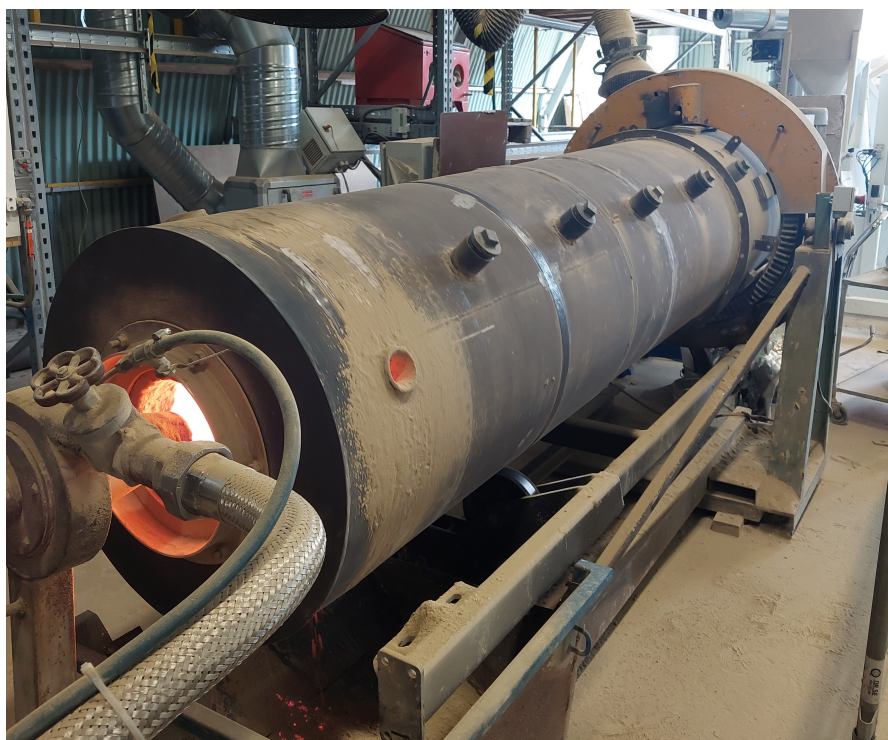




**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

---



# Elektrifieringsalternativ av cementproduktion

Modellering av plasmavärmning och motståndsvärmning  
i försöksugn

Kandidatarbete vid avdelningen för Energiteknik

BRATI ARBANA  
GUNNARSSON FREDRIK  
KARLSSON MATILDA  
LINDGREN AGNES  
MYRBERG SAMUEL  
SVENSSON DANIEL

---

Institutionen för rymd-, geo- och miljövetenskap  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2022



Kandidatarbete 2022

# Elektrifieringsalternativ av cementproduktion

Modellering av plasmavärmning och motståndsvärmning  
i försöksugn

BRATI ARBANA  
GUNNARSSON FREDRIK  
KARLSSON MATILDA  
LINDGREN AGNES  
MYRBERG SAMUEL  
SVENSSON DANIEL



**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för rymd-, geo- och miljövetenskap  
Avdelningen för Energiteknik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2022

Elektrifieringsalternativ av cementproduktion  
Modellering av plasmavärmning och motståndsvärmning i försöksugn

BRATI ARBANA  
GUNNARSSON FREDRIK  
KARLSSON MATILDA  
LINDGREN AGNES  
MYRBERG SAMUEL  
SVENSSON DANIEL

© BRATI ARBANA, 2022  
© GUNNARSSON FREDRIK, 2022  
© KARLSSON MATILDA, 2022  
© LINDGREN AGNES, 2022  
© MYRBERG SAMUEL, 2022  
© SVENSSON DANIEL, 2022

Handledare: Adrian Gunnarsson, Energiteknik  
Examinator: Klas Andersson, Energiteknik

Kandidatarbete 2022  
Institutionen för rymd-, geo- och miljövetenskap  
Avdelningen för Energiteknik  
Chalmers tekniska högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Sverige  
Telefonnummer +46 (0)31-772 1000

Framsida: Bild av Cements försöksugn, Kiln Zero, i Slite [1].

Skrivet i L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X  
Göteborg, Sverige 2022

# Förord

Detta projekt har genomförts vid avdelningen för Energiteknik på Chalmers tekniska högskola med syftet att undersöka möjliga elektrifieringsalternativ för att minska koldioxidutsläppen från Cementas produktion i Slite på Gotland. Ett stort tack till alla som gjort projektet möjligt. Vi vill rikta ett särskilt tack till vår handledare Adrian Gunnarsson samt vår examinator Klas Andersson för all hjälp och stöttning under projektets gång. Det har varit mycket intressant att lära sig mer om Sveriges cementproduktion och vi är tacksamma för att vi fick denna möjlighet.



# Abstract

In this project alternatives for electrification of the cement production process are evaluated. The cement industry is one of the largest sources of greenhouse gas emissions in Sweden, which makes it desirable to reduce the climate impact from the process to be able to achieve Sweden's environmental goal with net zero emissions before 2045. In the cement process, carbon dioxide is created both during heating with fossil fuels and in the calcination reaction. The emissions of carbon dioxide can be reduced if the heating of the process is electrified and two potential alternatives that are examined in this study are heating with a plasma torch and with an electrical resistor.

The purpose with this project is to set up mass and energy balances and investigate how the heat transfer is changed in the calcination step of the process when the current fossil fuel flame is replaced with either heating with a plasma torch or with an electrical resistor. The modeling of the current process and with the intended process changes has been done in MATLAB based on a test rotary kiln which is located at Cementa's plant in Slite on Gotland. Calculations have been made for a blackbox model and then for the heat transfer on the inside of the kiln. The project also consists of a literature study and information about for instance the cement production process and the alternative heat sources has been collected.

The result shows that it is possible to replace the fossil fuel flame with either a plasma torch or an electrical resistor for the calcination step in the kiln. According to both the blackbox model and the calculations of the heat transfer on the inside of the kiln the electrical resistance heating is the most energy efficient alternative. However, there are practical problems with implementing the electrical resistor. It can be difficult to achieve sufficiently high temperatures required for the formation of clinker, which is the step after the calcination. From this aspect the plasma heating can be seen as advantageous. There is an uncertainty in the results due to several unknown parameters and many assumptions, which makes it difficult to say if the plasma torch and the electrical resistor are potential heating alternatives for the calcination step.

Keywords: Cement production, electrification, plasma torch, electrical resistor, calcination, emissions of carbon dioxide



# Sammanfattning

I det här projektet undersöks möjliga alternativ för elektrifiering av produktionsprocessen av cement. Cementindustrin är ett av Sveriges största punktutsläpp av koldioxid vilket gör det önskvärt att minska processens klimatavtryck för att uppnå Sveriges miljömål om nettonollutsläpp till 2045. I cementprocessen bildas koldioxid både vid uppvärmning med fossila bränslen och i kalcineringsreaktionen. Koldioxidutsläppen kan minska mycket om uppvärmningen i processen elektrifieras och två möjliga alternativ som undersöks i den här studien är plasmavärmning samt elektrisk motståndsvärmning.

Syftet med detta arbete är att ställa upp mass- och energibalanser för processen samt undersöka hur värmeöverföringen förändras i processens kalcineringssteg när den nuvarande fossila bränsleflamman ersätts med plasmavärmning alternativt elektrisk motståndsvärmning. Modellering för den nuvarande processen och processalternativen har gjorts i MATLAB för en försöksugn som finns på Cementas anläggning i Slite på Gotland. Beräkningar har först gjorts utifrån en blackboxmodell och därefter har värmeöverföringen inne i ugnen modellerats. Projektet består även av en litteraturstudie där bland annat information om dagens cementproduktionsprocess samt de alternativa värmekällorna har tagits fram.

Resultatet visar att det är möjligt att ersätta den fossila bränsleflamman med både plasmavärmning samt elektrisk motståndsvärmning för kalcineringen i försöksugnen. Enligt både blackboxmodellen och beräkningarna för värmeöverföringen inne i ugnen är elektriskt motståndsvärmning det mest energieffektiva alternativet. Däremot finns det praktiska hinder för att implementera ett elektriskt motstånd. Det kan vara svårt att uppnå tillräckligt höga temperaturer som krävs för klinkersbildning, steget efter kalcineringen. Plasmavärmning kan utifrån denna aspekt ses som fördelaktig. I resultaten som har tagits fram finns en stor osäkerhet då många parametrar är okända och många antagande har gjorts, vilket gör det svårt att med säkerhet säga att det är möjligt att genomföra kalcineringssteget med de undersökta alternativen.

Nyckelord: Cementproduktion, elektrifiering, plasmagenerator, elektriskt motstånd, kalcineringssteget, koldioxidutsläpp

# Nomenklaturlista

I tabell 1 presenteras nomenklaturen samt de enheter som används i rapporten.

Tabell 1: Nomenklaturlista för ekvationer

Symbol	Parameter	Enhet
$\epsilon$	Emissivitet	
$P$	Densitet	$kg/m^3$
$\rho$	Reflektans	
$\rho_r$	Resistivitet	$\Omega m$
$\sigma$	Stefan Boltzmanns konstant	$W/m^2K^4$
$A$	Area	$m^2$
$c_p$	Specifik värmekapacitet	$J/kgK$
$D$	Diameter	$m$
$E_{bi}$	Svartkroppsstrålning	$W/m^2$
$F$	Siktfaktor	
$Gr$	Grashofs tal	
$H$	Entalpi	$J/kg$
$H_i$	Effektivt värmevärde	$J/kg$
$h$	Konvektiv värmeöverföringskoefficient	$W/m^2K$
$h_f$	Bildningsentalpi	$J/kg$
$I$	Elektrisk ström	$A$
$J$	Radiositet	$J/m^2$
$k$	Konduktiv värmeöverföringskoefficient	$W/mK$
$L$	Längd på ugnen	$m$
$l$	Längd	$m$
$m$	Massa	$kg$
$\dot{m}$	Massflöde	$kg/s$
$Pr$	Prandtls tal	
$Q$	Värme flöde	$W$
$q$	Värme flöde	$W$
$q_e$	Värme	$J$
$R$	Resistans	$\Omega$
$Re$	Reynolds tal	
$Re_w$	Roterande Reynolds tal	
$r$	Radie	$m$
$T$	Temperatur	$^{\circ}C$
$t$	tid	$s$
$U$	Spänning	$V$
$\dot{V}$	Volymflöde	$m^3/s$

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrund . . . . .	1
1.2	Syfte . . . . .	2
1.3	Avgränsningar . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>3</b>
2.1	Cementproduktionsprocessen idag . . . . .	3
2.2	Försöksugn - Kiln Zero i Slite . . . . .	4
2.3	Plasmavärmning . . . . .	6
2.4	Elektrisk motståndsvärmning . . . . .	7
2.5	Koldioxidinfångning och lagring . . . . .	9
2.6	Ekonomisk utvärdering . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Metod</b>	<b>10</b>
3.1	Litteraturstudie . . . . .	10
3.2	Blackboxmodell för utsidan av ugnen . . . . .	11
3.2.1	Referensfallet . . . . .	12
3.2.2	Plasmavärmning . . . . .	13
3.2.3	Elektrisk motståndsvärmning . . . . .	13
3.3	Värmeöverföring i ugnen . . . . .	14
3.3.1	Temperatur på insidan av ugnen . . . . .	14
3.3.2	Flamtemperaturer . . . . .	15
3.3.3	Strålning . . . . .	15
3.3.4	Konvektion . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Resultat och diskussion</b>	<b>21</b>
4.1	Blackboxmodell . . . . .	21
4.2	Värmeöverföring i ugn . . . . .	22
4.2.1	Temperatur på insidan av ugnen . . . . .	22
4.2.2	Flamtemperaturer . . . . .	24
4.2.3	Strålning . . . . .	25
4.2.4	Konvektion . . . . .	27
<b>5</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>Förslag till vidare forskning</b>	<b>32</b>
<b>A</b>	<b>Siktfaktorer</b>	<b>35</b>
<b>B</b>	<b>Entalpidata från FactSage för plasma</b>	<b>36</b>

# 1 Inledning

I den här studien undersöks möjligheter att elektrifiera cementproduktionsprocessen. I dagsläget används en till största del fossil bränsleflamma för uppvärmning av processen vilket bidrar till utsläpp. Det är därför önskvärt att undersöka andra alternativa värmekällor för att minska den miljöpåverkan som processen bidrar till. Två potentiella förslag för uppvärmning är att ersätta bränsleflaman med en plasmagenerator eller ett elektriskt motstånd. Ett sådant införande skulle minska processens koldioxidutsläpp, men även medföra stora processförändringar som innebär en stor ekonomisk belastning. Därför behöver dessa alternativ först utvärderas genom modellering och experimentella försök i mindre omfattning innan de kan implementeras i den fullskaliga processen.

Chalmers tekniska högskola har i samarbete med Cementa, ett av Sveriges största bolag inom byggnadsmaterial [2], planerade experimentella försök på en ersättning av bränsleflaman. Experimenten ska studera värmeöverföringen i delsteget av cementprocessen där bäddmaterial värms, nämligen i roterugnen. För att få en ökad förståelse inför de planerade experimenten uppkom detta arbete i syfte att modellera värmeöverföringen i roterugnen vid användning av en bränsleflamma, en plasmagenerator och ett elektriskt motstånd. Studien görs genom att först modellera värmeöverföringen i den delprocessen i roterugnen och därefter använda den framtagna modellen för fallen med en plasmagenerator och med ett elektriskt motstånd.

## 1.1 Bakgrund

Det är idag välkänt att världen står inför en utmaning att motverka global uppvärmning. Den rådande klimatkrisen har främst orsakats av utsläpp av växthusgaser, som exempelvis  $N_2O$ ,  $CH_4$  och framför allt  $CO_2$ . Detta har skett till följd av mänsklig aktivitet, där mycket av utsläppen kommer från förbränning av fossila bränslen i industrier. En av de enskilt största källorna för koldioxidutsläpp är cementindustrin som står för 8 % av världens totala utsläpp [3]. I Sverige motsvarar cementindustrins utsläpp 5 % av hela landets koldioxidutsläpp [4]. Med en globalt ökande befolkning där allt fler vill bo i städer ökar också efterfrågan på cement, då bland annat infrastrukturen behöver byggas ut och fler bostäder efterfrågas. Samtidigt har Sverige som mål att ha nettonollutsläpp 2045 och Cementa har som mål att uppnå nettonollutsläpp 2030 under cementprodukters livscykel [5].

För att Cementa ska kunna uppnå detta mål krävs en omställning av den nuvarande cementproduktionen. Idag kommer cirka 40 % av processens utsläpp från förbränning av bränslen, resterande uppkommer vid den kemiska reaktionen då kalkstenen kalcineras, vilket är ett nödvändigt steg vid tillverkning av cement [6]. I tidigare studier har det konstaterats att en elektrifiering av processen kan minska utsläppen av växthusgaser, där plasmabrännare och motståndsvärmning undersökts som möjliga alternativ att ersätta användningen av fossila bränslen [7]. En sådan ersättning av värmekälla kräver dock ändringar i processens termodynamiska tillstånd. Målet med detta arbete är därmed att vidare analysera möjligheterna till att övergå till en elektrifierad cementproduktion. Det ska göras genom att studera mass- och energibalanser vid användning av en plasmagenerator och ett elektriskt motstånd.

## 1.2 Syfte

Syftet med detta arbete är att undersöka hur värmeöverföringen i kalcineringssteget vid cementproduktion kan komma att förändras då elektrifierade processalternativ används istället för flamförbränning av fossila bränslen. De elektrifierade processalternativen som kommer studeras är plasma- och elektrisk motståndsvärmning. I detta arbete kommer kalcineringsprocessen studeras i en nedskalad roterugn (försöksugn) för att utvärdera om detta är ett möjligt processalternativ till det kalcineringsstorn som används inom processen idag. Arbetet syftar även till att studera hur mass- och energibalanserna förändras i roterugnen då de elektrifierade processalternativen används istället för den befintliga uppvärmningen i referensfallet. Mer specifikt syftar projektet till att

- Ställa upp mass- och energibalanser för de olika processalternativen i en roterugn.
- Undersöka värmeöverföringen för processalternativen genom att studera bidragen från strålning, konvektion och ledning.

## 1.3 Avgränsningar

Studien begränsas till Cementas fabrik i Slite på Gotland. Mer specifikt kommer all beräkning utföras på Cementas försöksugn för att få en bild av hur kalcineringsprocessen påverkas av att cementproduktionen elektrifieras. Energi- och massbalanserna i kalcineringsprocessen påverkas nämligen av en omställning till plasma eller elektrisk motståndsvärmning.

Vidare kommer endast elektrifiering av cementproduktion utredas och jämföras med användning av en propanflamma. De metoder av elektrifiering som projektet innefattar är plasma och motståndsvärmning, inga andra metoder omfattas i studien. Hur elen har producerats innefattas inte i projektet utan den antas ha framtagits fossilfritt då Sverige har som mål att ha nettonollutsläpp 2045. Det kommer heller inte göras några beräkningar på CCS, det vill säga infångning och lagring av koldioxid, utan det diskuteras endast i syfte att visa på möjligheten att uppnå nettonollutsläpp för processen.

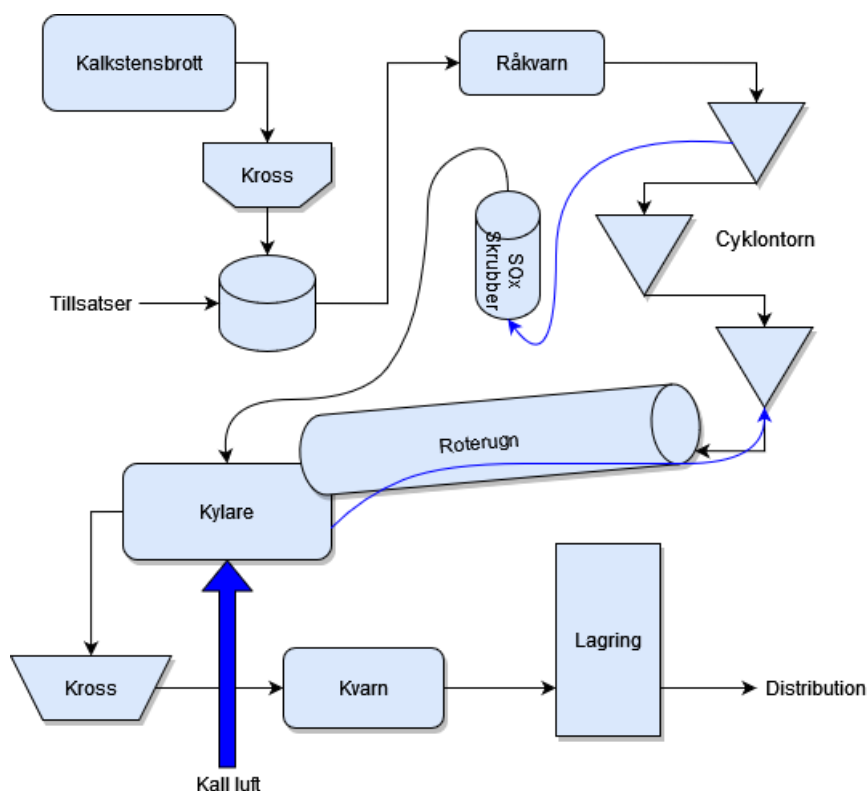
I rapporten kommer inte förändringar av materialet att studeras så som variationer i råmjölet. Ändringar i produktionstakt tas inte heller i beaktande på grund av förändrad efterfrågan exempelvis.

## 2 Teori

I detta avsnitt presenteras en översiktlig bild av hur cement produceras idag och i mer detalj processen i roterugnen. Vidare redovisas teorin bakom de alternativa värmekällorna plasmavärmning och motståndsvärmning. Slutligen beskrivs koldioxidinfångning och lagring samt ekonomisk utvärdering för att analysera konsekvenserna av att implementera de alternativa värmekällorna i den fullskaliga cementproduktionen.

### 2.1 Cementproduktionsprocessen idag

För att tillverka cement behövs råmaterial i form av främst kalksten, men även märgelsten som är lerblandad kalksten [8]. Råmaterialet krossas, mals och blandas därefter med vissa tillsatser, bland annat kiseldioxid, metallurgiskt slagg, aluminium och järnoxider, för att uppnå den önskvärda kemiska sammansättningen [7] vilket syns som de första stegen i processhemat i figur 1.



Figur 1: Processchema över produktionen av cement. De svarta pilarna symboliserar flöde av fast material och de blåa luftflöde. Baserad på beskrivning av processen i [7].

När dessa tillsatser blandats in transporteras råmaterialet till cementtillverkningsprocessen där det först torkas av de varma förbränningsgaserna innan det går in i ett cyklontorn som först förvärmer materialet till strax över 750 °C. Cyklonerna fungerar genom att varma gaser flödar i motsatt riktning som det fasta materialet vilket ger en omblandning och därmed överförs värme från gaserna till det fasta materialet. I tornets sista steg, kallat

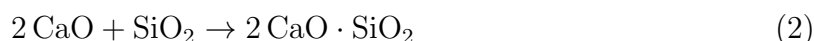
kalcinatoren, tillförs värme genom förbränning för att ytterligare höja temperaturen till ca. 900 °C vilket krävs för att kalcineringsreaktionen ska ske enligt ekvation (1).



I kalcinatoren sker ca. 95 % av kalcineringen. Anledningen till att reaktionen inte tillåts gå till ett högre utbyte är att det kan orsaka problem såsom att material fastnar i kalcinatoren [7].

När det mesta av materialet kalcinerats förs det sedan till roterugnen vilket är en lång cylinder som långsamt roterar samtidigt som en flamma, i dagsläget eldad till största delen med fossila bränslen, brinner i botten för att bäddmaterialet skall uppnå temperaturer på ca. 1450 °C som krävs för önskvärda egenskaper hos produkten [7]. I ugnen sker resterande kalcinerings samt klinkerbildning. Senare i rapporten beskrivs mer utförligt hur roterugnen är uppbyggd och då särskilt försöksugnen, Kiln Zero, vid Cementas anläggning i Slite.

Som tidigare nämnt sker en liten del av kalcineringen i roterugnen, men den huvudsakliga processen är klinkerbildning [7]. Den huvudsakliga reaktionen som sker är mellan kalciumoxid och kiseldioxid vilket bildar kalciumsilikat (Belite och Alite) som är den största beståndsdel i cement. De två reaktioner som sker är enligt Nielsen [6] reaktion 2 och 3.



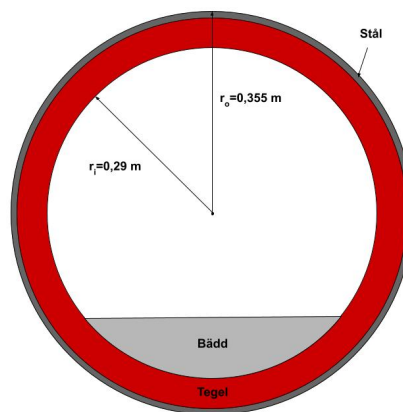
När materialet tas ut ur roterugnen är det viktigt att det kyls snabbt för att undvika bakåtrektioner och därmed upprätthålla kvaliteten på produkten. Därefter krossas och mals materialet innan det lagras. Luften som används för kylning strömmar motströms genom kylaren och sedan vidare genom roterugnen och cyklontornet. Därefter tas den om hand och renas i en våtskrubber. I den bildas gips som en biprodukt vilket återanvänds som tillsats i den färdiga cementen.

## 2.2 Försöksugn - Kiln Zero i Slite

Som utgångspunkt i detta arbete har en specifik roterugn, Kiln Zero, använts. Kiln Zero är en försöksugn på Cementas anläggning i Slite på Gotland. I figur 2 och 3 visas hur Kiln Zero ser ut i verkligheten respektive en ritad tvärsnittsbild av försöksugnen. Alla relevanta mått, lutningen och rotationshastigheten av Kiln Zero presenteras i tabell 2. Detta kan jämföras med en roterugn i ordinarie cementproduktion som är 40-100 m lång med en innerdiameter mellan 3-6 m [6].



Figur 2: En bild på hur Kiln Zero ser ut i verkligheten. Från [1]. Återgiven med tillstånd.



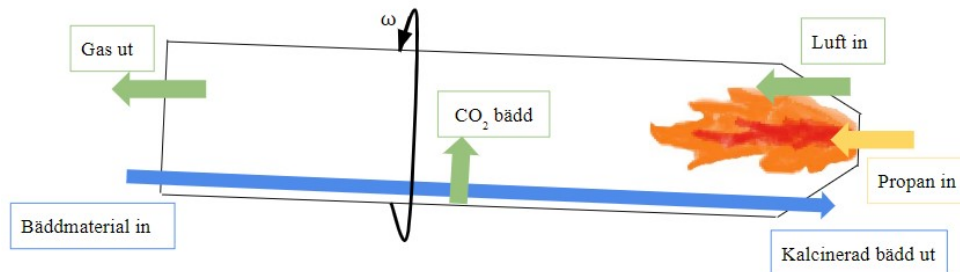
Figur 3: En tvärsnittsbild av Kiln Zero med material, inner- och ytterradier angivna.

Tabell 2: Data för Kiln Zero.

Parameter	Värde
Längd	2,9 m
Ytterdiameter	0,71 m
Innerdiameter	0,58 m
Tjocklek av stål	0,01 m
Tjocklek av murat tegel	0,055 m
Lutning	1,1-2,1°
Rotationshastighet	2,7-6 RPM

I figur 4 visas en översikt över kalcineringen där en propanflamma används som värmekälla. I en roterugn stoppas det in fast material i ena änden och transporteras närmare den andra änden där värmekällan normalt finns [3]. Samtidigt som materialet transporteras värms det upp och blandas genom rotationen. Det är rotationen tillsammans med bland

annat lutningen som avgör hur snabbt materialet rör sig framåt [9]. Utsidan av roterugnen är av stål och för att stålet inte ska hettas upp för mycket finns ett lager med murat tegel på insidan som värmeisulator [3], vilket kan ses i figur 3. Stålet blir fortfarande varmt, men kyls ner genom strålning och konvektion till omgivningen.



Figur 4: Kalcinering i försöksugnen Kiln Zero vid referensfallet.

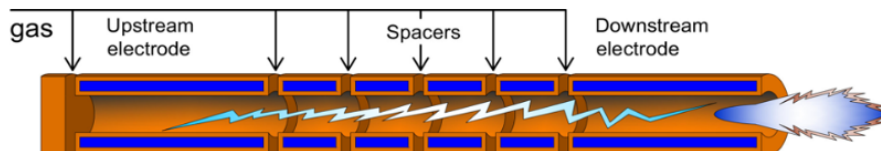
I dagens cementproduktion sker kalcineringsprocessen och värmning inför den med hjälp av ett cyklontorn och kalcinator [3], men försöksutrustning för cyklontornsprocessen finns inte. Istället används en roterugn till kalcineringsprocessen [10], mer specifikt Kiln Zero. Där jämförs elektriskt motstånd och plasmavärmning med ett referensfall där förbränning av propan används som värmekälla.

## 2.3 Plasmavärmning

Ett sätt att elektrifiera uppvärmningen av roterugnen och kalcinatoren i cementprocessen är att använda så kallade plasmageneratorer. En stor fördel med plasmageneratoren är den höga temperaturen som går att uppnå. I cementprocessen krävs att temperaturen på bädden i roterugnen kommer upp i 1450 °C vilket är möjligt med hjälp av plasma. Plasma går därför att använda för både kalcinering och klinkersbildning [3]. Detta skulle minska koldioxidutsläppen för uppvärmningen under förutsättning att elektriciteten som används kommer från energikällor med låg användning av fossila bränslen såsom exempelvis vattenkraft, vindkraft och kärnkraft [7].

Ett plasma kan sägas vara ett fjärde aggregationstillstånd och innebär att en gas upphetas så mycket att molekylerna joniseras [11]. Detta betyder att ett plasma består av fria elektroner och därmed leder elektrisk ström. En plasmagenerator består av två elektroder, en anod och en katod, och mellan dessa skapas en hög spänning vilket genererar en elektrisk ljusbåge [7]. När en gas går genom plasmageneratoren upphetas den av den elektriska ljusbågen och molekylerna joniseras. Bara delar av gasflödet kommer joniseras och bilda ett plasma, men detta är tillräckligt för att uppnå höga temperaturer [7]. Termisk plasma och icke-jämviktsplasma är två olika varianter som idag används inom industrin och det som skiljer dessa åt är plasmats temperatur. Termisk plasma har högre temperatur och entalpiinnehåll och genereras vanligen i så kallade plasmageneratorer [3]. Hur denna typ av plasmagenerator påverkar värmeöverföringen i cementprocessen ska undersökas vidare i detta arbete.

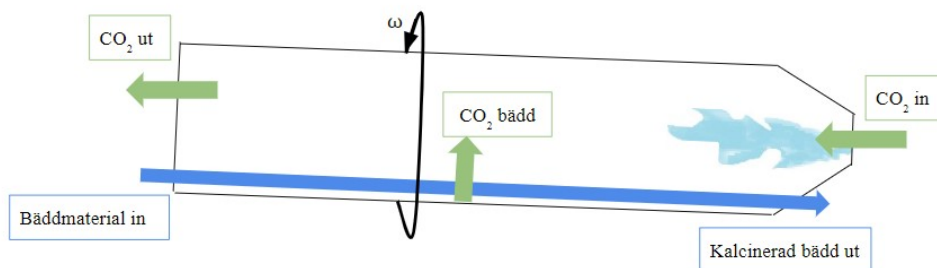
Figur 5 visar en termisk plasmagenerator som tillverkas hos det svenska företaget ScanArc Plasma Technologies AB. Den elektriska ljusbågen kan i dessa generatorer värma gasen till mellan 3000 °C och 5000 °C och typiska verkningsgrader för plasmageneratorerna ligger på 85-90 % [7].



Figur 5: Schematisk bild av plasmagenerator från ScanArc Plasma Technologies AB. Från [12]. Återgiven med tillstånd.

Det finns olika alternativ för valet av arbetsgas och vilken gas som används påverkar både värmeöverföringen och kalcineringsreaktionen. Vanliga alternativ inom industrisektorn är att använda luft och kvävgas som arbetsgas [3]. Ett annat möjligt alternativ som är önskvärt att undersöka vidare är att använda den koldioxid som bildas vid kalcineringen och recirkulera denna tillbaka in i processen. CemZero är en förstudierapport som Cementa och Vattenfall har gjort tillsammans för att utvärdera möjligheter att elektrifiera cementproduktionsprocessen och enligt denna finns det flera fördelar med att använda koldioxid som arbetsgas i generatorerna [7]. Det leder exempelvis till att det inte bildas kväveoxider vilket är fallet när luft används och det skulle även förenkla koldioxidinfångningen då den utgående gasen kommer ha en hög andel koldioxid.

Figur 6 visar hur försöksugnen Kiln Zero skulle vara utformad med en plasmagenerator där koldioxid används som arbetsgas.



Figur 6: Kalcinering i Kiln Zero vid plasmafallet.

## 2.4 Elektrisk motståndsvärmning

Det andra elektrifieringsalternativet som projektet undersöker är elektrisk motståndsvärmning. Tekniken grundar sig på resistansen som uppstår vid en så kallad resistor (eller värmeelement), som orsakar värmealstring när elektrisk ström leds igenom [13]. Processen är välstuderad inom ellära och välkänd inom den industriella världen med många alternativ på elektriskt motstånd ute på marknaden [7]. Några av fördelarna med elektriskt motstånd är den jämna temperaturen som kan hållas inom snäva gränser samt

att ingen förbränning krävs [14]. Dessutom är de snabba att justera, relativt tysta och anses vara mycket säkra då automatiska brytare undviker eventuell överbelastning. Den här typen av uppvärmningsprocess kräver dock stora ytor på resistorn för att uppnå de höga temperaturerna som krävs vid cementproduktion [7]. De väldigt höga temperaturerna som krävs för att bilda klinker begränsar motståndsvärmning till att endast användas för kalcinering.

Värmemängden som det elektriska motståndet genererar kan beräknas med hjälp av Joules lag [15] enligt

$$q_e = I^2 R t \quad (4)$$

där  $q_e$  är värmen från värmeelementet,  $I$  är den elektriska strömmen,  $R$  är resistansen och  $t$  är driftstiden. Genom att applicera Ohms lag  $U = IR$  och värmeelementets resistivitet,  $\rho_r$ , kan värmemängden skrivas om till

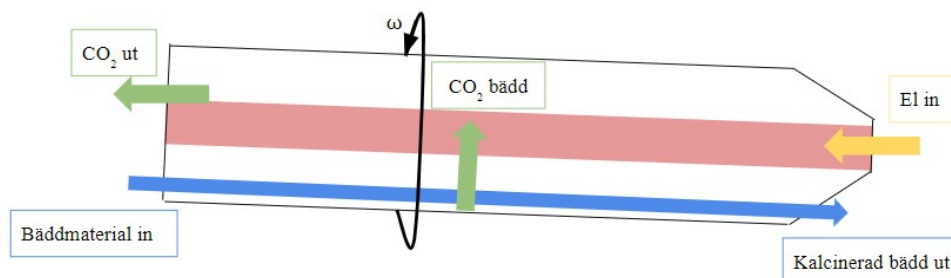
$$q_e = \frac{U^2}{\rho_r l} A t \quad (5)$$

där  $U$ ,  $l$  och  $A$  är spänningen, längden respektive arean över/av värmeelementet [13]. Vidare kan den tillförda värmen till det elektriska motståndet uttryckas med hjälp av temperaturförändringen enligt

$$q_e = m c_p \Delta T \quad (6)$$

där  $m$  är värmeelementets massa,  $c_p$  är den specifika värmekapaciteten och  $\Delta T$  är temperaturskillnaden från det ursprungliga tillståndet [13].

Elektrisk motståndsvärmning skulle kunna användas för kalcinering, utan att behöva recirkulera  $\text{CO}_2$ , vilket är fallet vid plasmavärmning [7]. Figur 7 visar hur den roterande försöksugnen Kiln Zero kan konstrueras med ett elektriskt motstånd. Värmeöverföringen från värmeelementet till råmjölet som ska kalcineras sker via strålning till bädden, konvektion till gasen som i sin tur också värmer bädden via konvektion samt ledning till bädden ifall råmjölet kommer i direkt kontakt med den varma ytan av elementet [16]. Energiförlusterna är låga och den termiska verkningsgraden, el till värme, i ugnar som används i industriellt syfte är 98 % [1].



Figur 7: Kalcinering i Kiln Zero vid elektriskt motståndsvärmning.

Utmaningar uppstår dock med att hitta material till värmeelementen som klarar av den stora värmeutvecklingen. Det finns idag metalliska samt icke-metalliska värmeelement som tål temperaturer från 1050 °C upp till 1800 °C. Motstånd som består av nikrom, vilket är den metallen som undersöks i den här studien, kan drivas inom temperaturintervallet 1050 °C och 1250 °C [13]. Även ädelmetaller kan fungera som material till värmeelement, men de är inte ekonomiskt fördelaktiga för att tillämpas i industriella sammanhang [13]. En annan nackdel med införandet av denna teknik i Cementas kalcineringsprocess är risken för ansamlingar av material på ytan av värmeelementet, som bland annat leder till lägre effektivitet [7].

## 2.5 Koldioxidinfångning och lagring

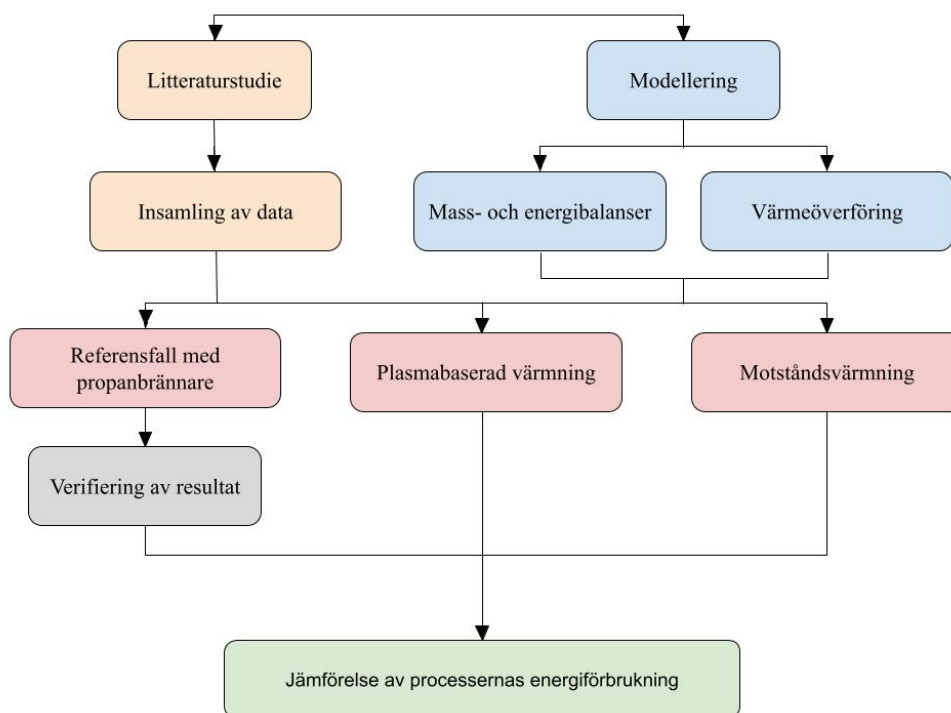
Koldioxidutsläppen kan minska mycket om uppvärmningen i cementprocessen elektrifieras. Däremot går det inte att undvika att det bildas koldioxid under kalcineringsreaktionen (se reaktion (1)), vilket utgör en stor del av de totala utsläppen från processen. För att uppnå Cementas mål om nettonollutsläpp till 2030 krävs därför ytterligare åtgärder och ett alternativ är användning av koldioxidinfångning och lagring, vilket på engelska heter Carbon Capture and Storage och förkortas CCS [7]. Detta innebär att koldioxid först fångas in och separeras från övriga gaser i processen och därefter förflyttas till lämplig plats för lagring, exempelvis i berggrunden. Det finns krav på sammansättningen av den infångade gasen för att det ska vara möjligt att använda tekniken. Det måste vara en hög andel koldioxid och en låg andel av föroreningar såsom exempelvis vatten, syrgas och kväveoxider [3]. Detta är en av anledningarna till att det är önskvärt att använda koldioxid som arbetsgas i plasmageneratoren då detta skulle ge upphov till en hög andel koldioxid i gasen som ska fångas in. För fallet med elektriskt motstånd kommer koldioxidhalten i den utgående gasen också att vara hög vilket är fördelaktigt i jämförelse med fallet med fossil förbränning [7].

## 2.6 Ekonomisk utvärdering

I förstudierapporten CemZero har det undersökts om det är rimligt att byta värmekällan till plasma och använda CCS ur ett ekonomiskt perspektiv [7]. I rapporten jämförs kostnaden på en förbränningsanläggning som referens med den uppskattade kostnaden av en plasma- och CCS-anläggning. Den tilltänkta anläggningen beräknas ha knappt 50 % högre investeringskostnad och dubblad produktionskostnad. I denna jämförelse är inte någon kostnad på koldioxidutsläpp medräknad, men detta har också undersökts med olika priser per ton utsläppt koldioxid. Då minskade skillnaden och med de högsta priserna på koldioxidutsläpp som undersöktes blev driftkostnaden för referensanläggningen högre än för plasmaanläggningen. Detta medför att det ur en ekonomisk synpunkt är rimligt att fortsätta utvärderingen av att använda plasmageneratorer för cementproduktion. För motståndsvärmning saknas data som kan jämföras med referensanläggningen.

### 3 Metod

Figur 8 visar en schematisk bild över vilken metod som används för att uppfylla syftet i detta arbete. Metoden är uppdelad i två delar, varav den ena delen utgörs av en litteraturstudie och den andra av en matematisk modellering i MATLAB av de olika processalternativen. Litteraturstudiens syfte är insamling av data om cementproduktionsprocessen, plasma och plasmageneratorer, elektrisk motståndsvärmning samt annan teknisk data som krävs för att sedan kunna modellera de olika processalternativen. I modelleringssteget modelleras först mass- och energibalanser samt värmeöverföring för den befintliga försöksugnen som används som referensfall och verifieras med hjälp utav data från försöksugnen. Värmeöverföringen som kommer att studeras är den som uppkommer via konvektion, ledning och strålning. Värmen som transporteras är värmen som uppkommer från förbränning och den kemiska reaktionen som sker i ugnen. I denna modell implementeras sedan ett plasma samt elektriskt motstånd för att studera hur värmeöverföringen samt mass- och energibalanser förändras.



Figur 8: Översikt av metoduppdelningen.

#### 3.1 Litteraturstudie

För att kunna utföra modelleringen krävs insamling av data. Arbetet har utgått från tidigare examensarbete [3], kandidatarbete [4] och rapporter som skrivits inom ämnet. Dessa arbeten gav en övergripande inblick i dagens cementproduktion, plasmavärmning och motståndsvärmning. För att få en djupare förståelse för ämnet användes därefter databaserna *Google Scholar*, *Access Science*, *Scopus* och *Science Direct* där fler relevanta studier hittades. Efter att gruppen fått mer kunskap inom ämnet började modelleringen

sättas upp. Databaserna användes då för att söka upp korrelationer till mass- och energibalanserna samt till beräkning av värmeöverföring i ugnen. Beräkningarna krävde data för processens ingående ämnen och dessa värden hämtades från databasen NIST.

### 3.2 Blackboxmodell för utsidan av ugnen

För att få en uppfattning om hur mycket energi som behövde tillföras processen för de olika fallen gjordes mass- och energibalanser på processen. I detta avsnitt beskrivs hur dessa beräkningar utfördes.

För att kunna beräkna hur mycket energi som måste tillföras processen studerades de olika utgående energiflödena. Dessa innefattade strålning ( $Q_{strålning, utsida}$ ) och konvektionsförlusterna ( $Q_{konv, utsida}$ ) på ugnens utsida, den tillförda energin till bäddmaterialet ( $Q_{fast}$ ) samt gasen i ugnen ( $Q_{gas}$ ) och reaktionsenergin ( $Q_{reaktion}$ ). De antaganden som gjordes i dessa beräkningar var dels att bädden endast består av  $CaCO_3$  samt att den enda reaktionen som skedde var kalcineringsreaktionen beskriven i ekvation (1) och att kalcineringsgraden var 95 %. Utöver dessa gjordes även antaganden om ugnens yttre strålningsegenskaper, dessa antaganden var dels att ugnens yta kan ses som opak samt kunde betraktas som en grå yta. Det antogs även att intemperatur för både gas och fast material var 25 °C samt att uttemperaturen för fast material var 860 °C för referensfallet och 912 °C för de elektrifierade alternativen, medan den för gas var 800 °C. Antagandena om uttemperaturen hos det fasta materialet baserades på data om reaktionshastighet för kalcinerung från ELSE 2 projektet [10] och uttemperaturen på gasen baserades på tidigare mätningar på försöksugnen. I beräkningar för modellering av de olika processalternativen antas det också att steady state har uppnåtts. Dessa antaganden gäller för modellering av alla processalternativ.

Det värme som behöver tillföras processen oavsett processalternativ kan beräknas enligt ekvationerna (7)-(13). I ekvationerna indexerar i och j de olika ämnen i både gas samt fasta flödet,  $\dot{m}$  är massflödet,  $c_p$  är värmekapaciteten,  $T_{gas}$  och  $T_{fast}$  är temperatur för gasen respektive fasta materialet, h är den konvektiva värmeöverföringskoefficienten, A är mantelarean hos en cylinder,  $\sigma$  är Stefan Boltzmanns konstant,  $\varepsilon$  är emissiviteten,  $T_{ref}$  är referenstemperaturen som är satt till 298,15 K,  $T_s$  är ugnens yttemperatur och  $T_\infty$  är den omgivande luftens temperatur.

$$Q_{gas} = \sum_i (\dot{m}_{i,ut} \int_{T_{ref}}^{T_{gas,ut}} c_{p_i} dT) - \sum_i (\dot{m}_{i,in} \int_{T_{ref}}^{T_{gas,in}} c_{p_i} dT) \quad (7)$$

$$Q_{fast} = \sum_j (\dot{m}_{j,ut} \int_{T_{ref}}^{T_{fast,ut}} c_{p_j} dT) - \sum_j (\dot{m}_{j,in} \int_{T_{ref}}^{T_{fast,in}} c_{p_j} dT) \quad (8)$$

$$Q_{reaktion} = \sum_i (\dot{m}_{i,ut} - \dot{m}_{i,in}) h_{f,i} \quad (9)$$

$$Q_{konv, utsida} = hA(T_s - T_\infty) \quad (10)$$

I ekvation (10) kan  $h$  beräknas enligt ekvation (11) [17] där  $k_a$  är den konduktiva värmeöverföringskoefficienten,  $D$  diametern,  $Pr$  är Prandtl's tal,  $Re_\omega$  är det roterande Reynolds talet,  $Re$  Reynolds tal och  $Gr$  är Grashof's tal. Varvtalet som användes vid beräkningar av det roterande Reynolds talet var 6 RPM.

$$h = \frac{0,11k_a Pr^{0,36}}{D} (0,5Re_\omega^2 + Re^2 + Gr)^{0,35} \quad (11)$$

Då försöksugnen befinner sig i en omgivning där hastigheten hos den omgivande fluiden är väldigt låg antogs det att denna hastighet kunde försummas, vilket gjorde att uttrycket för  $h$  kunde förenklas till ekvation (12).

$$h = \frac{0,11k_a Pr^{0,36}}{D} (0,5Re_\omega^2 + Gr)^{0,35} \quad (12)$$

Vid beräkning av strålningsförlusterna från ugnens utsida enligt ekvation (13) användes emissiviteten för ugnens mantel som består av rostigt stål som ligger mellan 0,94 och 0,97 [18].

$$Q_{strålning, utsida} = \sigma A \varepsilon (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (13)$$

För samtliga processalternativ beräknades sedan värmebehovet för processen enligt ekvation (14).

$$Q_{behov} = Q_{gas} + Q_{fast} + Q_{reaktion} + Q_{konv, utsida} + Q_{strålning, utsida} \quad (14)$$

### 3.2.1 Referensfallet

För referensfallet gäller det att behovet,  $Q_{behov}$ , är ekvivalent med tillförd effekt via förbränning,  $Q_{förbränning}$ , enligt ekvation (15) där  $\dot{m}_{bränsle}$  beskriver flödet av bränsle och  $H_{i, bränsle}$  är det effektiva värmevärdet hos bränslet. Bränslet som används i referensfallet är propan.

$$Q_{förbränning} = \dot{m}_{bränsle} H_{i, bränsle} \quad (15)$$

Gasmassflödet in i systemet är mängden luft som behövs för fullständig förbränning av propan enligt ekvation (16) med ett luftöverskott på 20 %, det vill säga luftfaktorn  $\lambda = 1,2$ .



För beräkningarna antas luften bestå av 21 %  $O_2$  och 79 %  $N_2$ . Massflödet ut består av avgaserna som bildas genom förbränningen, koldioxiden som bildas i kalcineringsreaktionen, se ekvation (1), och den del av luftflödet som inte reagerar.

### 3.2.2 Plasmavärmning

Vid en processändring till plasmavärmning kommer reaktionsenergin och energiförlusten i form av strålning och konvektion vara lika stora som i referensfallet. Energiinnehållet i gasen förändras dock eftersom koldioxid antas vara den enda gasen i ugnen. Gasens energiförändring i processen kan beräknas enligt ekvation (17).

$$Q_{gas,CO_2} = Q_{CO_2,ut} - Q_{CO_2,in} \quad (17)$$

I roterugnen tas det in ett volymflöde med koldioxid på  $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$  per kW tillförd el. Volymflödets energiinnehåll kan beräknas med ekvation (18), där massflödet itereras fram med avseende på hur mycket el som tillförs och entalpin beräknas med hjälp av data från NIST [19].

$$Q_{CO_2,in} = \dot{m}_{CO_2,in} H_{CO_2,in} \quad (18)$$

Det införda gasflödet värms sedan upp i plasmageneratoren som antas ha en verkningsgrad på 90 %. Efter uppvärmningen av koldioxid sker kalcineringen och mer koldioxid bildas som tillsammans med gasinflödet lämnar försöksugnen. Koldioxidets energiinnehåll i utflödet beräknas därmed med ekvation (19).

$$Q_{CO_2,ut} = (\dot{m}_{CO_2,in} + \dot{m}_{CO_2,reak}) H_{CO_2,ut} \quad (19)$$

Bäddmaterialet behöver även värmas till en högre temperatur än i referensfallet till följd av koldioxidomgivningen som förskjuter reaktionen, vilket gör att energin till bäddmaterialet blir annorlunda i jämförelse med referensfallet.

### 3.2.3 Elektrisk motståndsvärmning

Processen för elektriskt motstånd i försöksugnen har modellerats på liknande sätt som för referensfallet. Verkningsgraden för elektrisk motståndsvärmning är hög och vid beräkning har den värme som avges till processen antagits vara 98 % av den tillförda elen. Reaktionsvärmen samt förlusterna till omgivningen i form av strålning och konvektion antogs vara samma som för referens- och plasmafallet. Det som skiljer sig är den energi som går till gasflödet samt bäddmaterialet. Att energin till gasflödet skiljer sig från referensfallet beror på att mängden gas är mindre än i referensfallet. Vid modellering användes ekvation (7) för beräkning av den värme som går till gasen men här finns inget inflöde och utflödet antogs enbart bestå av den koldioxid som bildas vid 95 % kalcineringsgrad. Detta gör att värmen som går till gasen kunde beräknas enligt ekvation (20).

$$Q_{gas} = \dot{m}_{CO_2,reak} H_{CO_2,ut} \quad (20)$$

På samma sätt som i plasmafallet så kommer energin till bäddmaterialet bli annorlunda i jämförelse med referensfallet till följd av koldioxidomgivningen, vilket gör att det krävs en högre temperatur för att reaktionen ska ske.

### 3.3 Värmeöverföring i ugnen

För att sedan kunna beskriva mer konkret hur värmeöverföringen sker i de olika fallen studerades hur strålning och konvektion förändras inne i ugnen. Dessutom beräknades innertemperaturen på väggens insida på två olika sätt samt flamtemperaturen för referens- respektive plasmafallet. I detta avsnitt presenteras hur dessa beräkningar utfördes.

#### 3.3.1 Temperatur på insidan av ugnen

För att utföra strålnings- och konvektionsberäkningarna som presenteras i avsnitt 3.3.3 och 3.3.4 behövs temperaturen på insidan av ugnen. Denna temperatur beräknades på två olika sätt.

I alternativ 1 beräknades temperaturen på ugnens insida med hjälp av ledningsberäkningar genom ugnens vägg. Ledningen genom väggen antogs vara lika stor vid referensfallet, plasmavärmningen och elektriskt motståndsvärmning eftersom ugnens utformning är densamma oavsett hur uppvärmningen sker. Dessutom antogs yttemperaturen längs med ugnen, vilket i tidigare försök har bestämts i sju punkter [1], vara lika stor i de tre olika fallen. Utifrån dessa antaganden och datapunkter ställdes en energibalans över väggen upp, som beskriver att ledningen genom väggen är lika stor som  $Q_{konv,utsida}$  och  $Q_{strålning,utsida}$  på ugnens utsida, enligt ekvation (21). Ekvationen för ledning tillämpades på en cylinder där  $T_{s,mitt}$  är temperaturen mellan den murade väggen och stålet,  $T_{s,o}$  är yttemperaturen på ugnen och  $T_{s,i}$  är innertemperaturen. Värmeledningskoefficienten,  $k$ , för stål (AISI10) sattes till  $k_{steel} = 63,9$  W/mK och till  $k_{brick} = 1$  W/mK för murat tegel (Firebrick clay) [20]. Även pilotugns längd,  $L$ , och radierna på ugnen var givna. Med hjälp av uttrycket i ekvation (21) kunde först  $T_{s,mitt}$  och därefter  $T_{s,i}$  beräknas.

$$\frac{2\pi L k_{steel}(T_{s,mitt} - T_{s,o})}{\ln(r_o/r_{mitt})} = \frac{2\pi L k_{brick}(T_{s,i} - T_{s,mitt})}{\ln(r_{mitt}/r_i)} = Q_{konv,utsida} + Q_{strålning,utsida} \quad (21)$$

Då det finns en osäkerhet i materialens värmeledningskoefficient beräknades temperaturen på insidan av ugnen med ett andra alternativ. I alternativ 2 bestämdes temperaturen genom att ställa upp en värmebalans som säger att summan av konvektionen och strålningen till väggens insida ska vara lika med förlusterna på utsidan av ugnen enligt ekvation (22).

$$Q_{konv,insida} + Q_{strålning,insida} = Q_{konv,utsida} + Q_{strålning,utsida} \quad (22)$$

Hur förlusterna på utsidan av ugnen beräknades med avseende på de uppmätta temperaturerna på ugnens utsida beskrivs i avsnitt 3.2. Beräkningar för strålning och konvektion till väggens insida beskrivs senare i avsnitt 3.3.3 respektive 3.3.4. Då både strålningen och konvektionen till insidan av väggen beror på väggtemperaturen löstes balansen iterativt.

### 3.3.2 Flamtemperaturer

Strålnings- och konvektionsberäkningar i avsnitt 3.3.3 och 3.3.4 kräver temperaturer på värmekällorna.

För referensfallet antogs värmekällans temperatur vara den adiabatiska flamtemperaturen, vilket är den temperatur som flammen får vid förbränning när det inte förekommer några värmeförluster. Den adiabatiska flamtemperaturen,  $T_f$ , beräknades enligt ekvation (23) [21].

$$Q_{behov} = \sum_i (\dot{m}_i \int_{T_{ref}}^{T_f} c_{p,i} dT) \quad (23)$$

Där  $\dot{m}_i$  är massflödet för alla ämnen,  $i$ , som finns i förbränningsgasen vilket inkluderar luftöverskottet samt koldioxiden och vattnet som bildas vid förbränningen av propan. Flamtemperaturen beräknades vid ett luftöverskott på 20 %. För att även undersöka hur den adiabatiska flamtemperaturen påverkas av mängden luft beräknades den för olika storlek på luftöverskottet.

Temperaturen på plasmaflamman togs fram med hjälp av kemisk jämviktsdata från *FactSage*, vilket presenteras i appendix B. Med hjälp av denna data kunde en temperatur avläsas utifrån entalpin för koldioxiden. Denna entalpi beräknades med hjälp av det totala energibehovet som beräknades med hjälp av blackboxmodellen samt massflödet av koldioxid in i plasmageneratoren.

### 3.3.3 Strålning

I försöksugnen vid referensfallet sker strålningen mellan flammans yta, ugnens väggar (inklusive ändar) och bäddens toppyta, där flammen approximerades till en cylinder. För att förenkla beräkningarna gjordes antagandet om grå kroppar och opaka ytor vilket innebär att emissiviteten är oberoende av våglängden samt att ytan inte släpper igenom någon strålning, alltså att transmissionen är noll [18]. Därmed kunde strålningsutbytet uttryckas enligt ekvationerna (24) och (25).

$$\frac{\epsilon_i}{\rho_i} E_{b,i} = J_i (1 - F_{ii} + \frac{\epsilon_i}{\rho_i}) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N F_{ij} J_j \quad (24)$$

$$\frac{q_i}{A_i} = J_i (1 - F_{ii}) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N F_{ij} J_j \quad (25)$$

Där  $F$  är siktfaktor,  $J$  är radiositet,  $\epsilon$  är emissivitet,  $\rho$  är reflektans,  $E_{b,i}$  är svartkroppsstrålning,  $A$  är area och  $i$  och  $j$  är index för olika ytor. Notera att ekvation (24) och ekvation (25) med fördel används ifall temperaturen  $T_i$  är känd för att beräkna nettoutbytet av strålning  $q_i$  för en yta  $i$ . Detta genom att utifrån dessa uttryck ställa upp en kvadratisk matris enligt ekvation (24) vilket användes till att beräkna radiositeten  $J$

för de olika ytorna som sedan användes för att beräkna  $q_i$  enligt ekvation (25). Svartkroppsstrålningen beräknades enligt ekvation (26) där  $\sigma$  är Stefan-Boltzmanns konstant [18].

$$E_{b,i} = \sigma T_i^4 \quad (26)$$

Andra samband som användes vid strålningsberäkningarna var reciprocitetsförhållandet samt summeringsregeln för siktfaktorer vilka beskrivs i ekvationerna (27) och (28) [18].

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (27)$$

$$F_{ij} = 1 - \sum_{\substack{i \\ i \neq j}} F_{ij} \quad (28)$$

Siktfaktorerna för ett system där en större cylinder omsluter en mindre cylinder enligt figur 9 kunde beräknas enligt ekvationerna (29)-(31) [22].

$$F_{12} = \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi X} \left\{ \cos^{-1} \frac{B}{A} - \frac{1}{2Y} [\sqrt{(A+2)^2 - (2X)^2} \cos^{-1} \frac{B}{XA} + B \sin^{-1} \frac{1}{X} - \frac{\pi A}{2}] \right\} \quad (29)$$

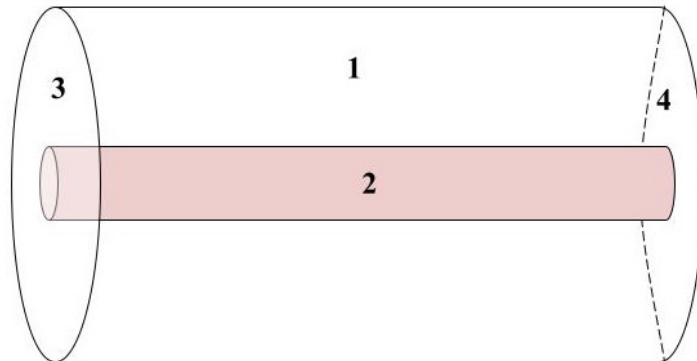
$$F_{11} = 1 - \frac{1}{X} + \frac{2}{\pi X} \tan^{-1} \left( \frac{2\sqrt{X^2 - 1}}{Y} \right) - \frac{Y}{2\pi X} \left\{ \frac{\sqrt{4X^2 + Y^2}}{Y} \sin^{-1} \left[ \frac{4(X^2 - 1) + \frac{Y^2}{X^2}(X^2 - 2)}{Y^2 + 4(X^2 - 1)} \right] - \sin^{-1} \left( \frac{X^2 - 2}{X^2} \right) + \frac{\pi}{2} \left( \frac{\sqrt{4X^2 + Y^2}}{Y} - 1 \right) \right\} \quad (30)$$

$$F_{13} = F_{14} = \frac{1}{2}(1 - F_{12} - F_{11}) \quad (31)$$

Här är  $X = \frac{b}{a}$  och  $Y = \frac{c}{a}$ , där  $a$  är radien på den inre cylindern,  $b$  är radien på den yttre cylindern och  $c$  är längden på cylindrarna. Vidare beräknades  $A$  och  $B$  enligt ekvation 32 och 33.

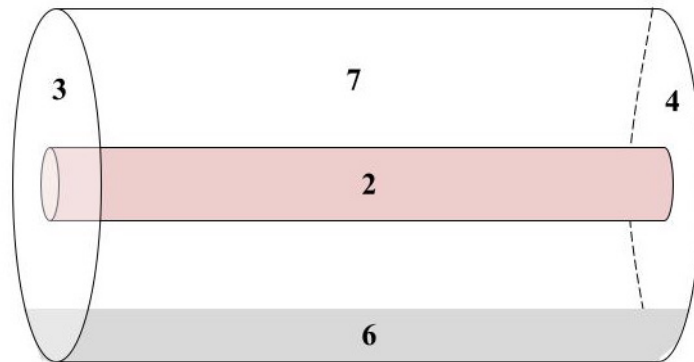
$$A = Y^2 + X^2 - 1 \quad (32)$$

$$B = Y^2 - X^2 + 1 \quad (33)$$



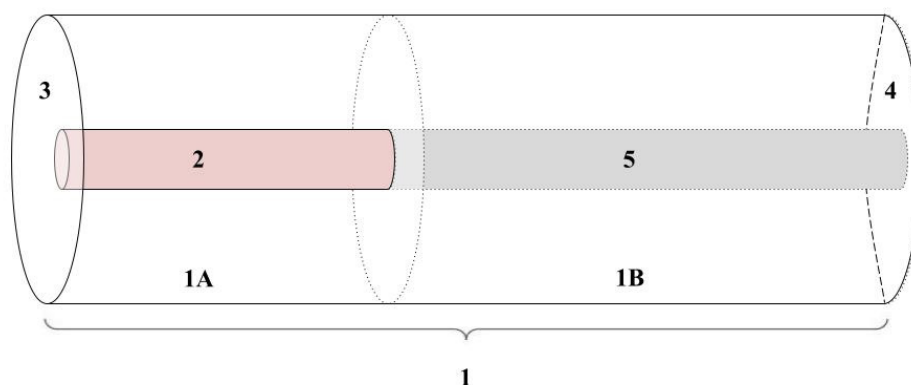
Figur 9: Ytor som tas hänsyn till vid beräkning av siktfaktorer enligt ekvationerna (29)-(31).

Dock ser inte fallen som studeras i denna studie precis ut som fallet som beskrivs i figur 9, utan det blir två helt nya fall beroende på om plasma- och referensfallet eller elektriskt motståndsfallet studeras. I elektriskt motståndsfallet ser systemet ut som i figur 10 där yta 2 är det elektriska motståndet, yta 3 och 4 är toppen och botten på ugnen, yta 6 är den del av ugnens vägg som täcks av bädden och yta 7 är den del av väggen som inte täcks av bädden. I denna modell approximerades bädden som en del av ugnens vägg då höjden av bädden har försumbara effekter på geometrin av systemet, denna approximation gjordes för alla fall.



Figur 10: Ytor vid elektriskt motståndsfallet.

I förbränningsfallet och plasmafallet studerades istället ett system som ser ut som i figur 11 där yta 1A är den del av ugnens mantel som är lika lång som flammen och yta 1B är den resterande delen av manteln, yta 2 är flammen, yta 3 och 4 är botten på ugnen respektive toppen och yta 5 är en hypotetisk yta som egentligen inte existerar utan används för att kunna genomföra beräkningar och bestämma siktfaktorerna. Utöver denna uppdelning av ytor gjordes även samma uppdelning av bäddtäckt mantel och otäckt mantel som i figur 10.



Figur 11: Ytor i förbrännings- och plasmafallet.

För att beräkna siktfaktorerna för hur den bäddtäckt delen av manteln samt den otäckta delen av manteln (yta 6 och 7) i de båda fallen ser de andra ytorna användes areaförhållandena som beskrivs i ekvationerna (34) och (35) där  $A_1$  är hela mantelns area.

$$F_{i6} = \frac{F_{i1}A_6}{A_1} \quad (34)$$

$$F_{i7} = \frac{F_{i1}A_7}{A_1} \quad (35)$$

I tabell 3 anges de antagna emissiviteterna för de olika ytorna i figur 10 och 11. Emissiviteten för plasman och flammen i referensfallet är uppskattad med hjälp av data och diagram från [18], det elektriska motståndet antogs vara av nikrom, väggarna (yta 3, 4 och 7) antogs vara av "fireclay" och bädden (yta 6) antogs vara av råmjöl.

Tabell 3: Emissiviteter.

$\varepsilon_{2,propan}$	0,4
$\varepsilon_{2,plasma}$	0,2
$\varepsilon_{2,motstånd}[13]$	0,88
$\varepsilon_3[18]$	0,75
$\varepsilon_4[18]$	0,75
$\varepsilon_6[23]$	0,9
$\varepsilon_7[18]$	0,75

En utmaning med zonindelning av ugnen är att den verkliga flammen (yta 2) och den hypotetiska flammen (yta 5) är konvexa ytor som befinner sig i konkava ytor (omslutande ugnsväggar). Dessa ytor (yta 2 och yta 5) kommer nämligen blockera strålningen mellan alla de andra ytorna. För att ta hänsyn till detta togs det därför fram siktfaktorer för cylindrar med småcylindrar (flammar) inuti och tomma cylindrar (ugn utan flamma). Utöver dessa siktfaktorer togs det också fram siktfaktorer för flammans topp som beskrevs som en disk som strålar till en större disk. Utifrån ovanstående, beräknades de önskvärda siktfaktorerna med hjälp av summeringsregler, reciprocitet och symmetri.

Siktfaktorn för två motstående diskar i en tom cylinder, alltså en ugn utan flamma, togs fram enligt ekvation (36) [22].

$$F_{34} = \frac{1}{2}(Z - \sqrt{Z - 4X^2Y^2}) \quad (36)$$

Här är  $X = \frac{a}{c}$ ,  $Y = \frac{c}{a}$  och  $Z = 1 + (1 + X^2)Y^2$ , där  $c$  är cylinderns längd och  $a$  är radien för yta 3 respektive 4.

För att bestämma siktfaktorerna för flamtoppen användes också ekvation (36) fast vid beräkning av  $X$  definierades  $a$  som flammans radie och  $Y$  definierades som  $\frac{c}{b}$ , där  $b$  är ugnens radie [22].

Arean på propanflamman, plasmaflamman och motståndet beräknades genom en iterativ process enligt ekvation (37) där det antogs att all tillförd effekt till systemet kommer från flamman respektive motståndet.

$$A_2 = \frac{q_2(1 - \varepsilon_2)}{(E_{b,2} - J_2)\varepsilon_2} \quad (37)$$

Dessutom antogs det att all värmeöverföring sker via strålning, vilket leder till att alla utförda beräkningar gäller under ett extremt fall för de tre olika alternativen som undersöktes.

### 3.3.4 Konvektion

Värmeöverföringen som sker med konvektion mellan gasen i ugnen och bädden beräknades enligt ekvation (38) och (39) för både plasmafallet och referensfallet [17].

$$Q_{konvektion} = A_{fast}h(T_g - T_b) = A_{fast}0,4G_g^{0,62}(T_g - T_b) \quad (38)$$

$$G_g = \frac{\dot{V}_g P_g}{A_{tv}} \quad (39)$$

$A_{fast}$  är arean av bäddens yta,  $T_g$  är gasens temperatur,  $T_b$  är bäddens temperatur,  $\dot{V}_g$  är volymflödet av gasen i ugnen,  $P_g$  är gasens densitet och  $A_{tv}$  är ugnens tvärsnittsarea där gasen flödar. Skillnaden mellan referensfallet och plasmafallet är att sammansättningen av gasen, volymflödet av gasen och temperaturen på gasen och bädden skiljer sig åt. Korrelationen är framtagen för en ugn med en fossil bränseflamma, men då gasens volymflöde samt hastighet är i samma storleksordning antogs korrelationen gälla även för plasmafallet. Då temperaturer, volymflöden och densitet ändras axiellt längs ugnen har medelvärden av dessa beräknats. För gasens temperatur beräknades ett approximerat medelvärde mellan värmekällans temperatur och temperaturen ut ur ugnen. Det fasta bäddmaterialet kommer att dras med upp på ugnens väggar till följd av rotationen men detta bortsågs från vid beräkning av  $A_{fast}$ .

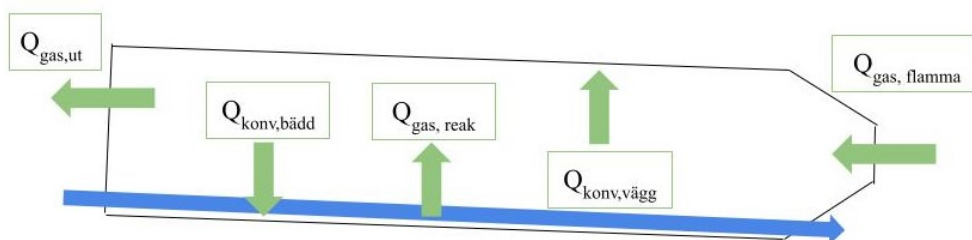
Konvektionen som sker mellan gasen i ugnen och ugnens vägg beräknades på samma sätt med ekvation (38) och (39) för både referensfallet samt plasmafallet med skillnaden att  $A_{fast}$  i detta fall är arean av den del av ugnens innervägg som inte är täckt med bädd.

För fallet med elektriskt motstånd antogs konvektionsbidragen från gasen till bädden och väggen vara försumbara. Volymflödet och hastigheten på gasen är betydligt mindre än för övriga två fall och dessutom har gasen som bildas till en början ungefär samma temperatur som bädden och väggen.

Från tidigare försök i Kiln Zero [1] uppmättes avgastemperaturen ut från ugnen i referensfallet till mellan 700 och 800 ° C. Det framkom dock i arbetet att avgastemperaturen inte mättes ofta och att det därmed råder en osäkerhet i vilken temperatur som gasen ut ur ugnen har. För att få en bättre bild av det ställdes därför beräkningar upp enligt en energibalans över gasen i ekvation (40) som gjordes utifrån figur 12. I energibalansen

antogs ett extremfall där den enda värmeöverföringen från gasen är via konvektion. I ekvation (40) motsvarar  $Q_{gas,flamma}$  värmeflödet efter att gasen har värmts upp av flammans,  $Q_{gas,reak}$  värmeflödet av koldioxiden som bildas från kalcineringen,  $Q_{konv,bädd}$  konvektionen från luften till bädden,  $Q_{konv,vägg}$  konvektionen från luften till väggen och slutligen  $Q_{gas,ut}$  värmeflödet ut ur ugnen.

$$Q_{gas,ut} = Q_{gas,flamma} + Q_{gas,reak} - Q_{konv,bädd} - Q_{konv,vägg} \quad (40)$$



Figur 12: Energibalans över gasen.

Från  $Q_{gas,ut}$  kunde gasens uttemperatur beräknas genom iteration. I iterationsprocessen bestämdes  $Q_{gas,ut}$  enligt ekvation (40) med hjälp av en startgissning på temperaturen. Sedan beräknades entalpin för gasen med ekvation (41).

$$H_{gas,ut} = \frac{Q_{gas,ut}}{\dot{m}_{gas,ut}} \quad (41)$$

Från entalpin bestämdes motsvarande temperatur för gasen enligt tabelldata från NIST.

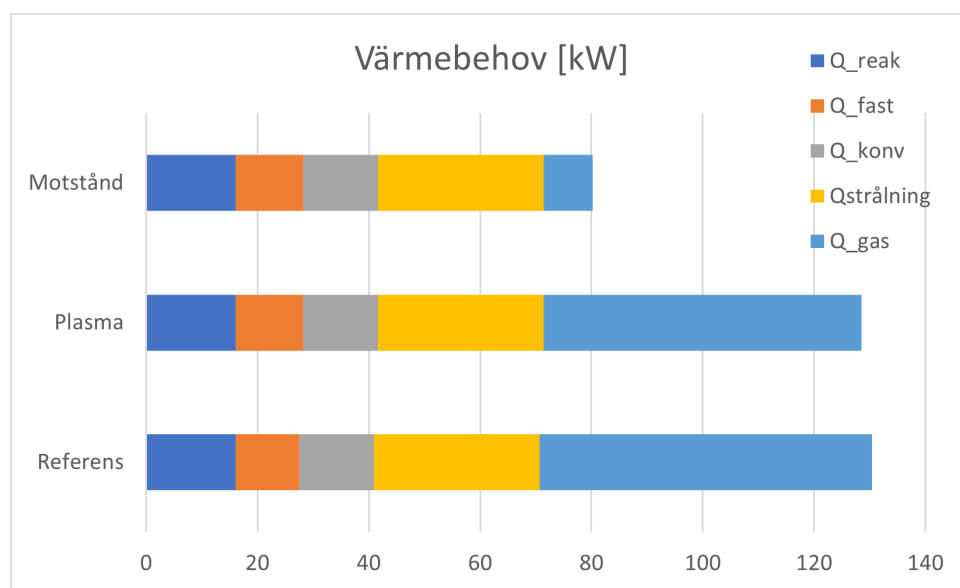
I ett tidigare försök [1] gjordes endast försök på en propanflamma och inte för en plasmabrännare. Därför krävdes även en beräkning på uttemperaturen för plasmafallet, vilket gjordes utifrån samma värmebalans över gasen i ekvation (40) som i referensfallet. I ekvationen substituerades  $Q_{gas,flamma}$  med  $Q_{gas,plasma}$ , det vill säga till värmeflödet efter att gasen har värmts upp av plasmavärmaren.

## 4 Resultat och diskussion

I detta avsnitt presenteras och diskuteras resultaten i projektet. Detta innefattar resultat för blackboxmodellen samt värmeöverföringen i form av temperaturer, strålning och konvektion inne i ugnen.

### 4.1 Blackboxmodell

Processens värmebehov med blackboxmodellen syns i figur 13 där vi kan se det totala värmebehovet för de olika alternativen och hur det är uppbyggt av bidragen från det fasta materialet, gasen, reaktionen och förlusterna till utsidan genom konvektion och strålning.



Figur 13: Jämförelse av processens värmebehov mellan de olika fallen och vilken del av processen som ger upphov till vad.

För att kunna göra senare jämförelser behövs energibehovet till bädden, gasen och förlusten genom väggen. För bädden är det värmebehovet för det fasta materialet och reaktionen. Förlusten genom väggen motsvarar strålningen och konvektionen på utsidan. Hur stora dessa är för de olika fallen visas i tabell 4.

Tabell 4: Hur mycket energi som går till varje del inne i ugnen enligt blackboxmodellen för de olika alternativen på värmekälla.

	Referensfall	Plasmavärmning	Motståndsvärmning
Bädden	27,47 kW	28,22 kW	28,12 kW
Förlust till utsidan	43,16 kW	43,16 kW	43,16 kW
Gasen	59,79 kW	57,17 kW	8,88 kW

För att klara av detta värmebehov och eventuella verkningsgrader behöver energi tillföras till systemet genom bränsle eller el, beroende på systemet. För att kunna uppnå detta behöver referensfallet och plasmafallet ett massflöde av bränsle respektive koldioxid. Dessa energibehov och massflöden presenteras i tabell 5.

Tabell 5: Mängden extern energi som måste tillföras systemet för varje fall och det massflöde som krävs för att uppnå detta.

Tillförd energi och massflöden					
Referensfall		Plasmavärmning		Motståndsvärmning	
$Q_{\text{bränsle}}$	130,44 kW	$Q_{el}$	142,84 kW	$Q_{el}$	81,79 kW
$\dot{m}_{\text{bränsle}}$	10,13 kg/h	$\dot{m}_{CO_2}$	202,60 kg/h	-	-

Det är tydligt att elektrisk motståndsvärmning är mest energieffektivt eftersom alla fall värmer samma mängd material. Att det är en så tydlig skillnad beror på att gasens värmebehov i motståndsfallet är lägre. Detta är på grund av att elektriskt motstånd inte har ett inflöde av en kall gas som behöver värmas och att det flödet som kommer ut bara är det som bildats i kalcineringsreaktionen och är därmed mycket mindre än för de andra fallen. Plasmavärmningen och referensfallet har liknande värmebehov i systemet, men eftersom plasmavärmningen har en sämre verkningsgrad behöver mer energi tillföras för att ge samma mängd energi till systemet. Blackboxmodellen tar dock inte hänsyn till något som händer inne i ugnen, utan utgår bara från önskade in- och uttemperaturer och antar att energin i systemet går dit den önskas. På grund av detta är det inte en särskilt bra modell, men kan ge en bra uppskattning på storleken på energibehovet.

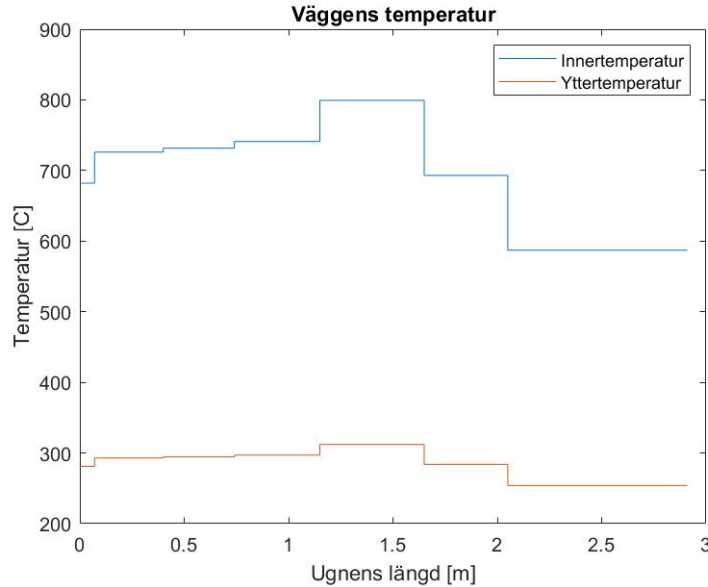
Ett sätt att minska elförbrukningen i plasmafallet är att recirkulera delar av den utgående koldioxiden och höja temperaturen på inflödet till plasmageneratoren till utgående temperatur. Om målet är att resten av processen ska vara konstant med samma temperatur på plasmaflamman och samma massflöde av gas in och ut så kommer elbehovet minska eftersom koldioxiden då inte behöver värmas lika mycket. I beräkningarna för  $Q_{gas}$  blir det extra tydligt, eftersom in- och utflödet av gasen har samma temperatur och enda skillnaden är att utflödet är lite större på grund av kalcineringsreaktionen som sker. Tydligt är att värmebehovet minskar enligt ekvation (14), då gasens värmebehov blir mycket mindre istället för tydligt störst när koldioxiden in har rumstemperatur.

## 4.2 Värmeöverföring i ugn

Här presenteras resultat från beräkningarna kring värmeöverföringen som sker i ugnen, vilka sedan också diskuteras och analyseras.

### 4.2.1 Temperatur på insidan av ugnen

I figur 14 visas hur innertemperaturen inne i ugnen förändras längs med väggen och hur den förhåller sig till den tidigare uppmätta yttemperaturen på väggen [1]. Innertemperaturen är beräknad med hjälp av alternativ 1, det vill säga med ledning genom väggen. Som visas i grafen varierar temperaturen i de sju zonerna mellan cirka 590 °C och 800 °C.



Figur 14: Temperatur på ugnens vägg längs med ugnen.

Med hjälp av alternativ 1 och 2 beräknades innertemperaturen på ugnen, där resultaten presenteras i tabell 6. Vid alternativ 1 som baserades på ett medelvärde av temperaturerna i figur 14 blev medeltemperaturen 709 °C. Dessvärre är det lägre än kalcineringstemperaturen som är 860 °C för referensfallet och 912 °C vid plasmavärmning och elektrisk motståndsvärmning, där skillnaderna i kalcinerings temperaturerna kan förklaras med att gasomgivningen består av ren koldioxid i plasmafallet och i motståndsvärmningsfallet, medan det är blandad gas i referensfallet. Det är problematiskt att kalcinerings temperaturen inte uppnås eftersom väggen och bädden antas ha liknande temperatur och om bädden inte uppnår kalcinerings temperaturen kommer ingen reaktion ske.

Vidare i tabell 6 presenteras resultaten för alternativ 2 där värmeöverföringen på inre väggen antas vara lika stor som värmeöverföringen på yttre väggen. För referensfallet blev temperaturen 1144 °C och för plasmafallet 1193 °C. Dessa är istället runt 200 °C över kalcinerings temperaturen vilket kan bidra till att värme överförs från väggen till bädden istället. För elektrisk motståndsvärmning beräknades innertemperaturen på ugnen till 910 °C.

Tabell 6: Medeltemperatur på insidan av väggen.

Medeltemp.	Referensfall	Plasmavärmning	Motståndsvärmning
Alt.1	709 °C	709 °C	709 °C
Alt.2	1144 °C	1193 °C	910 °C
Kalcinerings temp.	860 °C	912 °C	912 °C

Beräkningarna i alternativ 1 innehåller flera antaganden som kan medföra att medeltemperaturen blir lägre än väntat. En anledning antas vara att det finns en osäkerhet kring hur stor värmekonduktiviteten är för teglet och stålet som väggen består av. Vid

en känslighetsanalys halverades värmekonduktiviteten till  $k_{steel} = 40 \text{ W/mK}$  och  $k_{brick} = 0,5 \text{ W/mK}$ . Det resulterade i att medeltemperaturen på väggen blev  $1130 \text{ °C}$ , vilket är över kalcineringstemperaturen. Därför visar resultatet på att värmekonduktiviteten bör vara lägre än det som sattes i metoden för stålet och teglet.

Osäkerheterna kring värdena på värmekonduktiviteten kan bero på att beräkningarna utgår från att väggen endast består av tegel och stål. I verkliga fallet produceras dock restprodukter över tid som ansamlas på väggen. Det gör att väggen blir tjockare och värmeledningsförmågan genom väggen försämrats. Dessutom är det osäkert vilken typ av stål som väggen består av och därmed kan fel typ av stål ha betraktats, vilket gör att värdet på värmekonduktiviteten kan avvika mycket från det verkliga värdet.

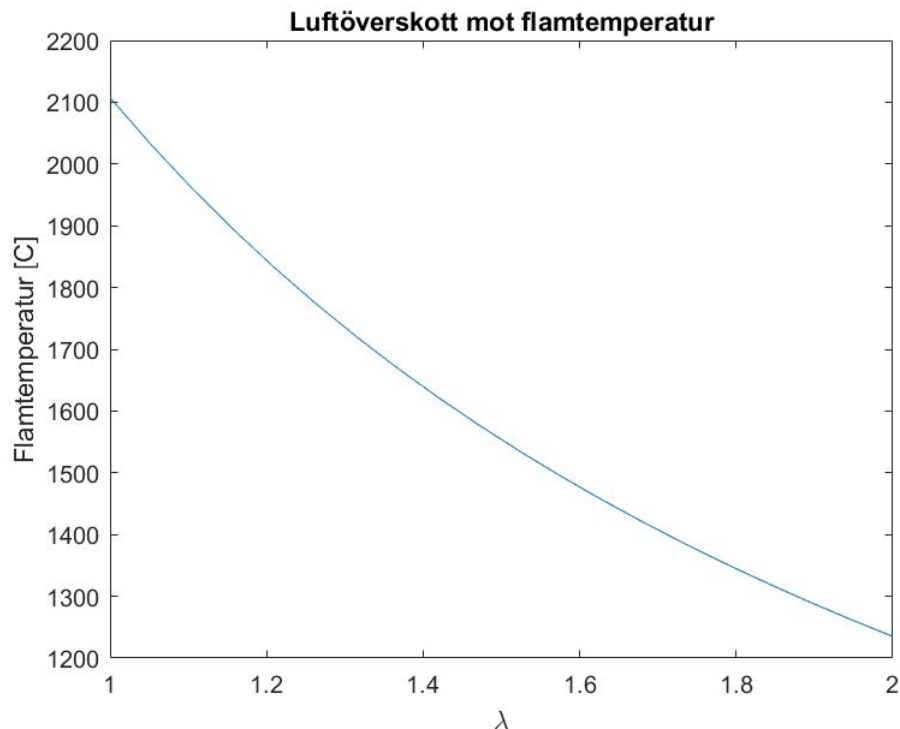
En annan felkälla för båda alternativen är att beräkningarna endast baseras på ett försöks uppmätta värden på utsidan av ugnen [1]. För att mätfel inte ska ha lika stor påverkan på resultatet hade ytterligare data på väggens yttre temperatur krävts som är mer exakta.

Även vid alternativ 2 finns det osäkerheter kring huruvida resultaten stämmer med verkligheten eller inte. Vid beräkning av värmeöverföringen på insidan av ugnen adderades nämligen två extremfall, vilket gör att väggens innertemperatur blir högre. Anledningen till att temperaturen vid motståndsvärmning är lägre än i de andra fallen är att det antas vara endast strålning och ingen konvektion inne i ugnen. Detta innebär att vid elektriskt motstånd antas endast ett extremfall av värmeöverföring i form av strålning och därmed adderas inte två extremfall som vid referens- och plasmafallet.

Resultaten visar på att medeltemperaturen på väggen bör vara mellan alternativ 1 och alternativ 2, då alternativ 1 är lite för låg temperatur medan alternativ 2 är för hög temperatur i jämförelse med kalcinerings temperaturerna. Beräkningarna i båda alternativen innehåller flera felkällor som kan påverka de uträknade medeltemperaturerna. Därför valdes de slutgiltiga medeltemperaturerna på väggen till kalcinerings temperaturerna för både referensfallet och plasmafallet. Dessa väggtemperaturer användes sedan för att beräkna värmeöverföringen inne i ugnen.

#### 4.2.2 Flamtemperaturer

Den adiabatiska flamtemperaturen för referensfallet beräknades till  $1844 \text{ °C}$  vid ett luftöverskott på 20 %. I figur 15 visas hur flamtemperaturen varierar med olika luftöverskott. När luftöverskottet ökar så minskar flamtemperaturen eftersom det blir en större mängd gas som värmen ska fördelas på efter förbränningen. Vid beräkning av flamtemperaturen har det antagits att det är en adiabatisk flamma vilket är en felkälla. I verkligheten förekommer troligen värmeförluster vid förbränningen vilket kommer sänka temperaturen på flamman.



Figur 15: Flamtemperaturen som funktion av en varierad luftfaktor  $\lambda$ .

Flamtemperaturen för fallet med plasmavärmning beräknades till 1783 °C. Notera att detta är lägre än det intervall, 3000-5000 °C, som angivits för ScanArcs plasmageneratorer i teorin avsnitt 2.3. Detta kan bero på att för höga temperaturer kan skapa problem i industriella processer och därför är lite lägre temperaturer att föredra vilket kan styras efter önskemål. Små delar av flammans kan komma upp i högre temperaturer, men generellt sett så är temperaturen på hela flammans lägre än 3000 °C.

Flamtemperaturerna både för referens- och plasmafallet är baserade på det totala energibehovet utifrån blackboxmodellen. Då det finns en viss osäkerhet i dessa beräkningar kan det även ha påverkat resultatet av flamtemperaturerna.

### 4.2.3 Strålning

Det resultat som presenteras för strålningen för de tre olika fallen är fall där temperaturen på väggen i respektive fall är calcineringstemperaturen för det specifika fallet. I tabell 10, 11 och 12 i appendix A redovisas de siktffaktorer som beräknades för de olika fallen.

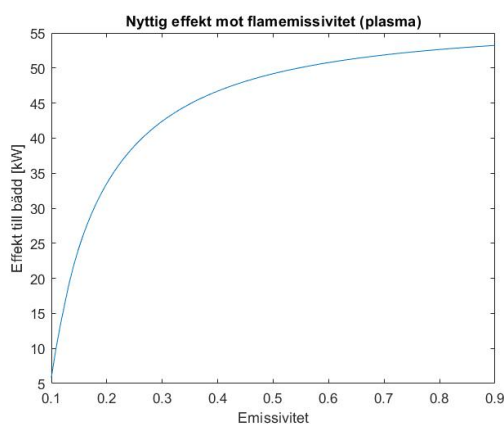
De beräknade värdena på tillförd värmeeffekt till bädd och vägg i de tre undersökta fallen referens-, plasma- och motståndsfallet, presenteras i tabell 7. Resultatet visar att den tillförda effekten till ugnens väggar är högre än effekten som tillförs bädden. Detta beror till största del på att väggarnas totala area som kan uppta strålning är mycket större än bäddens area. Emissivitetfaktorn för väggarna och bädden är relativt lika, vilket innebär att denna faktor inte har en avgörande påverkan på hur den tillförda vägg- och bäddeffekten förhåller sig till varandra.

Tabell 7: Strålning till bädd och vägg i referensfallet, plasmafallet respektive motståndsfallet.

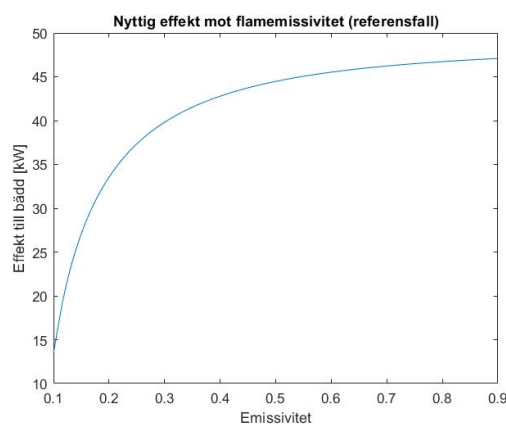
Strålning	Referensfall	Plasmavärmning	Motståndsvärmning
Bädd	42,71 kW	33,54 kW	35,16 kW
Vägg	88,17 kW	109,3 kW	46,63 kW

Från tabell 7 går det att se att strålningen enskilt kommer tillföra tillräckligt med energi till bädden för att kalcineringsprocessen ska kunna genomföras i försöksugnen i alla tre fall utifrån de beräkningar som genomförts och de antaganden de medför. Det går även att se att det fall som tillför mest effekt till bädden är referensfallet och det som tillför minst är plasmafallet. Däremot är det elektrisk motståndsvärmning som är mest energieffektiv då detta är det alternativ som procentuellt tillför störst andel av den tillförda effekten till systemet som nettoeffekt till bädden. Att nettoflödet till bädden i plasmafallet är lägst kan förklaras med att plasmat har en lägre emissivitet än både motståndet och referensflamman enligt de antaganden som har gjorts. Plasmat i plasmafallet har även en lägre temperatur än flamman i referensfallet, vilket också är en bidragande faktor till att plasmat kommer tillföra en lägre effekt till bädden än referensflamman.

I figur 16 och 17 visas hur nettostrålningen in i bädden varierar när emissiviteten varierar för plasma- och referensfallet vid en konstant flamtemperatur samt plasmatemperatur. Det som går att utläsa ur graferna är att då temperaturen på strålningskällan hålls konstant och emissiviteten varierar kommer nettostrålningen till bädden att variera. Detta medför att nettoeffekten i både plasma och referensfallet till bädden är bestämd med en viss osäkerhet vilket syns i figur 16 och 17 då en relativt liten variation i emissivitet kan leda till relativt stora förändringar i nettoeffekt till bädden, detta gäller speciellt för låga emissiviteter.

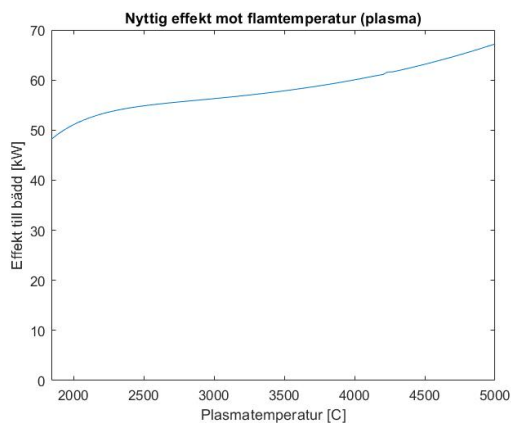


Figur 16: Den tillförda effekten genom strålning till bädden med varierad emissivitet för plasmafallet.

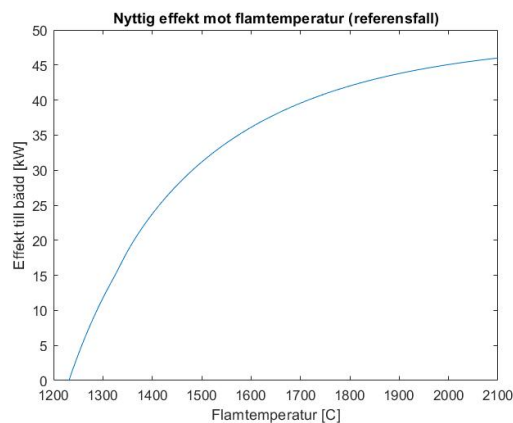


Figur 17: Den tillförda effekten genom strålning till bädden med varierad emissivitet för referensfallet.

Dessutom undersöktes flamtemperaturens påverkan på nettoeffekten som tillförs bädden vid en konstant flamemissivitet, vilket visas i figur 18 och 19. Vi kan se att en högre flamtemperatur inte leder till en markant skillnad i hur mycket nyttig effekt som tillförs bädden i plasmafallet. I referensfallet kan vi däremot se en relativt stor skillnad i den tillförda nyttiga effekten då flamtemperaturen ökar mellan 1200 °C och 1700 °C, men denna förändring i värmeeffekt blir mindre vid högre flamtemperaturer. Då den verkliga flamman och plasmans temperatur inte är känd medför detta att det uppstår ytterligare osäkerheter i beräkningarna för hur mycket nettoeffekt som tillförs bädden.



Figur 18: Den tillförda effekten genom strålning till bädden med varierad plasmatemperatur.



Figur 19: Den tillförda effekten genom strålning till bädden med varierad flamtemperatur.

Det bör också noteras att nettoeffekten till bädden som visas i figur 18 och 19 inte visar hur nettoeffekten skulle variera i ett verkligt fall. Detta eftersom arean på flamman beräknas enligt ekvation 37 där  $q_2$  är  $Q_{\text{bränsle}}$  och  $Q_{\text{el}}$  enligt tabell 5 som beskriver hur mycket energi som behöver tillföras systemet för att uppnå den önskade kalcineringsgraden. Då flamtemperaturen ökar medför detta att svart-kroppsstrålningen ökar vilket gör att arean hos flamman minskar, det är detta som skapar det avtagande beteendet i figur 18 och 19. I ett verkligt fall kommer inte arean för flamman att minska med en högre flamtemperatur vilket skulle medföra att nettoeffekten till bädden istället skulle öka exponentiellt.

#### 4.2.4 Konvektion

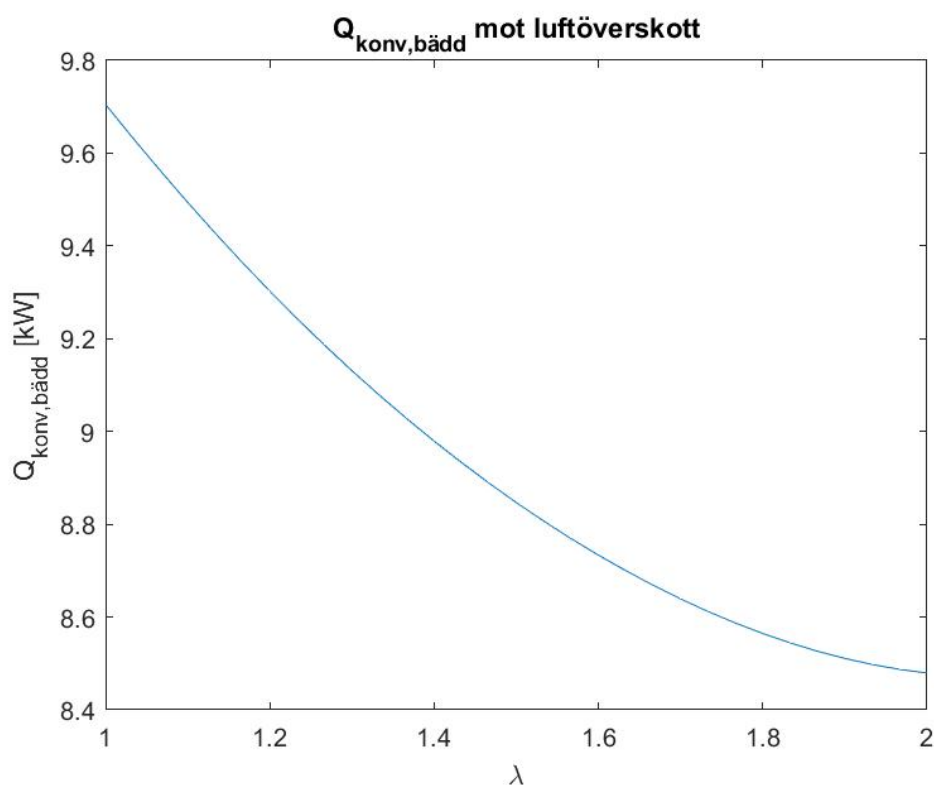
Den beräknade konvektionen till bädd och vägg från gasen presenteras i tabell 8. Resultaten visar att värmeöverföringen via konvektion till bädden är 0,8 kW högre för referensfallet än vid plasmavärmning och 9,5 kW högre till väggen för referensfallet jämfört med plasmafallet. På grund av att det är koldioxidomgivning i plasmafallet så krävs mer energi för att kalcineringsreaktionen ska ske vid samma reaktionshastighet som i referensfallet. Därför är temperaturen ut från ugnen på det fasta materialet något högre med plasma som värmekälla, vilket medför att konvektionen inne i ugnen blir något lägre. Vidare är troligtvis gasens temperatur lägre än den som använts i beräkningarna eftersom

den definieras, som beskrivet i metoddel 3.3.4, som ett medelvärde av värmekällans temperatur och temperaturen ut ur ugnen. Värmekällans temperatur sjunker nämligen på grund av att den strålar, vilket inte har tagits i beaktning vid beräkningar på konvektionen. Ett extremfall med endast konvektion som värmeöverföring har alltså använts medan strålningen försumrats. Därför bör konvektionen vara lägre i verkligheten, både vid användning av propanflamma och plasmabrännare.

Tabell 8: Konvektion till bädd och till vägg i referensfallet respektive i plasmafallet.

Konvektion	Referensfall	Plasmavärmning
Bädd	9,3 kW	8,5 kW
Vägg	56,4 kW	46,9 kW

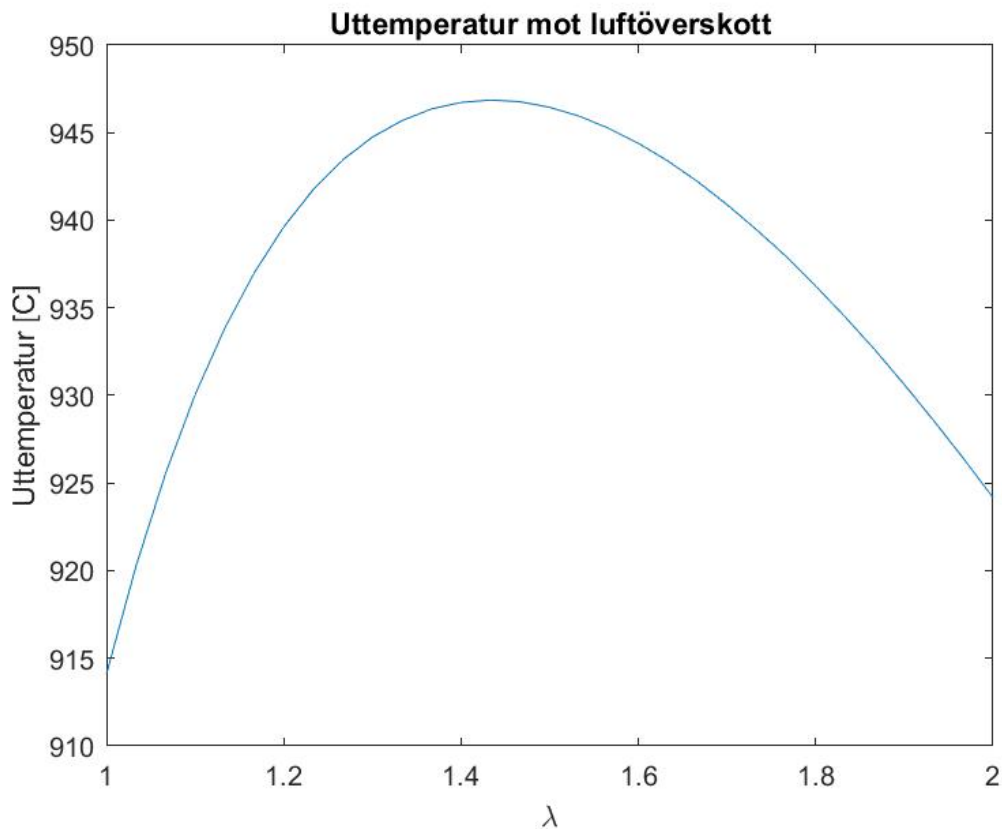
Gasflödet i ugnen kan också varieras genom att ändra luftöverskottet i referensfallet. Detta påverkar den konvektiva värmeöverföringen vilket syns i figur 20. I referensfallet minskar den konvektiva värmeöverföringen och planar ut mot vad som ser ut att vara ett minimum vid strax över  $\lambda = 2$ . Anledningen till detta är att konvektionen är beroende av två saker, en temperaturdifferens och hur turbulent flödet är. Därmed ökar den konvektiva värmeöverföringen med ett ökat massflöde av gas då det ger upphov till mer turbulens. Dock motverkas detta av att ett ökat gasflöde ger en minskad gastemperatur då det är kall luft som används och därmed minskad temperaturdifferensen. Dessa två faktorer motverkar varandra och ger upphov till kurvans minimum då de dominerar vid olika  $\lambda$ .



Figur 20: Den konvektiva värmeöverföringen till bädden med varierat luftöverskott i referensfallet.

I intervallet mellan 1 och 2 för luftöverskottet syns en tydlig nedgång i konvektionen till bädden. Eftersom det är bädden som skall värmas bör denna vara så stor som möjligt vilket i figur 20 innebär att  $\lambda = 1$  för att optimera detta. Dock fungerar det inte i praktiken då förbränningen kräver ett visst luftöverskott för att ske så fullständigt som möjligt. Det som blir tydligt är att med hänsyn till att maximera konvektionen bör ett så lågt luftöverskott som möjligt eftersträvas, åtminstone så länge  $\lambda < 2$ .

När den konvektiva värmeöverföringen i ugnen bestämts kan denna användas i värmebalansen i ekvation (40). Därmed kan energiinnehållet i den utgående gasen bestämmas och på så sätt även uttemperaturen. I figur 21 visas uttemperaturen som en funktion av luftöverskottet  $\lambda$ . Vid  $\lambda \approx 1,45$  nås ett maximum på uttemperaturen vilket beror på samma faktorer som för konvektiva värmeöverföringen i föregående stycke. Dock korresponderar det inte med minimumpunkten i figur 20 eftersom uttemperaturen även påverkas av konvektionen till ugnens vägg.



Figur 21: Gasens uttemperatur med varierat luftöverskott i förbränningen.

En jämförelse av uttemperaturen mellan referensfallet och plasmafallet kan ses i tabell 9 för de förhållanden som antagits i de båda fallen. Som syns är den beräknade uttemperaturen betydligt högre än den som antagits i t.ex. blackboxmodellen baserat på uppmätta data.

Tabell 9: Beräknade uttemperaturer baserade på gasbalansen och konvektion i jämförelse med antagen temperatur.

<b>Itererade uttemperaturer baserad på konvektion</b>		
<b>Antagen</b>	<b>Referensfall (<math>\lambda = 1, 2</math>)</b>	<b>Plasmavärmning</b>
800,0 °C	939,6 °C	926,9 °C

Detta tyder på att extremfallet med endast konvektion inte är representativt för det verkliga systemet då det antagna värdet är baserat på uppmätta data. Även det faktum att den uträknade konvektionen till bädden i tabell 8 inte är tillräcklig för att uppfylla behovet tyder på att ett konvektionsdominerat system inte är troligt.

## 5 Slutsatser

Utifrån de beräkningar som genomförts och de antaganden som gjorts i detta projekt är båda de elektrifierade alternativen som undersökts lämpliga för att kunna genomföra kalcinering i Cementas försöksugn. Däremot är det värt att notera att det finns stora osäkerheter i resultatet då det är flera parametrar som är okända vars påverkan kan ha en stor effekt på resultatet. Därför går det inte att utifrån resultatet avgöra om det är möjligt att genomföra kalcinering i den verkliga försöksugnen. Det som däremot går att se från resultatet är att den typ av värmetransport som är dominant inuti ugnen är strålning.

Från resultatet går det även att se att det alternativ som är mest energieffektivt är elektrisk motståndsvärmning, både enligt blackboxmodellen och strålningsberäkningarna. Dock uppkommer det en del praktiska problem vid implementering av ett elektriskt motstånd som hur det till exempel ska monteras. En annan nackdel med det elektriska motståndet är att det inte kommer upp i lika höga temperaturer som plasman och referensflamman vilket gör att det troligtvis inte går att använda ett elektriskt motstånd vid klinkerbildning. Därför kan det vara fördelaktigt att använda plasmavärmning istället, även om det är mindre energieffektivt, då det är enklare att implementera ur en ren konstruktionssynpunkt samt att plasman har förmågan att uppnå högre temperaturer.

## 6 Förslag till vidare forskning

I denna studie görs många antaganden, särskilt för fallen med plasma och elektriskt motstånd där ingen experimentell data ännu tagits fram. För att på ett bättre och mer representativt sätt modellera dessa system behöver experimentell data tas fram för att öka förståelsen för hur systemet beter sig i praktiken. Det är i nuläget svårt att säga på grund av de många antaganden som görs. Något som då också kan vara intressant att försöka ta reda på är hur fördelningen mellan konvektion och strålning ser ut inne i ugnen.

Noggrannheten i modellen kan även bli bättre genom att öka upplösningen i beräkningarna. I fallet med strålning innebär det att introducera fler zoner för att på ett mer verkligt sätt modellera värmeöverföringen. När det gäller konvektion handlar det istället om att försöka beräkna denna utifrån den temperaturändring som sker längs ugnen och inte endast med hjälp av medelvärden.

Något som också bör undersökas som inte gjorts mer än kvalitativt i denna studie är att introducera ett recirkulerat koldioxidflöde i plasmafallet vilket skulle kunna öka effektiviteten. Viktigt att ta reda på är om det är möjligt och hur det skulle påverka systemet i form av eventuella nackdelar med recirkulation.

## Referenser

- [1] A. Gunnarsson, privat kommunikation, 2022.
- [2] Cementa, "Om oss". [Online]. Tillgänglig: <https://www.cementa.se/sv/om-oss> (hämtad: 2022-05-06).
- [3] T. Burman, J. Engvall, "Evaluation of usage of plasma torches in cement production: A heat transfer modelling study", mastersuppsats, Department of Space, Earth and Environment, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige, 2019.
- [4] C. Hammar, M. Johansson, W. Nilsson, A. Ridderstad, "Elektrifiering av cementproduktionen: En studie om kalcineringsmöjligheterna vid införande av plasmageneratorer för cementproduktion", kandidatuppsats, Institutionen för rymd-, geo- och miljövetenskap, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige, 2020.
- [5] Cementa, "Nollvision för koldioxid". [Online]. Tillgänglig: <https://www.cementa.se/sv/nollvision2030> (hämtad: 2022-03-25).
- [6] AR. Nielsen, "Combustion of large solid fuels in cement rotary kilns", doktorsavhandling, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Danmark, 2012. [Online]. Tillgänglig: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/combustion-of-large-solid-fuels-in-cement-rotary-kilns>
- [7] B. Wilhelmsson, C. Kollberg, J. Larsson, J. Eriksson, M. Eriksson, "Cem-Zero: A feasibility study evaluating ways to reach sustainable cement production via use of electricity". Cementa, Stockholm, Sverige, 2018.
- [8] Cementa, "Så här tillverkas cement", 2021. [Online]. Tillgänglig: <https://www.cementa.se/sv/tillverkning-av-cement> (hämtad: 2022-01-27).
- [9] A. Gunnarsson, K. Andersson, B.R. Adams, C. Fredriksson "Full-scale 3D-modelling of the radiative heat transfer in rotary kilns with a present bed material", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 147, Feb 2020. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118924
- [10] L Tokheim, R Jacob, "ELSE 2 D1a: Electrical resistance heating of calciners – different reactor options", University of South-Eastern Norway, Porsgrunn, Norge, 6000239-D1a, 2021.
- [11] J.Borovsky, N.Hershkowitz "Plasma (physics)" i Access Science. [Online]. Tillgänglig: <https://www.accessscience.com/content/plasma-physics/525900>, Hämtad: 2022-03-11
- [12] F.Angwald, ScanArc Plasma Technologies AB, Privat kommunikation, april. 2020 [Elektronisk bild]

- [13] L. Tokheim, R. Jacob, "ELSE 2 D1b: Electrical resistance heating of calciners – Detailed electricity-to-heat concept", University of South-Eastern Norway, Porsgrunn, Norge, 6000239-D1b, 2021.
- [14] MS. Chen, "Electric Heating", AccessScience, McGraw-Hill Education, Januari 2020. <https://doi.org/10.1036/1097-8542.216300>
- [15] J. Stewart, L. Hoxton, "Joule's Law" AccessScience, McGraw-Hill Education, Januari 2020.
- [16] A. Mathisen, C. Jayarathna, L. Tokheim, L. Øi, N. Eldrup, T. Gautestad, "Combined Calcination and CO<sub>2</sub> Capture in Cement Clinker Production by Use of Electrical Energy," i *The 10th Trondheim Conference on CO<sub>2</sub> Capture, Transport and Storage*, Trondheim, Norge, 2019.
- [17] J.P. Gorog, T.N. Adams, and J.K. Brimacombe. Regenerative Heat Transfer in Rotary Kilns", *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 13, no. 2, pp. 153-163, June 1982.
- [18] J. Welty, G. Rorrer, D. Foster, *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*. 6. uppl., New York, USA: John Wiley & Sons, 2013.
- [19] "Carbon dioxide - Gas phase thermochemistry data" i NIST. [Online]. Tillgänglig: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C124389&Units=SI&Mask=1#Refs>, hämtad: 2022-02
- [20] F. P. Incropera et al., *Incropera's principles of heat and mass transfer*, 8:th ed. Singapore: John Wiley & Sons, 2017.
- [21] Md. Nurun Nabi, "Theoretical investigation of engine thermal efficiency, adiabatic flame temperature, NO<sub>x</sub> emission and combustion-related parameters for different oxygenated fuels", *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, nr. 8-9, ss. 839–844, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2009.12.015
- [22] E.M. Sparrow, R.D. Cess. *RADIATION HEAT TRANSFER*. Belmont: Brooks/Cole Publishing Company, 1966.
- [23] K. Ganesh, K. Sarita, M. Kaustubh, R. Vivek, *Rotary Cement Kiln Simulator (RoCKS): Integrated modeling of pre-heater, calciner, kiln and clinker cooler.*, Indien, Februari 2007. doi:10.1016/j.ces.2007.01.063

# Appendix

## A Siktfactorer

I tabell 10-12 presenteras de beräknade siktfaktorerna för de tre olika fallen.

Tabell 10: Siktfactorer för referensfallet.

	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>6a</b>	<b>6b</b>	<b>7a</b>	<b>7b</b>	<b>8</b>
$F_{i,2}$	0	0,1259	0,0002	0,1913	0,0077	0,1913	0,0077	0
$F_{i,3}$	0,1038	0	0,0106	0,1545	0,0053	0,1545	0,0053	0
$F_{i,4}$	0,0002	0,0112	0	0,0010	0,0641	0,0010	0,0641	0,0167
$F_{i,6a}$	0,0804	0,0788	0,0005	0	0	0,0564	0,0053	0
$F_{i,6b}$	0,0105	0,0088	0,0998	0	0	0,0173	0,0984	0,0997
$F_{i,7a}$	0,7121	0,6978	0,0042	0,4998	0,0474	0,4434	0,0420	0
$F_{i,7b}$	0,0931	0,0775	0,8838	0,1535	0,8717	0,1361	0,7733	0,8836
$F_{i,8}$	0	0	0,0010	0	0,0037	0	0,0037	0

Tabell 11: Siktfactorer för plasmafallet.

	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>6a</b>	<b>6b</b>	<b>7a</b>	<b>7b</b>	<b>8</b>
$F_{i,2}$	0	0,1299	0,0015	0,2215	0,0156	0,2215	0,0156	0
$F_{i,3}$	0,0411	0	0,0068	0,0651	0,0013	0,0651	0,0013	0
$F_{i,4}$	0,0005	0,0073	0	0,0038	0,1215	0,0038	0,1215	0,0623
$F_{i,6a}$	0,0931	0,0865	0,0048	0	0	0,0732	0,0110	0
$F_{i,6b}$	0,0041	0,0010	0,0954	0	0	0,0069	0,0854	0,0951
$F_{i,7a}$	0,8247	0,7661	0,0424	0,6482	0,0976	0,5750	0,0866	0
$F_{i,7b}$	0,0365	0,0093	0,8455	0,0613	0,7570	0,0544	0,6715	0,8426
$F_{i,8}$	0	0	0,0036	0	0,0071	0	0,0071	0

Tabell 12: Siktfactorer för elektrisk motståndsvärmning.

	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
$F_{i,2}$	0	0,1063	0,1063	0,1809	0,1809
$F_{i,3}$	0,0267	0	0,0074	0,0426	0,0426
$F_{i,4}$	0,0267	0,0074	0	0,0426	0,0426
$F_{i,6}$	0,0960	0,0899	0,0899	0	0,0829
$F_{i,7}$	0,8506	0,7964	0,7964	0,7340	0,6512

## B Entalpidata från FactSage för plasma

I tabell 13 finns entalpidata för koldioxidplasma.

Tabell 13: Entalpidata för plasma.

T(°C)	MJ/kg CO2	T(°C)	MJ/kg CO2	T(°C)	MJ/kg CO2	T(°C)	MJ/kg CO2
0	-0,020783552	1550	1,868996945	3050	9,280059545	4550	17,72071036
50	0,021412154	1600	1,949405073	3100	9,720015545	4600	17,81649409
100	0,066031471	1650	2,033688436	3150	10,16257091	4650	17,90897073
150	0,112869041	1700	2,122641164	3200	10,60613755	4700	17,99868273
200	0,161712753	1750	2,217134209	3250	11,04896291	4750	18,08611527
250	0,212364745	1800	2,318120755	3300	11,48909973	4800	18,171711
300	0,26464707	1850	2,426632445	3350	11,92438555	4850	18,25587818
350	0,318402033	1900	2,543768264	3400	12,35246809	4900	18,33900218
400	0,37349046	1950	2,670680209	3450	12,77086009	4950	18,42145527
450	0,429789526	2000	2,808554809	3500	13,17703009	5000	18,50360727
500	0,48719061	2050	2,958590536	3550	13,56852109	5050	18,585837
550	0,545597321	2100	3,121971873	3600	13,943088	5100	18,66853636
600	0,604923799	2150	3,299838873	3650	14,29882364	5150	18,75212755
650	0,665093324	2200	3,4932546	3700	14,63426836	5200	18,83707118
700	0,726037159	2250	3,703169209	3750	14,94848209	5250	18,92387373
750	0,787693721	2300	3,930383782	3800	15,24106882	5300	19,01310382
800	0,850008191	2350	4,175514245	3850	15,51215864	5350	19,10539964
850	0,912932345	2400	4,438958973	3900	15,76235127	5400	19,20148364
900	0,976425545	2450	4,720871209	3950	15,99263509	5450	19,30217318
950	1,0404558	2500	5,021140582	4000	16,20427827	5500	19,40839282
1000	1,105002164	2550	5,339385818	4050	16,39874536	5550	19,52118655
1050	1,170058173	2600	5,674960555	4100	16,57759745	5600	19,64173009
1100	1,235635855	2650	6,026973709	4150	16,74241773	5650	19,77133745
1150	1,301771782	2700	6,394323682	4200	16,89475336	5700	19,91147155
1200	1,368533045	2750	6,775743355	4250	17,03607382	5750	20,06374255
1250	1,436024536	2800	7,169851309	4300	17,16774382	5800	20,22988582
1300	1,504397209	2850	7,575203618	4350	17,29100945	5850	20,41180936
1350	1,5738561	2900	7,990338355	4400	17,40699327	5900	20,61156764
1400	1,644668427	2950	8,413806273	4450	17,51669755	5950	20,83132964
1450	1,717171936	3000	8,844182182	4500	17,62100836	6000	21,07335845
1500	1,791781773						