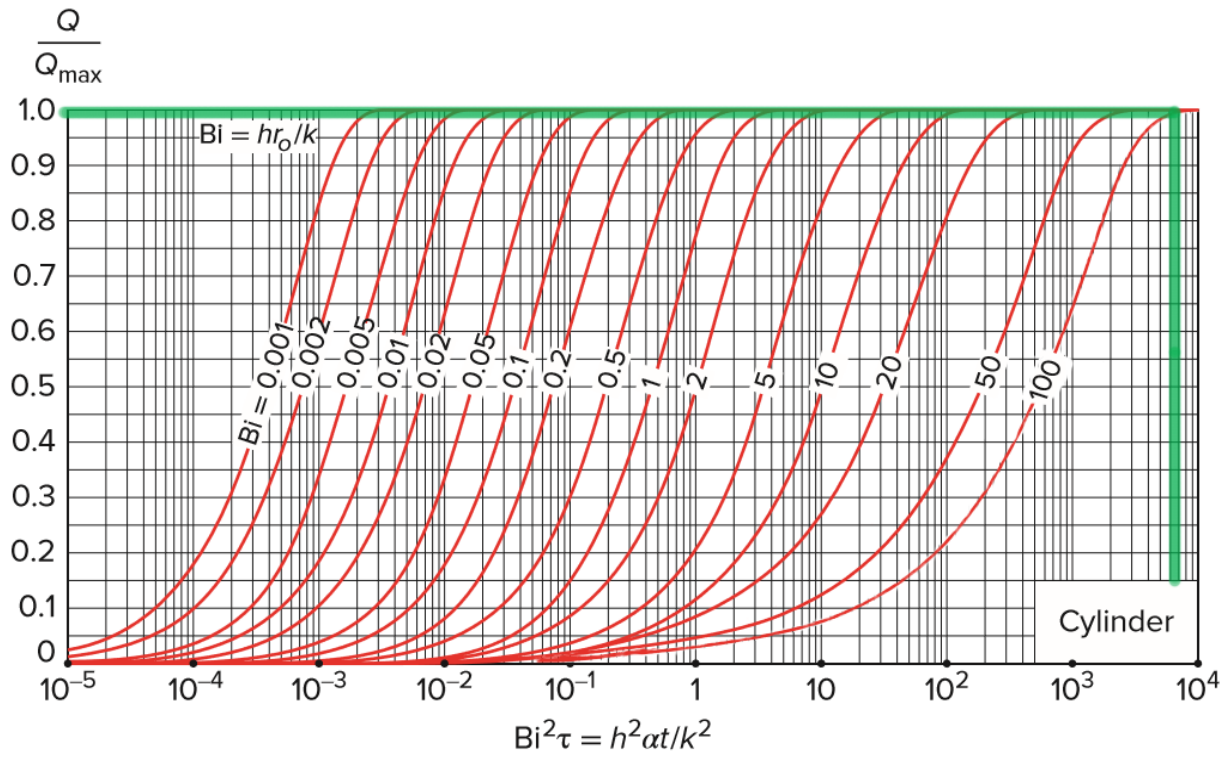
$$Bi^2 * \tau = 5500 \quad \dots (12)$$

Avläsning i figur 10 ger:

$$\frac{Q}{Q_{max}} \approx 1,0$$

Slutsats:

Beräkningen tyder på att geometrin inte spelar speciellt stor roll på smälttiden, eftersom aluminium har så pass god värmeledningsförmåga.



**Figur 11:** Diagram över värmeöverföring för en cylinder.  
*(Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences, Transient heat conduction)*

## 4. Modellering och Analys

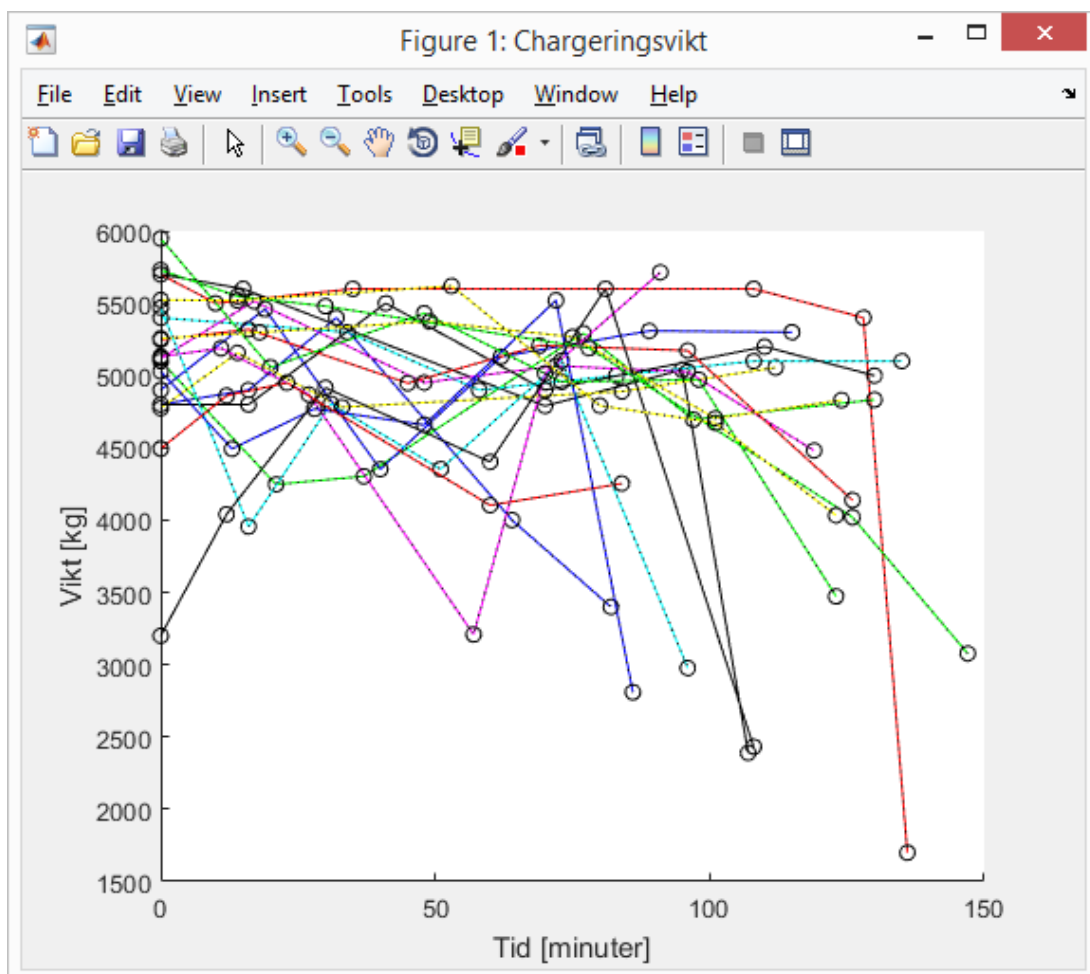
I följande kapitel har analyser och modeller gjorts för smältprocessen med hjälp av teoretiska beräkningar, *MATLAB* samt *COMSOL Multiphysics*. Detta har gjorts för att simulera och beskriva smältprocessen.

### 4.1 Matlab modellering

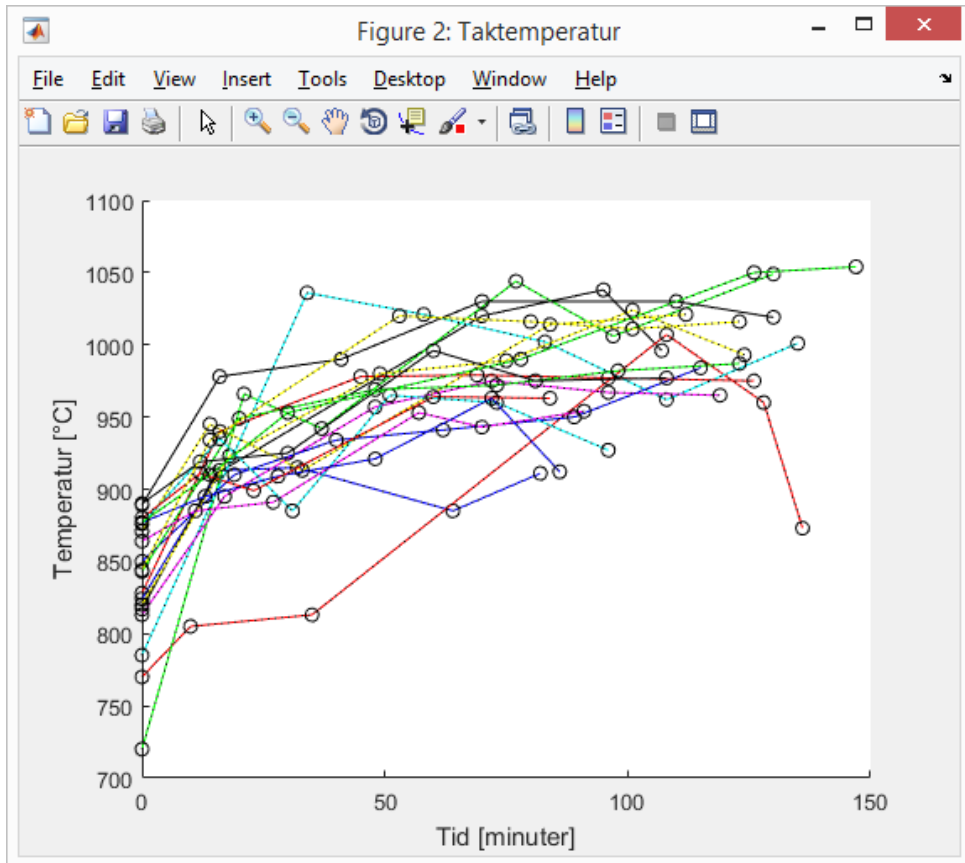
Under projektets gång användes Matlab för att plotta statistik och skriva simuleringsprogram, en noggrannare beskrivning av vad som gjordes i Matlab återfinns nedan.

#### 4.1.1 Matlab statistik plottar

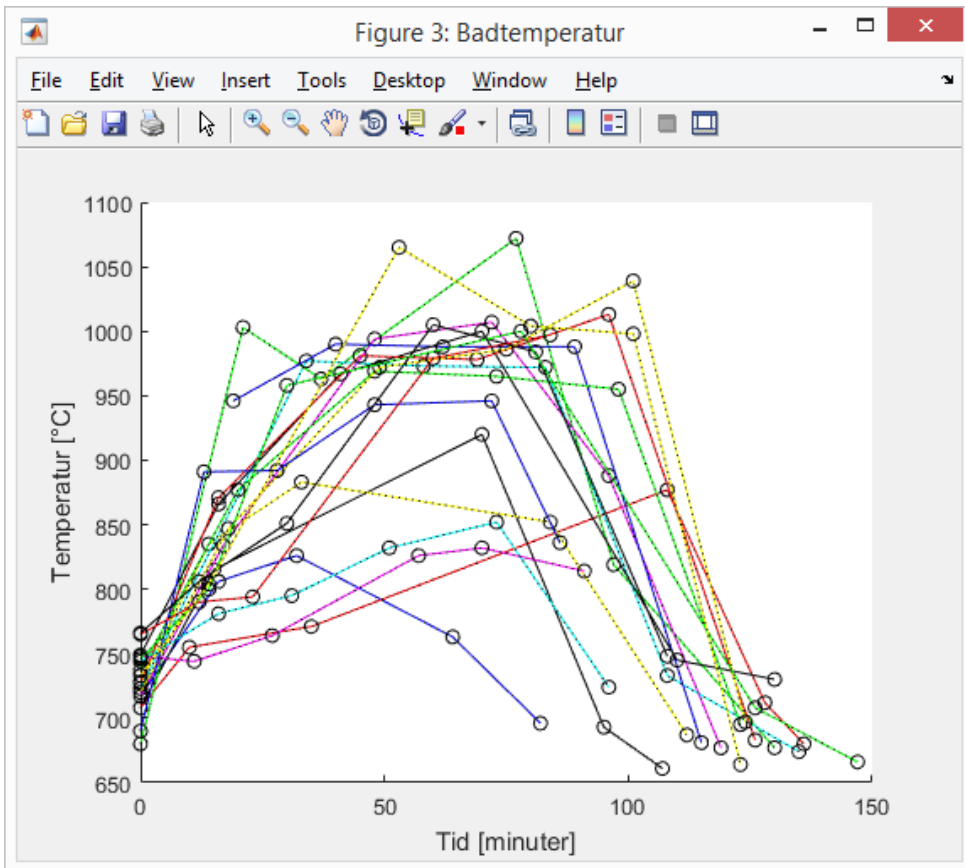
Utifrån den insamlade statistiken gjordes det modeller i Matlab där chargeringsvikt, taktemperatur och badtemperatur plottades med avseende på tid. Värdena i graferna är plottade med punkter där en smältprocess sammanbinds med räta linjer, notera att det inte är en funktion som är anpassad efter mätvärdena. Modellerna syns i figur 12, 13, respektive 14 nedan.



**Figur 12:** Chargeringsvikt med avseende på tid.



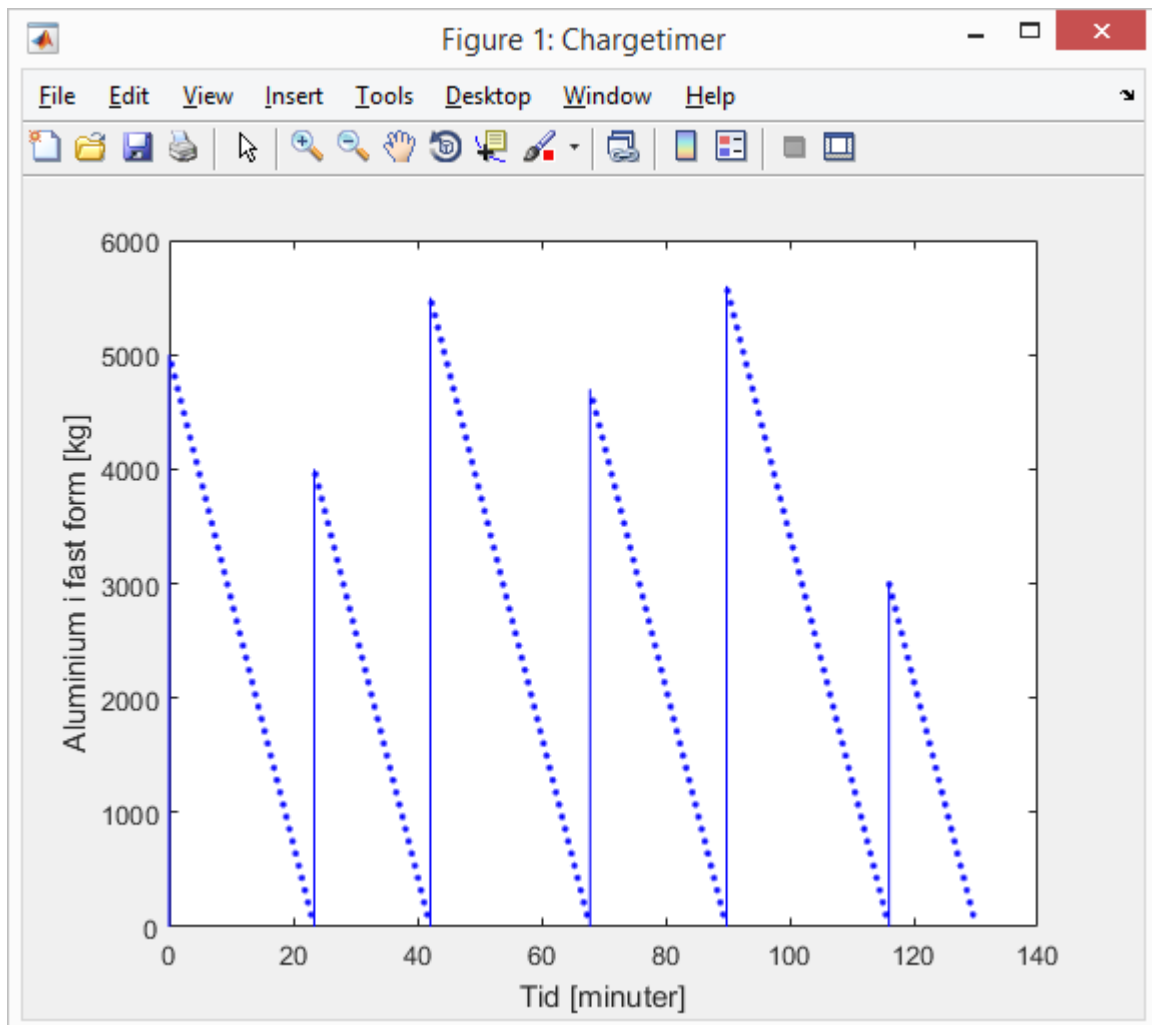
**Figur 13:** Taktemperatur med avseende på tid.



**Figur 14:** Badtemperatur med avseende på tid.

### 4.1.2 Matlab simulering

Utifrån handberäkningarna skrevs ett simuleringsprogram i Matlab som simulerar tiden mellan inskjutningarna i smältugnen. Programmet visar aluminium som befinner sig i fast form i ugnen över tid, se figur 15. Simuleringsprogrammet beräknar även smälttiden, när en inskjutning ska göras och totala massan i smältugnen. I programmet finns det möjlighet att definiera en säkerhetsfaktor som anger hur mycket aluminium ska maximalt vara osmält vid en charging. Matlabkoden för programmet återfinns i bilaga 6.



**Figur 15:** Simulering i Matlab med avseende på tid och aluminium i fast form.

## 4.2 Modellering i Comsol Multiphysics

Comsol Multiphysics är ett mjukvaruprogram för modellering och simulering av vetenskapliga samt tekniska problem. Denna studie gjordes för att verifiera antaganden och teorier.

### 4.2.1 Beskrivning av simulering

Comsol multiphysics användes för att simulera värmeflödet genom ett 12,5” göt, alltså en cylinder med diametern 31,25 cm. Cylinder valdes med tanke på att den är den massivaste skrottypen. Beräkningar gjordes med inbyggda funktioner och formler i programmet. Simuleringen utfördes genom att skapa en någorlunda lik process jämfört med verkligheten. Detta gjordes genom att använda funktionen “Heat flux”. Funktionen tillåter att värma cylindern i en ugn med en konstant effekt, alltså cylindern värmdes upp med hjälp av påtvingad konvektion i en ugn med följande fysiska egenskaper som kan ses i tabell 5 och 6.

**Tabell 5:** Data av aluminium och cylinders fysiska egenskaper.

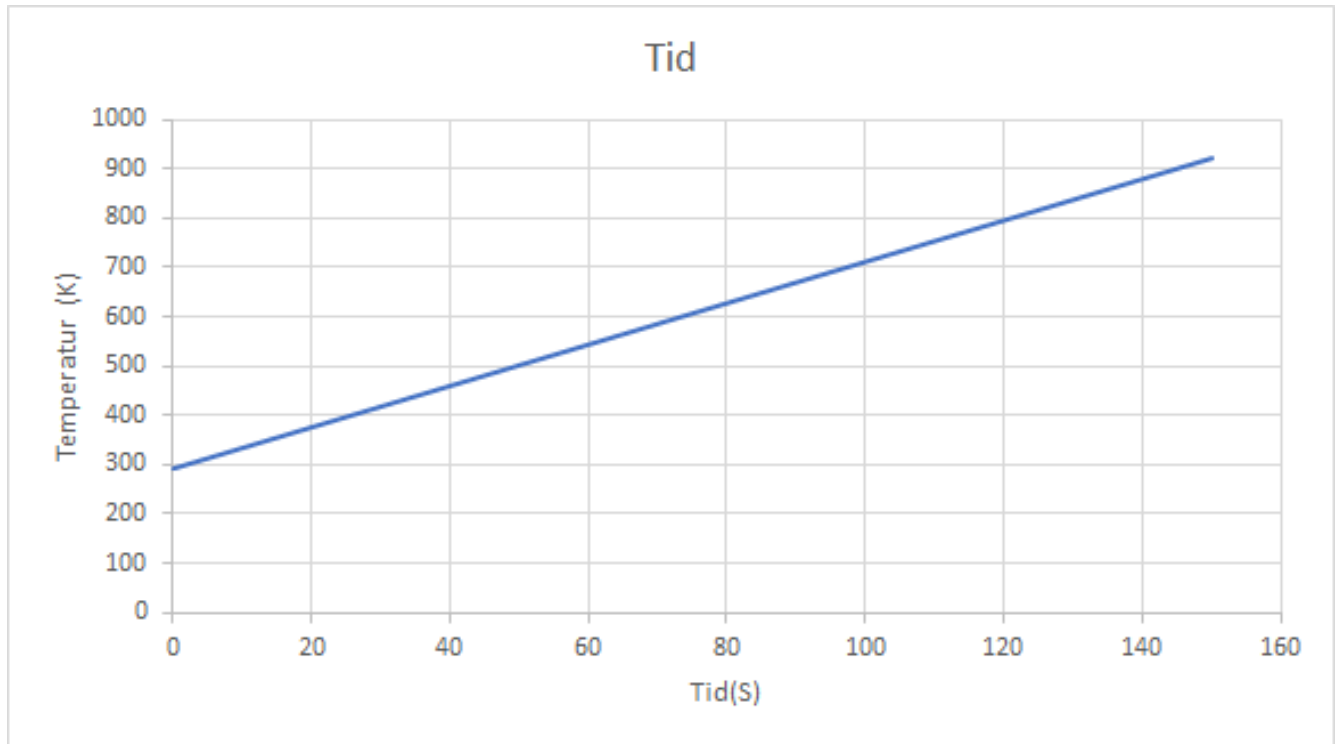
Aluminiums fysiska egenskaper	Värde	Beskrivning
$C_p$	897 J/(kg*K)	Specifik värmekapacitet
$\rho_{Aluminium}$	2700 kg/m <sup>3</sup>	Aluminiums densitet
$K$	238W/(m*K)	Värmeledningsförmåga
$D$	32 cm	Diameter
$h$	100 cm	Höjd
$T_{Aluminium}$	293 °K	Temperatur

**Tabell 6:** Data av ugnens fysiska egenskaper.

Ugnens egenskaper	Värde	Beskrivning
Pbrännare	6 400 000 W * 0.54	Brännarnas effekt*processens verkningsgrad
t	150 Sekunder	Processens tid

## 4.2.2 Temperatur-tid diagram

Beräkningar och simuleringar i *COMSOL Multiphysics* resulterade i ett temperatur-tid diagram som visas nedan i figur 16-19. Diagrammet visar den genomsnittliga temperaturstigning med avseende på tid. Utifrån diagrammet kan dras slutsatsen att geometrins inverkan i smältprocess kan försummas på grund av aluminiums höga värmeledningsförmåga.

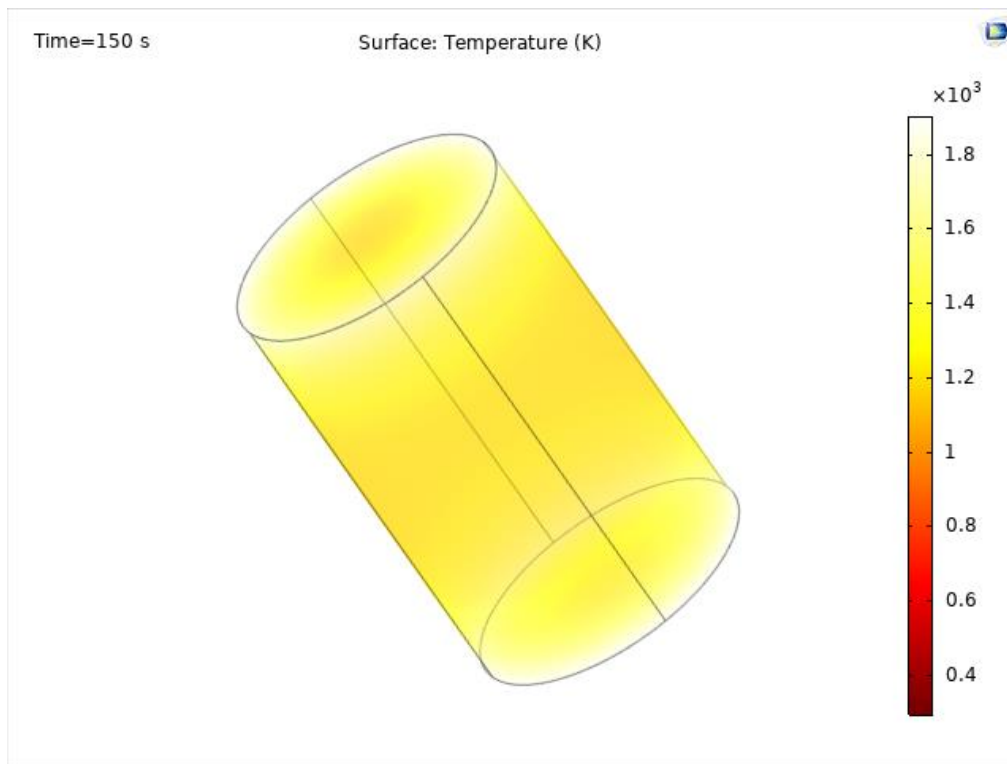


**Figur 16:** Diagram över genomsnittlig temperaturstigning med avseende på tid.

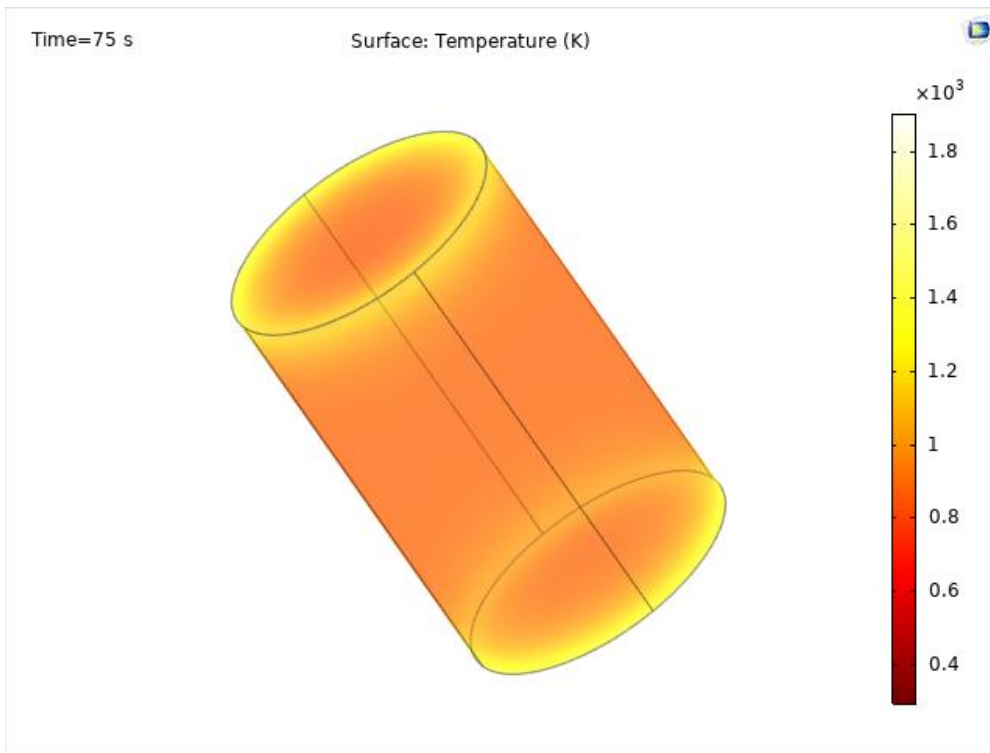


### 4.2.3 Grafisk illustration

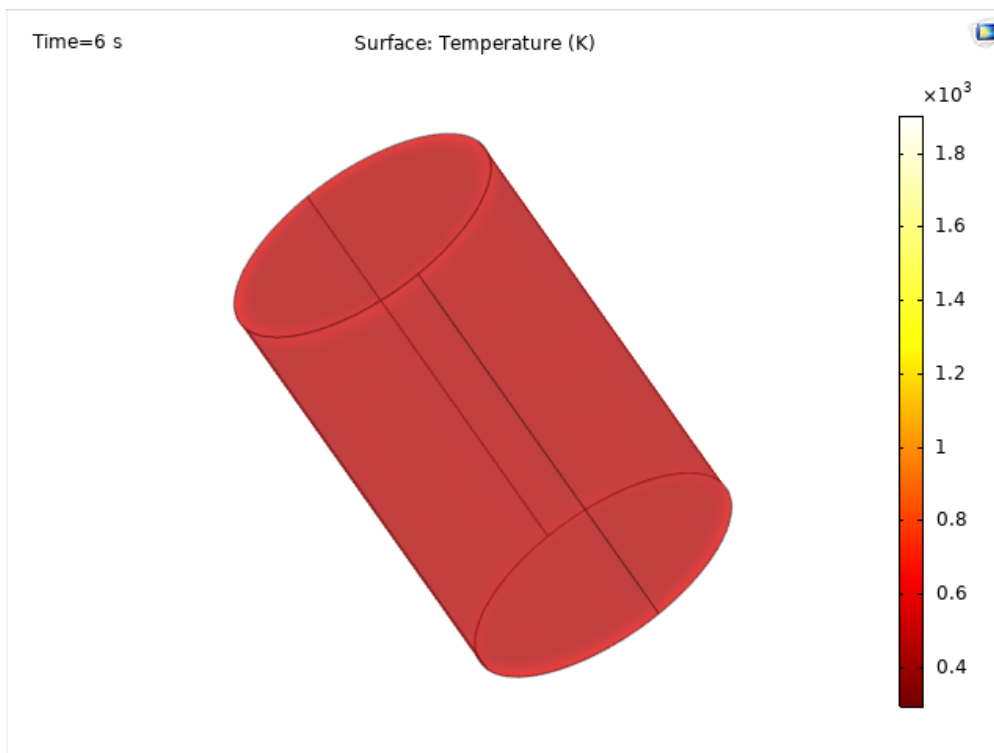
Förutom temperatur-tid diagrammet, finns det möjlighet att illustrera värmeöverföringen genom cylinder grafiskt, detta visas nedan i figur 17, 18 & 19.



**Figur 17:** Grafiskt illustration över genomsnittlig temperatur med avseende på tid efter 150 sekunder.



**Figur 18:** Grafiskt illustration över genomsnittlig temperatur med avseende på tid efter 75 sekunder.



**Figur 19:** Grafiskt illustration över genomsnittlig temperatur med avseende på tid efter 6 sekunder.

## 5. Miljö

I följande kapitel jämförs hur mycket energi det krävs för framställning av ren aluminium jämfört med nedsmältning av återvunnet material. Koldioxidutsläppet är en viktig faktor ifall företaget vill öka produktionen.

### 5.1 Energiåtgång för framställning av ren aluminium

Genom att återvinna metaller sparas det stora mängder på energi och naturresurser. Aluminium framställs ur bauxit med hjälp av Bayerprocessen, processen sker i en speciell ugn. Denna process är den effektivaste processen för tillfället men trots det så krävs det mellan 13–15 kWh elenergi för framställning av 1 kg rent aluminium. Medans för återvinning av aluminium krävs det cirka 5% av den energin som går åt för att framställa aluminium utifrån bauxit. En enkel beräkning gjordes för att se hur smältverket i Vetlanda förhåller sig till denna siffra.

I smältverket i Vetlanda produceras cirka 40 000 000 kg Aluminium per år där cirka 98% av materialet är återvunnet. Nedan beräknas hur mycket energi det krävs för smältning och homogenisering.

Årlig gasolanvändning i smältverket (2018): 2 500 000 kg

$2\,500\,000\text{ kg} * 46,1 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 115\,250\,000\text{ MJ}$  för framställning av 40 000 000 kg aluminium där cirka 98% är återvunnen aluminium.

Energi som krävs för produktion av 40 000 000 kg aluminium:

$15\text{ kWh} = 54\text{ MJ}$  krävs för framställning av 1 kg aluminium

$54\text{ MJ} * 40\,000\,000\text{ kg} = 2\,160\,000\,000$

Förhållandet till dessa ge oss

$115\,250\,000 / 2\,160\,000\,000 = 0,053$

Alltså tumregeln på 5% stämmer.

### 5.2 Koldioxidavtryck

Gasol är ett annat namn för propan och har ett mycket högt energiinnehåll. Av den anledningen används den vid nedsmältning av aluminium. Gasol är ett fossilt bränsle och därmed krävs det syre vid förbränning av gasol. Restprodukterna av förbränningen blir vattenånga och koldioxid, men propan innehåller mindre kolatomer än olja och därmed släpper mindre koldioxid. Förutom det så innehåller gasol mindre svavel jämfört med andra fossila bränsle såsom olja och därmed mindre utsläpp av svaveldioxid (SO<sub>2</sub>) i naturen. Den totala mängden koldioxid för ett år gasolanvändning för smältverket i Vetlanda räknas då med  $2\,500\,000\text{ kg} * \frac{12,7\text{ kWh}}{\text{kg}} * 234 \frac{\text{g}}{\text{kWh}} \simeq 7\,420\,000\text{ kg}$ . Alltså cirka 7 420 000 kg koldioxid släpps ut för framställning av 40 000 000 kg aluminium, då materialet har återvunnits.

Bayerprocessen som används för framställning av ren aluminium kräver mycket elenergi och därför är viktigt att använda förnybar elenergi. I de flesta länder används elenergi som är producerad via vattenkraftverk, t.ex. i Ryssland använder 95% av smältverk företag elenergi som är producerad via vattenkraftverk. Dock finns det fortfarande länder där koleldade kraftverk är ledande. I Kina använder 93% av smältverk företag el som är producerad via koleldning. Skillnaden i koldioxidutsläpp är stort då vid användning av förnybar energi är koldioxidutsläppet cirka 4 kg koldioxid per 1 kg av ren aluminium medans vid användning av koleldade elenergi är utsläppet lika högt som 21,6 kg per 1 kg av aluminium. I tabell 7 och 8, jämförs koldioxidutsläpp för de olika metoderna

**Tabell 7: CO2 utsläpp för olika processer.**

Metod för framställning	CO2 utsläpp / kg Al	CO2 utsläpp för 40 000 000 kg Al
Nedsmältning med hjälp av gasol (återvunnet Material)	0,1855 kg	7 420 000 kg
Bayerprocess, el energi producerad med förnybar energi	4,0 kg	160 000 000 kg
Bayerprocess, el energi producerad med koleldade kraftverk	21,6 kg	864 000 000 kg

**Tabell 8: Värden för CO2 utsläpp för de olika fossila bränsle. (Kosangas, 2017)**

ENERGIFORM	NEDRE VÄRMEVÄRDE	CO <sub>2</sub> -UTSLÄPP G/KWH
<b>Gasol</b>	12,7 kWh/kg	234
<b>Naturgas</b>	11 kWh/Nm <sup>3</sup>	204
<b>Eldningsolja</b>	10 kWh/l	266
<b>Kol</b>	7 kWh/kg	342

## 6. Verifiering

I detta kapitel verifieras modeller och beräkningar mot verkligheten i produktion. Nedan beskrivs verifiering av formens betydelse, lathund, beräkningar samt chargetimer.

### 6.1 Verifiering av formens betydelse

Verifieringen gjordes med syftet att undersöka om formen på skrottypen påverkar smälttiden. Detta görs genom att skjuta in bara en typ av skrot åt gången i smältugnen, ta tid samt bevaka smältprocessen. Tiden tas bara medan brännarna är på, alltså från med den tidpunkten skroten skjuts in, luckan stängs, tills luckan öppnas för att bevaka processen. Observationer verifierade påståendet i kap 3.3, aluminiumskrotens form i denna process påverkar inte smälttiden.

### 6.2 Verifiering av Lathund

Verifieringen av lathunden gjordes med olika ordrar av olika legeringar på ca 25 000–30 000 kg, detta med syftet att det ska vara så nära verkligheten som möjligt. Smältprocesserna planerades sedan i 5–6 sättningar, där fördelning av skrottyper och vikten av varje sättning planerades enligt Lathunden.

De olika sättningarna påstods vara enligt nedan:

sättning 1: lätt skrot, långa ihåliga, kortskrot, lina. ca 3000 - 4000 kg.

sättning 2: lätt skrot, lång ihåliga, kortskrot, lina, samt gropen ca 4000–5 500 kg.

sättning 3: Massiv samt medeltungt skrot, ca 4000 - 5 500 kg.

sättning 4: Massiv samt medeltungt skrot, ca 4000 - 5 500 kg.

sättning 5: Massiv samt medeltungt skrot, ca 4000 - 5 500 kg.

sättning 6: Avsluta med lättare skrot: långa ihåliga, kortskrot, lina, ca 3000 - 4000 kg.

### 6.3 Verifiering av beräkningar i produktion

Simuleringsprogrammet användes i produktion för att beräkna den teoretiska smälttiden. Smältprocessen bevakas genom att öppna luckan efter den beräknade tiden i *MATLAB* samt dokumentera processen genom att ta bilder och filma. Ifall önskat resultat är nått, fortsätts processen genom att prova en annan typ av skrot, i annat fall fortsätter smältprocessen på samma sättning tills önskat resultat har nåtts. Efteråt jämfördes den verkliga tiden med den teoretiska.

I beräkningarna i simuleringsprogrammet antogs att formen på skrottyperna inte påverkar smälttiden på grund av den aluminiumets höga värmeledningsförmåga. Observationerna tyder på att beräkningarna stämmer väldigt bra med verkligheten. Se figur 20 och 21 för bilder på smältning av solider och ihåliga profiler. Bilderna är i kronologisk ordning där första bilden är tagen precis efter inskjut, andra när 80% av smälttiden passerats och sista bilden precis när allt aluminium har fasomvandlats. Notera att de solider som syns på sista bilden har precis fasomvandlats, de är alltså mjuka.



**Figur 20:** *Smältning av solider.*



**Figur 21:** *Smältning av ihåliga profiler.*

## 7. Resultat

I detta kapitel redovisas resultaten av de utförda studierna. Nedan följer resultaten från statistikinsamlingen, lathund och beräkningar samt chargetimer.

### 7.1 Modellering i Matlab

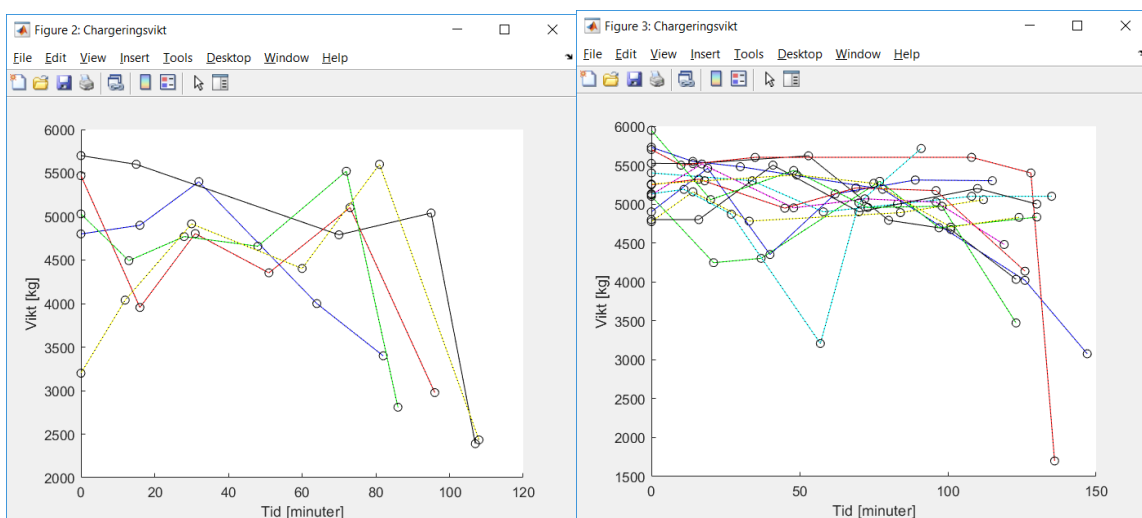
Graferna baserade på statistikinsamlingen som sedan plottades i Matlab visade att om sista inskjutningen i smältugnen innehåller lätt skrot förkortas tiden påtagligt, se figur 22.

Enligt undersökningen förkortas medeltiden att fylla smältugnen 17,5% om den sista chageringen består av lätt skrot. Smältprocessens medeltid förkortas med 7,7% om den sista chageringen består av lätt skrot. Medelvärden för undersökningen återfinns i tabell 9.

Det som är intressant för företaget är möjlighet att göra en smältprocess snabbare eftersom det medför att deras produktion kan öka. Att kunna fylla smältugnen snabbare är positivt för operatörerna, observera dock att en kort tid att fylla smältugnen innebär inte att smältprocessen också blir kort.

**Tabell 9:** Medelvärden för att fylla smältugnen samt smältprocessens tid.

	Sätta smältugnen [min]	Tap to tap [min]
<b>Medelvärde:</b>	—	—
<b>Medelvärde lätt skrot:</b>	-17,5%	-7,7%
<b>Medelvärde resterande:</b>	+6,3%	+3,3%



**Figur 22:** Chageringsvikt över tid, korta processer till vänster, långa processer till höger.

## 7.2 Chargering med hjälp av Lathund och beräkningar

Meningen med lathunden är att kontrollera vikten av inskjutningarna på ett strategiskt sätt. Om operatörerna fyller en vagn med lätt skrot kommer de aldrig upp i hög vikt innan chargeringsvagnen är full. Observera att det skulle gå lika bra att sätta viktintervall för de olika inskjutningarna, men det blir lättare om man definierar viktintervall från skrottypen istället.

Vid chargering med hjälp av lathunden och Matlab beräkningarna sänktes gasolförbrukningen för den aktuella processen med 8,9% från medelvärdet och smältprocessens tid sänktes med 12,6% från medelvärdet.

Se tabell 10 för de olika medelvärdena.

## 7.3 Chargetimer

Chargetimern bygger på de teoretiska beräkningarna och simuleringen i Matlab. Timern bestämmer tiden utifrån vikten på chargeringsvagnen och börjar räkna ner efter att luckan till ugnen har stängts och brännarna har startat. Om en inskjutning görs för tidigt lägger den på tid för att korrigera den nya smälttiden. Därav är det strategiskt att göra två inskjutningar för att fylla upp ugnen i början av processen för att sedan följa timern.

Förutom en förbättring av arbetsinstruktionerna var det av intresse att utföra studier på chargetimern. Studien visade att gasolförbrukningen för den aktuella processen sänktes med 8,6% från medelvärdet och smältprocessens tid sänktes med 10,2% från medelvärdet. Se tabell 10 för de olika medelvärdena.

**Tabell 10:** Medelvärden för beräkningar och chargetimern i produktion.

	Smältprocess [min]	Gasolförbrukning [m3]	Process / Charge [min/ton]	Gasol / Charge [m3/ton]
Medelvärde:	–	–	–	–
Medelvärde beräkningar:	-13,4%	-13,6%	-12,6%	-8,9%
Medelvärde chargetimer:	-11,3%	-14,2%	-10,2%	-8,6%



## 8. Diskussion

Smälttiden bestäms av den tillförda effekten, förlusternas storlek och massan på aluminiumet som ska smältas. Vid ändringar i smältprocessen kommer det att behövas att bestämma den tillförda effekten samt smältprocessens verkningsgrad på nytt för att modellen ska överensstämma med verkligheten.

Modellen fungerar endast på en smältugn som varit i drift tills den uppnått arbetstemperaturen, alltså kommer den inte fungera för en kall ugn som startar från att den varit avstängd.

Modellen bidrar till en mer konstant produktion då operatörerna vet när de ska tillsätta aluminium i ugnen. Detta leder till en effektivare produktion med en lägre energiåtgång. Enligt statistiken kommer operatörerna behöva vänta längre mellan inskjutningarna men den totala tiden för smältprocessen förkortas. Detta beror på att solider inte ska skjutas in i aluminiumbadet eftersom smält aluminium leder värme dåligt. Av denna anledning är det bättre att skjuta in lite för sent än för tidigt.

Om vatten tar sig in inuti badet föreligger risk för explosion. Den risken är dock minimal eftersom aluminiumbadet vid sista inskjutningen är strax över smälttemperaturen. Aluminium strax över smälttemperaturen är en trögflytande massa, där en eventuellt nedrullande aluminiumprofil bromsas upp av aluminiumbadet.

Chargetimern kan användas för att automatisera produktionen ytterligare. Det skulle kunna tänkas att använda timern i kombination med en värmekamera. Detta med syfte att skjuta in aluminiumskrot automatiskt i ugnen säkert, utan att en operatör ska behöva vara närvarande.

## 9. Slutsats

Frågeställningen för projektet var följande:

- När ska aluminiumskrotet tillsättas i ugnen för att få en optimal smälttid?
- Hur påverkar typen av skrot smältprocessen?
- Hur mycket kan processen optimeras jämfört med den nuvarande?
- Hur ska operatörerna veta när det är dags att tillsätta skrot i ugnen?
- Hur ska operatörerna tillsätta skrot i ugnen?
- Vilka förbättringar kan göras i den befintliga processen?
- Vilka säkerhetsaspekter ska tas hänsyn till?
- Vilka säkerhetsaspekter kan förbättras?
- Hur tas hänsyn till miljöaspekter i processen?

### **Dessa frågor har besvarats under projektets gång:**

Aluminium ska tillsättas när det befintliga aluminiumet i ugnen har precis fasomvandlats. Solider ska undvikas att skjutas ner i badet på grund av det smälta aluminiumets dåliga värmeledningsförmåga. Av detta skäl är det bättre att skjuta in lite för sent än för tidigt. Skrotets geometri påverkar inte smälttiden, smälttiden bestäms av aluminiumets massa. Verifieringen visade att det är möjligt att minska smältprocessens tid med 10,2% och gasolförbrukningen med 8,6%. Det innebär att det är möjligt att öka produktionen med 11,4% och minska gasolkostnaderna med 8,6% för smältugnen om aluminium tillsätts vid rätt tidpunkt.

Chargetimern gör så att operatörerna vet när det är dags att tillsätta skrot i ugnen. Vid ett inskjut ger timern en tid på skärmarna i smältverket som sedan berättar när det är dags. Operatörerna bör tillsätta aluminium i ugnen med utgångspunkt från lathunden [bilaga 5] i kombination med chargetimern. De bör börja med lätt skrot, öka successivt och avsluta lätt.

Processen kan förbättras med hjälp av chargetimern och lathunden. De ger möjlighet till att automatisera processen ytterligare och möjliggör en mer konstant produktion. Det skulle kunna tänkas att automatisera processen ännu mer på lång sikt. Med hjälp av värmekamera och en pålitlig chargering skulle inskjutningarna i ugnen kunna ske automatiskt. Risken för explosion i anknäytelse till chargetimern är minimal eftersom aluminiumbadet vid sista inskjutningen är strax över smälttemperaturen.

Det framgår av beräkningar att det går åt mycket energi till att framställa nytt aluminium. Därför är det av stor vikt att återanvända aluminium. Tack vare effektivisering av smältprocessen kan man fastställa en bättre tidpunkt för inskjutningar av aluminium i smältugnen. Detta leder till mindre förbrukning av energi. Det är möjligt att minska gasolförbrukningen med 8,6% vilket gör att koldioxidutsläppen på grund av gasolförbränningen minskar också med 8,6%. Detta är ytterligare ett steg till att förbättra vår miljö.

# Referenser

Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences. (Cengel, Cimbala & Turner). 2017  
Chapter 18. Transient heat conduction

Thermophysical Properties of Liquid Aluminium. (Leitner, Schmon, Aziz & Pottlacher). 2017  
Hämtad från: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-017-4053-6>

Aluminium Production. 2009. Energiåtgång vid framställning av ren aluminium  
Hämtad från: [http://www.aluminum-production.com/important\\_figures.html](http://www.aluminum-production.com/important_figures.html)

Kosangas. 2017. Koldioxidutsläpp då det används gasol  
Hämtad från: [https://www.kosangas.se/media/3544/booklet\\_se\\_web.pdf](https://www.kosangas.se/media/3544/booklet_se_web.pdf)

Aluminium leader. 2017. Koldioxidutsläpp för framställning av ny aluminium från berggrunden  
Hämtad från: [https://www.aluminiumleader.com/production/how\\_aluminium\\_is\\_produced/](https://www.aluminiumleader.com/production/how_aluminium_is_produced/)

## **Data för beräkningar har hämtats från:**

Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences. (Cengel, Cimbala & Turner). 2017

Engineering toolbox. 2019

Hämtad från: <https://www.engineeringtoolbox.com/>



## Frågeformulär

Frågorna nedan ska ställas till Willy (Operatör) och Christer Svahn (processtekniker).

1. Varifrån kommer aluminium skroten?
2. Vilka nuvarande säkerhetsåtgärder finns?
3. Vad kan gå fel under smältprocessen? Vad händer då?
4. Hur lång tid ta nuvarande smältprocess?
5. Hur mycket aluminium smälts här?
6. Hur många gånger körs processen/dag? Går den dygnet runt?
7. Hur vet operatörerna när de ska tillsätta skrot i ugnen?
8. Hur arbetat brännarna?
9. Är temperaturen under processen konstant?
10. Vilka variabler finns?
11. Vad finns för mätdata? Hur noggrann är den?
12. Viktigaste variabeln?
13. Hur kan operatörerna påverka smältprocessen?
14. Skulle det hjälpa om man ändrade formen på de större skrot? (innan smältning)
15. Har företaget provat/simulerat andra metoder?
16. Vilka andra metoder finns för tillfället?
17. Kan man höja start temperaturen? skulle det hjälpa?
18. Säkerhet är den viktigaste aspekten, Hur ser det ut för tillfället? kan man förbättra det?
19. har det hänt olyckor? om ja, vad var anledningen till dessa olyckor
20. Klarar ugnen mer än 5000 kg skot?
21. Vet man hur mycket skrotet väger innan man skickar in det i ugnen?
22. Vilken metod använder konkurrenter? Alltid lättare att ta en lösning som redan finns och funkar
23. Hur mycket vinst skulle detta projekt ge företaget?
24. finns det möjlighet att automatisera vissa steg i arbetet?
25. Hur länge har ni kört denna smältprocessen? Har ni haft en annan tidigare?
26. Hur mycket sjunker temperaturen i ugnen efter det första-andra sättning?
27. Vart kommer materialet ifrån?
28. Vid vilken temperatur körs första sättningen

### **Bilaga 2: Frågeformulär**

## **Intervju med Willy (Erfaren operatör) och Christer (processtekniker)**

1. Varifrån kommer aluminium skroten?
  - De mesta kommer produktionen, alltså skroten. Men vi köper även aluminiumskrot från andra företag. Men vi köper in 2-3% ren aluminium. Men andra systerbolag använder mer ren aluminium eftersom de använder sämre skrot.
2. Vilka nuvarande säkerhetsåtgärder finns?
  - Vi har ett lager för skroten som ska skjutas i ugnen, detta för att skroten ska värmas samt torkas i hallen. Värmen kommer ifrån homonesringugnen som hjälper till att skroten ska torkas och värmas.
  - Man ska alltid kolla ugnens inre vagnar för att allt ska stämma.
3. Vad kan gå fel under smältprocessen? Vad händer då?
4. Hur kan man förbättra säkerheten?
  - Det går alltid att förbättra säkerheten, vi har förbättrat säkerheten sedan smältverket öppnades.
  - För tillfället hålls ren aluminium ute och kan vara kall ibland, vi har redan en ugn som vi kan förvärma de men används inte för tillfället.
5. Hur lång tid ta nuvarande smältprocess?
  - Cirka 4 timmar men detta kan vara väldigt varierande beroende på om legeringarna stämmer eller ej. Ibland måste ugnen rensas av slagg innan man kan använda det igen och det påverkar ugnens temperatur och tar väldigt mycket tid vilket påverkar sluttiden. Eftersom det inte finns något
6. Hur mycket aluminium smälts här?
  - Cirka 40 000 000 kg per år.
7. Hur arbetat brännarna?
  - Brännarna stängs av när porten öppnas med det finns ett läge att brännare ska gå för att se hur de brinner. Detta gäller för att portar, så fort någon port öppnas stängs brännarna.
  - I början är det bara brännarna men sedan drar man igång Elenaj systemet när det är rätt temperatur ca 750. Elenaj systemet hjälper till att få en bättre spridning av eld över skroten.
8. Vilka variabler påverkar smälttiden?
  - Temperatur är den viktigaste faktorn men vilken typ av skrot man lastar ugnen är väldigt viktigt.
9. Hur kan operatörerna påverka smältprocessen?
  - Det är första, andra och sista skjutningar som är de viktigaste sättningarna, dessa ska innehålla helst lättskrot eftersom dessa smälts fortare. Själva chargeringen är jätteviktigt. Så det är olika strategier som kan påverka TAP to TAP tiden.
10. Hur skiljer ni emellan de olika legeringarna?
  - För tillfället finns det ingen teknik så att vi kan skilja emellan skroten som kommer och vi måste lita på leverantörerna och ibland kan det finnas järnbitar i skroten och en liten järnbit kan förstöra 30 ton nedsmält aluminium med tanke på att vi har så små toleranser.
11. har det hänt olyckor? om ja, vad var anledningen till dessa olyckor
  - Ja. 2006 sprängdes smältugnen men ingen kom till skada.
12. Vet man hur mycket skrotet väger innan man skickar in det i ugnen?

- Ja, detta kan man se på dataskärmen, det finns även andra data som t.ex. temperatur och hur mycket skrot som redan finns i ugnen
13. Hur skulle det se ut om man väntade på att hela första skjutning skulle smälta ner innan man skjuter in andra sättningen?
- Man tappar en viss tid och om nästa sättning innehåller vatten eller är för kall finns det risk för explosion, Man vill inte ha bara ett smältbad inne i ugnen innan man skjuter in nästa sättning. Detta är en viktig säkerhetsaspekt som måste tänkas på under processen.
14. Varför tycker ni att taktemperaturerna inte är viktigt vid de första skjutningarna?
- Detta för att man ska sänka ner tiden på hela smältprocessen, t.ex. fylla vagnen med de skrot som tar längre tid, t.ex. lådor som tar 5–10 minuter extra att fylla vagnen med.
15. Vilken metod använder konkurrenter?
- Finns ingen information.
16. finns det möjlighet att automatisera vissa steg i arbetet?
- De flesta steg i processen är redan automatiserade, det är bara chargerings tiden som görs efter operatörernas erfarenhet.
17. Hur länge har ni kört denna smältprocessen? Har ni haft en annan tidigare?
- Sedan
18. Hur mycket sjunker temperaturen i ugnen efter det första-andra sättning?
- Inga undersökningar har gjorts än.
19. Vid vilken temperatur körs första sättningen?
- Den första sättningen skjuts direkt efter att man har tappat den föregående smältbadet. Detta görs för att spara tid och att brännarna inte ska köras i en tom ugn. Detta är baserad på gasolförbrukningen.
20. Vilka olika geometrier finns för tillfället?
- Det finns många varierande geometrier finns. Solida kan vara götändarna, kubik och kan finnas olika andra geometrier. Ihåliga skrot som ta väldigt mycket plats beroende på deras geometri.
21. Hur hanteras slagget från ugnen samt produktionen?
- Det hanteras inte här utan skickas till samarbetspartner (Stena recycling).
22. Hur hanteras slagget inne i ugnen?
- Ugnen slaggas efter varje process. Det finns väldigt stora verktyg som kopplas till truckar och in i ugnen och backa. Först slaggas smältugnen och sedan legeras, detta är för att det alltid blir slagg i ugnen på grund av syre och oxid i smältan som kommer genom den stora banan.
  - Även hållugnen slaggas.
23. Finns det någon statistik på hur mycket temperaturen sjunker efter de första sättning?
- Detta kanske kan följas i databasen.
24. Hur mycket kan vikten på vagnen variera?

- Beroende på vilken typ av skrot det finns i lagern, och beroende på om vilken typ av skrot man lastar vagnen med, men max kan vagnen klara 6000 kg men det finns planer att förbättra vagnen.
25. Tänker operatörerna hur mycket de ska vänta efter varje charging?
- Nej, egentligen inte men man borde variera det beroende på vilken typ av skrot man skjuter in i ugnen, t.ex. om man skjuter in tungt skrot har operatören tid att fylla vagnen med klenare skrot.
26. Vilka är de viktigaste sättningar?
- Tanken är att köra lättskrot i de två första delar för att det ska smältas fortare och dels för att få upp temperaturen snabbare.
27. Hur skulle geometriförändring på götändarna påverka smälttiden?
- Det har vi inte tänkt på men det skulle hjälpa och skynda på i processen. Det är ingen dum idé men vi har tid samt utrustning för att prova det.
28. Vi har sett att operatörerna fyller ugnen med skrot även om det finns mycket osmält skrot inne i ugnen, är det bra?
- Nej, verkligen inte. De flesta följer temperaturen och detta är inte bra eftersom om ugnen är fyllt med osmält skrot och det skjuts in ännu mer skrot i ugnen är det nästan uppe i taket och det finns risk att den rasar bakåt och på bryggan.
29. Hur skulle en kamera hjälpa med detta problem?
- I stålverket använder man kamera, detta har diskuterats rätt ofta och kan hjälpa till under processen.
30. Har det gjorts några simuleringar för smältugnen?
- Nej, men det finns andra systerföretag i Europa som har gjort det.
31. Hur regleras lufttrycket?
- Vi ett spjäll som trycker in luft. Det ska inte läcka ut någon luft och alltid ska det finnas lite övertryck i ugnen.
32. Hur har processen förändrats under tiden?
- Själva processen har inte förändrats något sedan 1998 men säkerheten och effektiviteten har utvecklats en del.
33. Hur skiljer sig gasolförbrukningen jämfört med elförbrukning?
- Det är en stor skillnad, gasolförbrukningen är det största. Man kan även se hur mycket gasol har förbrukats under en längre period. Finns även möjlighet att se hur stor är gasolförbrukning per varje sättning.
34. Hur mycket osmält skrot borde finnas kvar innan man skjuter in nytt skrot?
- Med tanke på säkerhetsaspekten ska man ha kvar en solida innan man skjuter in nytt.



## Intervju med Tim Porter (Expert inom området)

1. Hur länge ska man vänta efter varje sättning?

- Säg t.ex. att i första chargering har operatören skjutit in cirka 5000 kg aluminiumskrot i ugnen, och det smälts cirka 100 kg skrot per minut, så efter 10 minuter har cirka 1000 kg aluminium smälts, och man har 4000 kg solid aluminium kvar. För att ha den mest optimerade väntetiden efter varje laddning måste vi bestämma en intervall där det är okej att ladda ugnen med nytt skrot. T.ex. antar vi att när cirka 20% av skroten som har skjutits in i ugnen är smält är det okej att ladda tills det är cirka 60% solida skrot kvar. Inom det intervallet är det okej att ladda chargeringsmaskinen.

- Eftersom det är farligt att ladda ugnen med nytt skrot om det finns bara ett smältbad, samma när ugnen laddas för fort då riskerar man kyla ner ugnen mer än det behövs vilket är onödigt samtidigt förlora man mycket energi. Det är flera faktorer som kan påverka väntetiden detta kan vara vilken typ av skrot det finns, vilken temperatur det är inne i ugnen och om brännarna är på eller av.

2. Hur ska man skilja olika typer av skrot i Chargetimer?

- Man kan kategorisera skroten i tre olika familjer

Tung: Solida götändarna, ren aluminium i kubiska former och gropen.

Mellan: En kombination av lätt och tungt skrot.

Lätt: Den lätta skroten består av smala profiler med mycket luft emellan. De profilerna med stort hålrum är vanligtvis långa. Detta medför att den väger minst bland skrottyperna och går snabbast att smältan

3. Vilken typ av skrot ska laddas i första, andra och etc. laddning?

- Det är bättre att maskinen laddas med lätt skrot ifrån början och sedan ska tyngre skrot komma på de lättare, på det sättet få du direkt eld på de tyngre skrot som behöver mer värme att smältas samtidigt som det finns värmeenergi i smältbadet. Men vad man vissa är att för första chargen har man väldigt mycket tid eftersom operatören väntar på att ugnen ska tömmas, och då har man möjlighet att ladda vagnen med lättare skrot som tar längre tid, väntetiden för den andra sättning är inte så länge så det är bra att ta de långa ihåliga skrot som ha större volym och är lättare att fylla vagnen med. För den tredje sättningen har operatören lite längre tid då kan du använda de solida eller gropen att fylla vagnen med och för den sista kan man använda lättare skrot eftersom operatören har längre väntetid.

4. Varför ska man inte ladda maskinen med tyngre skrot i den första samt andra chargering?

- Eftersom de tyngre kommer att vara på botten och då isoleras de tyngre solida skroten med lättare skrot på toppen.

## Lathund Charging

Sikta på att fylla vagnen med lätt skrot från början och öka med tyngre skrot efter varje charge.

Avsluta med lätt/medeltungt skrot. Det gäller att planera hela chargingen alltifrån början beroende på vilket typ av skrot som finns på lager.

De två första sättningarna bör göras så snabbt som möjligt, följ sedan timern!

**OBS lägg aldrig göt vid den första och sista sättningen!**

T.ex om det finns alla typer av skrot hemma i lager:

Sättning 1:

Börja med lätt skrot: långa ihåliga, kortskrot, lina.

Sättning 2:

Börja med lätt skrot: lång ihåliga, kortskrot, lina, samt gropen

Sättning 3, 4 och 5: Tyngre skrot, Götändarna kommer alltid i mitten, försök placera och sprid det i hela vagnen. **OBS lägg ej götändar ovanpå**

**långskrot/buntar!**

Sista sättningen:

Avsluta med lättare skrot: långa ihåliga, kortskrot, lina, samt gropen

Målet med denna lathund är att vi ska få en konstant produktion samt effektivisera den under en längre period.

Med vänliga Hälsningar  
Asghar & Martin

**Bilaga 5:** *Chargeringsinstruktioner*

```

% Chargetimer
clear, clc

figure('name', 'Chargetimer');

% Indata;
Totalvikt = 27500;
vikt_i_ugnen = 0;
tottid = 0;
ik = 1;
cp = 897;
Tsmalt = 660;
Tal = 20;
Ht = 0.396e6;
Pbrannare = 6.4e6;
verkningsgrad = 0.54;
tottid = 0;
osmaltAl = 0;
Chargeringsstid = 0;

% Definierar skerhetsfaktorn som är mängden skrot som ska vara
osmält vid
% charging, faktorn är i procent 0 - 1;
sakerhetsfaktor = 0;

% Deffinierar massan för de olika inskjutningarna i en vektor.
massa = [5000 4000 5500 4700 5600 3000 2000];

% Formel med avseende på smälttid.
f = @(m) m*(cp*(Tsmalt-Tal)+Ht)/((verkningsgrad*Pbrannare)*60);
% Formeln med avseende på vikt istället.
g = @(t) t*60*(verkningsgrad*Pbrannare)/((cp*(Tsmalt-Tal)+Ht));

% Kör koden för tills ugnen är fullt lastad.
k = 1;
while Totalvikt > vikt_i_ugnen

plot([(Chargeringsstid) (Chargeringsstid)], [osmaltAl (massa(k) +
osmaltAl)], 'blue')
% Ställer in axlarna.
xlabel('Tid [minuter]')
ylabel('Aluminium i fast form [kg]')

```

```

% Beräknar smälttiden.
vikt_i_ugnen = vikt_i_ugnen + massa(k);

disp(' ');
tid = f(massa(k)+osmaltAl);
Chargeringsstid = tid * (1-sakerhetsfaktor) + Chargeringsstid;

% Läger till två snabba chargeringar i början av processen.
%if ik == 1
    % tottid = 0.6*tottid;
%end
tottid = tid + tottid;

% Skriver ut totalsmälttid, total vikt i ugnen samt hur mycket
aluminium
% som inte är smält.
disp(['Smälttiden blir: ', num2str(tottid), ' minuter.'])
disp(['Chargera om: : ', num2str(tid * (1-sakerhetsfaktor)), '
minuter.'])
disp(['Totalvikt i ugnen: : ', num2str(vikt_i_ugnen), ' kg'])
osmaltAl2(k) = osmaltAl + massa(k)*(sakerhetsfaktor/k);
osmaltAl = osmaltAl + massa(k)*(sakerhetsfaktor/k);
disp(['Osmält aluminium vid chargering: ', num2str(osmaltAl), '
kg'])
% Plottar resultatet.
hold on;
%plot(tottid, massa(k), 'red')
%plot(tottid, massa(k), 'k:o')
% Simuler smältningen med varierande temperatur, kör en beräkning
varj 15e sekund.
if k == 1
for z = 0.5:0.5:(tid*(1 - sakerhetsfaktor))
    % Antal smält aluminium i ugnen.
    m = g(z);
    plot(Chargeringsstid-z, m+osmaltAl, 'b:..')
end
else
for z = 0.5:0.5:(tid*(1 - sakerhetsfaktor))
    % Antal smält aluminium i ugnen.
    m = g(z);
    plot(Chargeringsstid-z, m+osmaltAl2(k-1), 'b:..')
end
end
% Räknar hur många gånger loopen körs.
k = k + 1;
ik = ik + 1;
end

```

## Bilaga 6: Matlab simulering