

Brandrisker vid lägre syrehalter

Experiment i konkalorimetern

Erik Linnå och Viktor Wahlström

**Department of Fire Safety Engineering
Lund University, Sweden**

**Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet**

Report 5470, Lund 2014

Brandrisker vid lägre syrehalter

Experiment i konkalorimetern

**Erik Linnå
Viktor Wahlström**

Lund 2014

Titel: Brandrisker vid lägre syrehalter – Experiment i konkalorimetern
Title: Fire risks at low oxygen levels – Experiments in the cone calorimeter

Författare/Authors: Erik Linnå & Viktor Wahlström

Report 5470
ISSN: 1402 - 3504
ISRN: LUTVDG/TVBB - 5470 - SE

Number of pages: 61

Bilder: Där inget annat anges är bilderna i rapporten författarnas.

Illustrations: Unless otherwise stated, the images in the report belong to the authors.

Keywords

CACC, carbon dioxide, carbon monoxide, cone calorimeter, controlled atmosphere, fire risk, heat release, HRR, hypoxic air, mass loss rate, oxygen, particle board, time to ignition

Sökord

brandrisk, CACC, effekt, effektutveckling, hypoxic air, koldioxid, kolmonoxid, konkalorimeter, LTH, massavbrinningshastighet, spånskiva, syrehalt, tid till antändning

Abstract

This report has been conducted to examine the advantages and disadvantages of using an open system for experiments in the cone calorimeter with a vitiated air enclosure at low oxygen levels.

Eight different experimental set-ups were conducted in which two were designed according to ISO 5660, i.e. the cone calorimeter in its standard configuration. In the other experimental set-ups, a chamber which enclosed the specimen was placed under the exhaust hood. Using this chamber, experiments were performed with a reduced oxygen content, approximately 15 % by volume, which was obtained by adding a desired mixture of nitrogen and air. In some experimental set-ups, a chimney with a length of 30 cm was placed on top of the chamber. In all experimental set-ups, particle board was used as the test material and the irradiance levels were 25 or 50 kW/m².

© Copyright: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2014.

Författarna svarar för innehållet i rapporten.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

brand@brand.lth.se
<http://www.brand.lth.se>

Telefon: 046 - 222 73 60

Department of Fire Safety Engineering
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden

brand@brand.lth.se
<http://www.brand.lth.se>

Telephone: +46 46 222 73 60

Tillkännagivanden

Vi skulle speciellt vilja tacka följande personer och organisationer som hjälpt oss under arbetets gång.

- | | |
|--|--|
| Patrick van Hees | Professor vid avdelningen för Brandteknik vid Lunds tekniska högskola för ditt ”brinnande” engagemang i detta examensarbete och en bra handledning. |
| Stefan Svensson | Universitetslektor vid avdelningen för Brandteknik vid Lunds tekniska högskola för beundransvärda insatser för att få all utrustning i brandlaboratoriet att fungera och hjälp däröver med experimenten. |
| John Barton | Doktorand vid avdelningen för Brandteknik vid Lunds tekniska högskola för all tid och hjälp vid experimenten. |
| Frida Vermina
Lundström | Doktorand vid avdelningen för Brandteknik vid Lunds tekniska högskola för hjälp vid litteratursökningen. |
| SP - Sveriges Tekniska
Forskningsinstitut | För tillhandahållande av experimentutrustning. |

Sammanfattning

Denna rapport har genomförts för att undersöka vilka för- och nackdelar som finns vid experiment i konkalorimetern vid låga syrehalter med hjälp av ett öppet system.

Arbetet började med att ta fram följande frågeställningar:

- Vilka felkällor och problem finns vid experiment med bränder vid reducerad syrehalt i konkalorimetern?
- Hur beter sig spånskiva vid brand i syrefattig miljö i förhållande till normal atmosfär?
- Vilka åtgärder finns för att få så tillförlitliga resultat som möjligt vid experiment i ett öppet system?

För att kunna besvara frågeställningarna gjordes först en omfattande litteraturstudie som följdes av förberedande och genomförande av experimenten i konkalorimetern. Experimenten genomfördes i brandlaboratoriet vid Lunds tekniska högskola som i skrivande stund ligger i Fysicum.

Åtta olika försöksuppställningar genomfördes där två försöksuppställningar är utformade enligt ISO 5660, det vill säga konkalorimetern i sitt standardutförande. I övriga försöksuppställningar gjordes försök med en kammare som placerades under rökgashuven och som omslöt provmaterialet. Med hjälp av denna kammare genomfördes försök med en nedsatt syrehalt, cirka 15 %, som erhöles genom att tillföra en önskad blandning av kväve och luft. I vissa försöksuppställningar placerades även en skorsten med längden 30 cm ovanpå kammaren. I samtliga försöksuppställningar användes spånskiva som provmaterial och strålningsnivån 25 eller 50 kW/m².

Arbetet resulterade i följande slutsatser.

- För att kunna jämföra tid till antändning mellan försök med kammare och försök i konkalorimetern enligt standard behövs en effektivare strålningsskärm, då extra väntetid krävs för att stabilisera syrehalten i kammaren.
- Vid försök på spånskiva i det aktuella öppna systemet bör inte flödet in i kammaren understiga 2,0 l/s.
- Vid en strålningsnivå på 25 kW/m² kan en lägre effektutveckling konstateras då syrehalten reduceras, jämfört med försöken vid normal atmosfär. Vid en strålningsnivå på 50 kW/m² kan samma sak inte bevisas av försöken.
- Massavbrinningshastigheten följer effektutvecklingen väl.
- En lägre syrehalt resulterar i en högre kolmonoxidproduktion och en lägre koldioxidproduktion.
- Lägre syrehalt ger längre tid till antändning.
- Vid de aktuella försöken verkar inte användandet av en skorsten påverka resultatet i någon större utsträckning.
- Att tillåta inblandning av omgivande luft innan analys sker leder till osäkerheter. Dessa kan kompenseras med hjälp av modifierade ekvationer men en viss osäkerhet kvarstår.

Summary

This report has been conducted to examine the advantages and disadvantages of using an open system for experiments in the cone calorimeter with a vitiated air enclosure at low oxygen levels.

The work started with formulating the following questions:

- What sources of error and problems can be found in experiments with fires at reduced oxygen content in the cone calorimeter?
- How does the particle board respond to fire in reduced oxygen environments in comparison to a normal atmospheric oxygen level?
- What measures are there in order to get the most reliable results as possible in experiments in an open system?

In order to answer these questions, an extensive literature study was made followed by preparation and execution of experiments in the cone calorimeter. The experiments were conducted in the fire laboratory at Lund University, which at the moment is located in Fysicum.

Eight different experimental set-ups were conducted in which two were designed according to ISO 5660, i.e. the cone calorimeter in its standard configuration. In the other experimental set-ups, a chamber which enclosed the specimen was placed under the exhaust hood. Using this chamber, experiments were performed with a reduced oxygen content, approximately 15 % by volume, which was obtained by adding a desired mixture of nitrogen and air. In some experimental set-ups, a chimney with a length of 30 cm was placed on top of the chamber. In all experimental set-ups, particle board was used as the test material and the irradiance levels were 25 or 50 kW/m².

This work resulted in the following conclusions.

- To be able to compare time to ignition between experiments in a chamber with experiments in the cone calorimeter in its standard configuration a more efficient radiation shield is required. This is because of the extra time needed for the oxygen content to stabilize in the chamber.
- In experiments on particle board in the current open system, the flow into the chamber should not be below 2.0 l/s.
- At an irradiance level of 25 kW/m², a lower heat release rate was observed when the oxygen content was reduced. At a radiation level of 50 kW/m², the same phenomena cannot be proved by the experiments.
- The mass loss rate follows the heat release rate well.
- A lower oxygen content results in a higher production rate of carbon monoxide and a lower production rate of carbon dioxide.
- Lower oxygen content result in longer time to ignition.
- In the current experiments it seems like the use of a chimney does not affect the results in any significant way.
- Allowing the mixing of ambient air with the exhaust gases before the exhaust gas concentrations are measured results in uncertainties. This can be compensated by using modified equations, but some uncertainty remains.

Nomenklatur

C	Flödesöppningscoefficient $C = 0,043531 [m^{1/2}kg^{1/2}K^{1/2}]$
CACC	Controlled Atmosphere Cone Calorimeter
E	Genomsnittlig energi per massa förbrukat syre. $E = 13,1 [kJ/g_{O_2}]$
\dot{m}_e	Massflöde i rökgaskanalen under försöket. [kg/s]
\dot{m}_e^0	Massflöde i rökgaskanalen före försöket. [kg/s]
\dot{m}_g^B	Massflöde in i förbränningskammaren. [kg/s]
Δp	Tryckskillnad över flödesöppningen. [Pa]
\dot{q}	Effekt [kW]
T_e	Förbränningsgasernas temperatur vid flödesöppningen. [K]
$X_{O_2}^A^0$	Initial molfraktion syre i rökgaskanalen efter att flödet till förbränningskammaren har öppnats men innan försöket har startat. [-]
$X_{O_2}^A^S$	Molfraktion syre i omgivande luft. [-]
X_{CO}^A	Molfraktion kolmonoxid i förbränningsgaserna. [-]
$X_{O_2}^A$	Molfraktion syre i förbränningsgaserna. [-]
$X_{H_2O}^S$	Molfraktion vattenånga i omgivande luft. [-]
$X_{CO_2}^A$	Molfraktion koldioxid i förbränningsgaserna. [-]
$X_{CO_2}^A^S$	Molfraktion koldioxid i omgivande luft. [-]

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte.....	1
1.3	Mål	1
1.4	Frågeställning	1
1.5	Metod.....	2
1.6	Teori.....	2
2	Litteraturstudie	7
2.1	Slutet system med kammare	7
2.2	Öppet system med kammare	7
2.3	Tidigare experiment.....	10
2.4	Sammanfattning av litteraturstudie	13
3	Genomförande	15
3.1	Försök vid strålningsnivå 50 kW/m ²	15
3.2	Försök vid strålningsnivå 25 kW/m ²	16
3.3	Försök vid olika låga flöden	16
3.4	Avgränsningar.....	16
4	Resultat	17
4.1	Effektutveckling.....	17
4.2	Massförlust och massavbrinningshastighet.....	18
4.3	Produktion av kolmonoxid	21
4.4	Produktion av koldioxid.....	22
4.5	Tid till antändning.....	23
4.6	Försök vid olika låga flöden	24
5	Analys och diskussion	25
5.1	Effektutveckling.....	25
5.2	Massförlust och massavbrinningshastighet.....	26
5.3	Produktion av kolmonoxid	27
5.4	Produktion av koldioxid.....	27
5.5	Tid till antändning.....	28
5.6	Försök vid olika låga flöden	28
5.7	Felkällor och osäkerheter	28
6	Slutsatser	31
7	Förslag till fortsatt arbete	33
8	Referenser	35
	Bilaga 1. Tillvägagångssätt	37
	Bilaga 2. Resultat	41

1 Inledning

Denna rapport är ett examensarbete vid Lunds tekniska högskola (LTH) med kurskod VBRM01 och omfattar 22,5 högskolepoäng. Det skrivs som avslutande moment inom brandingenjörsprogrammet. En stor del av arbetet består av experiment som genomförs vid avdelningen för Brandteknik.

1.1 Bakgrund

Vid lägre syrehalter betar sig bränder annorlunda än vid normal atmosfär. Detta är något som utnyttjas i syfte att öka brandsäkerheten genom att sänka syrehalten i så kallade hypoxic air-system. Beroende på hur mycket syrehalten minskas kan brand förhindras helt eller brandförloppet dämpas. En brand vid en lägre syrehalt kan även uppstå då en rumsbrand blir underventilerad. En brand under dessa förhållanden utvecklas annorlunda och produktionen av gaser samt effektutveckling skiljer sig från en välventilerad brand. Det är därför av intresse att metoder för att studera dessa bränder finns och är lämpliga för ändamålet.

En vanlig metod för att studera materials egenskaper vid brand är konkalorimetern. På senare år har det börjat utföras försök där konkalorimetern modifieras för att möjliggöra provningar i en miljö med reducerad syrehalt. Dessa försök har inte standardiserats utan utformas på olika sätt. Detta innebär att det blir svårt att få tillförlitliga resultat då olika provningsmetoder för med sig olika felkällor och osäkerheter.

De metoder som används kan delas in i två huvudkategorier, ett slutet och ett öppet system. I båda systemen sker förbränning i en kammare där syrehalten kan regleras. Skillnaden är att i ett slutet system sker ingen inblandning av omgivande luft efter att förbränning skett. I ett öppet system sker en sådan inblandning innan gaserna analyseras i konkalorimetern.

1.2 Syfte

Vid experiment med bränder vid lägre syrehalter med hjälp av konkalorimeter finns det olika metoder att använda. Denna rapport syftar till att utreda de olika för- och nackdelar som finns med ett öppet system. Rapporten syftar även till att undersöka skillnader mellan olika försöksuppställningar.

1.3 Mål

Detta examensarbete har till uppgift att analysera brand vid lägre syrehalt i konkalorimetern vid olika försöksuppställningar i ett öppet system.

1.4 Frågeställning

Utifrån bakgrunden tas följande frågeställningar fram för att uppnå målet med rapporten.

- Vilka felkällor och problem finns vid experiment med bränder vid reducerad syrehalt i konkalorimetern?
- Hur betar sig spånskiva vid brand i syrefattig miljö i förhållande till normal atmosfär?

- Vilka åtgärder finns för att få så tillförlitliga resultat som möjligt vid experiment i ett öppet system?

1.5 Metod

Först görs en projektplan, därefter litteraturstudier som är nödvändiga för att kunna förbereda inför experimenten. Experimenten utförs i brandlaboratoriet med hjälp av konkalorimetern. Dessa genomförs dels i konkalorimetern i sitt standardutförande, och dels med en anordning för att sänka syrehalten. Resultaten från de olika experimenten jämförs sedan med varandra.

Under litteraturstudiens gång värderas källor gällande hur relevanta och trovärdiga de är. Litteraturstudien sker genom att söka litteratur i Brandtekniks bibliotek och via sökmotorn Google. Gällande sökningar på Google används bara vetenskapliga artiklar och konferenshandlingar som kommer från trovärdiga och granskade källor.

Genom att använda metodiken experiment kan uppsatta frågeställningar och olika fenomen svaras på respektive förklaras. Detta görs genom att upprepa och variera försöken för att undersöka olika parametrars påverkan på resultaten. Det är viktigt att planera hur experimenten ska genomföras och vilka parametrar som ska mätas innan experimenten startas. Detta då experiment är ett fixt tillvägagångssätt som inte får ändras när det väl har startat (Höst, et al., 2006).

1.6 Teori

Här presenteras teori om konkalorimetern och brandskyddssystem med permanent nedsatt syrehalt, så kallade hypoxic air-system.

1.6.1 Konkalorimeter

Konkalorimetern är ett verktyg som kan mäta materials egenskaper vid brand, se figur 1. Mätningarna innefattar tid till antändning, massavbrinningshastighet, effektutveckling och analys av förbränningsgaserna. Då effektutvecklingen är proportionell mot syrekonsumtionen så kan konkalorimetern beräkna materialets förbränningseffekt (Drysdale, 2011). Thornton (1917) visade att effektutvecklingen är proportionell mot massan syre som förbrukas i en fullständig förbränning för organiska gaser och vätskor. Vidare så visade Huggett (1980) att detta gäller även för organiska fasta ämnen, där han tog fram ett medelvärde på $13,1 \text{ kJ}/g_{O_2}$.

Provet av materialet som ska undersökas placeras i en metallhållare. Metallhållaren är i sin tur placerad på en våg som registrerar vikten av provet under försöket. Om provet är av svällande typ så kan ett galler monteras för att hålla provet på plats (Lindholm, et al., 2009). För att förhindra att det börjar brinna på provmaterialets sidor och att spilla brunnat material så omlindas provets botten och sidor med en 0,04 mm tjock aluminiumfolie (Babrauskas, 1984).

Ovanför provytan finns en gnisttändare. Det är denna som antänder de pyrolysgaser som avges när provet värms upp. Gnisttändaren stängs av och flyttas när hela provets yta brinner. Konkalorimetern har fått sitt namn från den konformade värmaren som sitter ovanför metallhållaren. Värmaren består av 3 meter lång eldfast motståndsvärmetråd förpackad i magnesiumoxid. Det är på värmaren som temperaturen ställs in för att få den önskade värmestrålningen mot det provmaterial

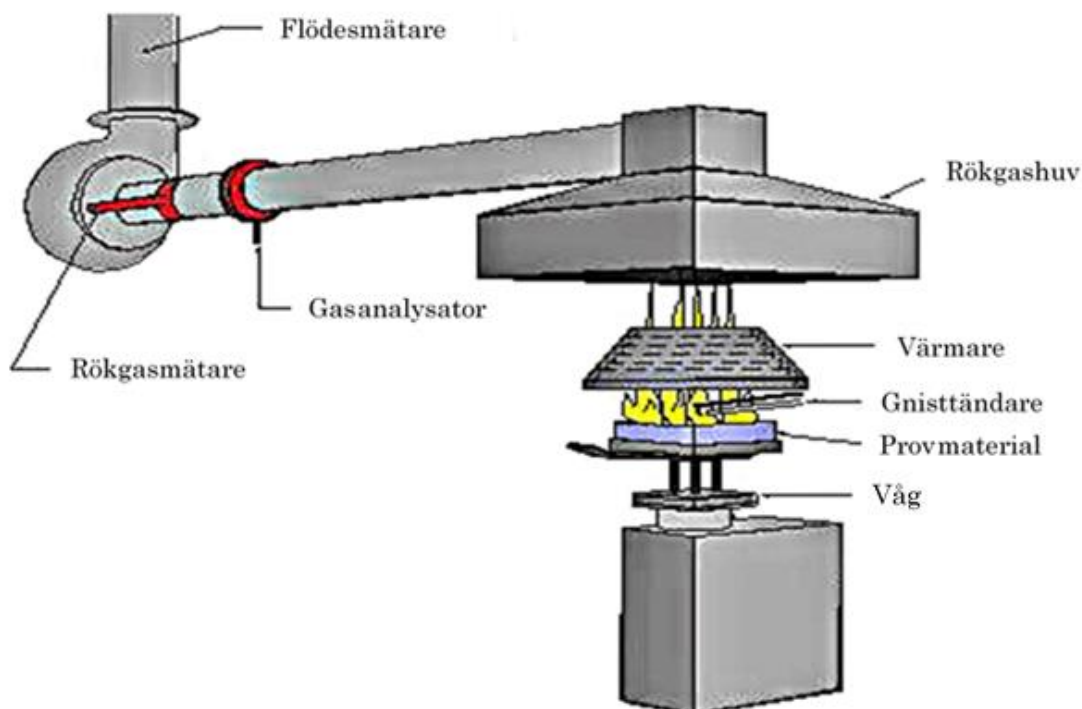
som testas. Under konen finns ett strålningsskydd som förs undan när provet startar (ISO5660-1, 2002).

Rökgashuven ovanför värmaren samlar in förbränningsgaserna från det brinnande provet. En rökgasfläkt i rökgaskanalen bestämmer flödes hastigheten på förbränningsgaserna. Gaserna passerar innan rökgasfläkten en gasanalysator, partiklar filtreras bort och eventuellt vatten avlägsnas innan gaserna analyseras. Mellan fläkten och gasanalysatorn sitter en fotometrisk rökgasmätare. Denna mäter mängden rök som bildas (ISO5660-1, 2002).

En syremätare är det enda som behövs för att utföra experiment i konkalorimetern. Mätningar av kolmonoxid och koldioxid kan också göras för att minska osäkerheten i resultaten.

Antaganden som görs vid experimenten (Janssens, 1991):

- Effektutvecklingen per massa syre som förbränns antas vara konstant efter Huggetts värde på $13,1 \text{ kJ/g}_{\text{O}_2}$.
- Inkommande luft i förbränningen antas bestå av syre, koldioxid, vatten och kväve. Övriga inerta gaser slås samman med kvävet.
- Vattenånga avlägsnas innan gasanalysatorn gör mätningar.



Figur 1. Förenklad översikt av en konkalorimeter. Med tillstånd och anpassad (SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, 2014).

1.6.2 Hypoxic air

Hypoxic air är en teknik som innebär att ett utrymme får en reducerad syrehalt för att försvåra uppkomst av brand eller minska brandspridningen vid en eventuell sådan. Den normala syrehalten brukar vara 15 % i dessa miljöer där syret vanligtvis ersätts med kvävgas. Dessa miljöer brukar användas som alternativ till traditionella släcksystem.

Dock kvarstår risken för att en brand ska uppstå vid en syrehalt på 15 %. En syrefattig miljö innebär även en ökad sot- och rökproduktion som i sin tur kan leda till skador på elektriska komponenter och människor (Nilsson & van Hees, 2013).

Reducerad syrehalt används främst i serverrum, lager och muséer. På senare tid planeras även att tekniken ska introduceras på kärnkraftverk (Nilsson & van Hees, 2013).

Det finns både för- och nackdelar med hypoxic air. Dessa har beskrivits av Nilsson & van Hees (2013) och presenteras här.

Fördelar

- En reducerad syrehalt i ett utrymme leder till att antändningstiden blir längre samt att risken för antändning minskar. Detta är dock beroende av vilket ämne som antänds.
- Effektutvecklingen minskar vid en lägre syrehalt. För vissa ämnen är dessa två faktorer linjära med varandra.
- Flamspridningen reduceras vilket leder till att spridningen mellan föremål reduceras.
- Ett hypoxic air-system är alltid aktiverat och behöver ingen brand för att startas.

Nackdelar

- Då det är starkt materialberoende hur ett ämne uppför sig vid brand i en reducerad syremiljö, så bör varje material provas från fall till fall.
- Risken för antändning och brandspridning mellan material i utrymmet beror på hur det är lagrat och förpackat sinsemellan.
- Skador kan uppstå på känslig utrustning då en reducerad syrehalt leder till en ökad sot- och rökproduktion. Mängden korrosiva gaser ökar också.
- "Back up-system" kan behövas då fakta om detta systems pålitlighet är bristfällig.
- Utrymmets geometri påverkar hur jämn fördelad syrehalten är i utrymmet.

(Nilsson & van Hees, 2013)

Beroende på syrehalten kan människor få olika symptom beroende på hur lång tid de exponeras i miljön. Se tabell 1.

Tabell 1. Symptom och exponeringstider vid olika syrehalter, citerad från (Chiti, 2009).

Syrehalt vid havsnivå [vol%]	Symptom	Maximal exponeringstid
20,9-17	Inga observerade symptom	-
17-15	Nedsatt mörkerseende	-
15-13	Ökad andningsfrekvens och hjärtrytm	-
13-11	Nedsatt fysisk och psykisk förmåga, trötthet och huvudvärk	1 h
11-10	Yrsel och desorienterad	20 min
10-8	Medvetlöshet	2 min
5-0	Krampanfall, apné, hjärtstopp och död	Ingen exponering

2 Litteraturstudie

För att få en utgångspunkt till experimenten genomförs först en litteraturstudie. Litteratursökning görs främst genom att söka på Google och i biblioteket för Brandteknik. Tidigare experiment i konkalorimetern studeras, där material testats genom olika metoder med det gemensamt att de testats i en syrefattig miljö.

Grunden i försök vid låga syrehalter i konkalorimetern är att materialet som ska provas stängs in i en kammare där syrehalten kan bestämmas. Ett sådant system brukar på engelska kallas "Controlled Atmosphere Cone Calorimeter" och förkortas CACC. De olika tillvägagångssätten för försök med låg syrehalt i konkalorimetern kan delas in i två huvudalternativ. Antingen används ett system där provmaterialet hålls i en kontrollerad miljö med lägre syrehalt men där det finns en öppen kontakt med omgivande luft på vägen till rökgaskanalen i konkalorimetern. Eller så används ett helt slutet system där det inte finns någon kontakt med omgivande luft under hela vägen från förbränningen av materialet till mätinstrumenten i rökgaskanalen.

2.1 Slutet system med kammare

En konkalorimeter för att testa material vid lägre syrehalter än normalt har bland annat beskrivits av Babrauskas et al. (1992). Detta är ett slutet system där strålningen mot provmaterialet, flödet i rökgaskanalen och syrehalten i provkammaren kan justeras separat. Strålningen kan precis som i standardutförandet av konkalorimetern varieras mellan 0-110 kW/m². Flödet i rökgaskanalen är normalt 24 l/s men kan ökas till 32 l/s. I en vanlig konkalorimeter är det inte praktiskt möjligt att använda ett flöde lägre än ungefär 12 l/s då detta kan leda till att rök från provet sprider sig utanför rökgasluven. I det slutna systemet däremot finns inte denna begränsning. Syrehalten kan varieras efter behov då den beror av vilken blandning av gaser som leds in till kammaren med provet.

I den vanliga konkalorimetern styrs flödet av rökgaser av fläkten som sitter i rökgaskanalen. I ett slutet system blir förutsättningarna annorlunda då gas tillförs kammaren där provet förbränns. Här är det viktigt att tillförseln av gaser och fläkten i rökgaskanalen fungerar tillsammans så att det inte uppstår oönskade tryckbildningar i systemet, eftersom detta skulle kunna leda till läckage (Babrauskas, et al., 1992).

I standardutförandet av en konkalorimeter är flödet i rökgaskanalen 24 l/s. Om detta flöde skulle bibehållas i det aktuella slutna systemet så skulle kvävet som tillförs kammaren med provet förbrukas i mycket snabb takt. Det är därför att föredra ett lägre flöde. Om flödet däremot sätts till alltför lågt kan detta leda till problem med att rökgaserna inte lämnar provkammaren vilket leder till felaktiga testresultat. Minsta möjliga flöde beror både på temperaturen hos värmaren i konkalorimetern och på effektutvecklingen hos provmaterialet. Det har dock visats att flöden ner till cirka 7 l/s är acceptabla (Babrauskas, et al., 1992).

2.2 Öppet system med kammare

Mikkola (1993) har tagit fram en anordning som möjliggör försök vid låga syrehalter i den vanliga konkalorimetern genom att placera en kammare under konen, en bild över ett sådant system visas i figur 2. Denna kammare omsluter materialet som ska testas och vägen som provet ligger på. Med hjälp av detta utrymme kan en önskad syrehalt

erhållas genom att tillföra en blandning av kväve och luft. I detta system finns det inte någon direkt anslutning mellan kammaren med kontrollerad syrehalt och rökgashuven hos konkalorimetern. Detta kan kallas ett öppet system.

Ett öppet system är på flera sätt enklare då det inte kräver lika stort ingrepp i konkalorimetern. Ett sådant öppet system är därför vanligare vid försök enligt Marquis et al. (2013).



Figur 2. Bild över öppet system med kammare där kammaren är placerad under rökgashuven till konkalorimetern.

Eftersom det inte finns någon internationell standard över hur en sådan utrustning ska utformas kan försöksupställningen skilja sig kraftigt åt mellan försök genomförda vid olika tillfällen. Till exempel skiljer det ofta i avståndet från provkammarens övre del där öppningen finns och konkalorimeterns huv för insamling av gaser. I vissa av de försök som gjorts har en sorts skorsten monterats ovanpå provkammaren. Detta har gjorts för att försöka minska oxideringen av gaserna som kommer ut från provkammaren och i möjligaste mån försöka förhindra att de oförbrända gaserna förbränns när de kommer i kontakt med den syrerika omgivande luften. Dimensionerna som använts på skorstenen har varit olika mellan olika försök eftersom det inte finns någon standard som reglerar detta och höjden har i de flesta försök legat mellan 20 och 60 centimeter. Det har inte undersökts hur mycket de varierande dimensionerna påverkar testresultaten (Marquis, et al., 2013).

Eftersom gaserna från provkammaren blandas upp med luft från omgivningen innan de analyseras i konkalorimetern påverkas mätningarna av kvarvarande syre. Detta gör att effektutvecklingen inte kan beräknas på samma sätt som i standardutförandet av konkalorimetern (Marquis, et al., 2013). Werrel et al. (2014) har modifierat de vanliga ekvationerna för att ta hänsyn till denna utspädning, se ekvation 1-4.

2.2.1 Effektutvecklingsberäkningar för öppet system

Att inte ta hänsyn till inblandningen av luft från omgivningen vid mätning av kvarvarande syre i rökgaserna kan leda till att effektutvecklingen beräknas fel med upp till 30 %. För att lösa detta problem har Werrel et al. (2014) korrigerat ekvationerna för att kompensera för detta. Dessa korrigerade ekvationer utgår från Janssens (1991) ekvationer vilka tar hänsyn till ofullständig förbränning i enlighet med Hess lag (Werrel, et al., 2014).

Vid försök i den vanliga konkalkorimetern mäts syrehalten i luften före förbränning under 60 sekunder innan testet startar. Detta medelvärde används som referensvärde vid beräkning av förbrukad mängd syre och antas vara konstant under hela försöket. När detta förfarande ska användas vid experiment i en CACC med öppen anslutning uppstår däremot problem. Det som kan ses som det ingående referensvärdet är en blandning av syrefattig luft som förs in i förbränningskammaren och normal rumsluft som blandas in efter kammaren. Fläkten i rökgaskanalen håller ett konstant volymflöde, och på grund av förändringar i densiteten under försökets gång så kommer massflödet därmed variera. Inflödet till förbränningskammaren håller även det samma volymflöde, men eftersom detta regleras innan förbränningen så påverkas densiteten inte av denna och därmed blir även massflödet in i kammaren konstant. Resultatet blir att förhållandet mellan förbränningsgaser och inblandad luft från omgivningen skiljer sig åt under försökets gång. De modifierade ekvationerna är ett försök att lösa detta problem (Werrel, et al., 2014).

För att ta fram ekvationerna gjordes experiment på polymetylmetakrylat (PMMA) och spånskiva med olika strålningsnivåer och syrehalter. För att kontrollera rimligheten i de modifierade ekvationerna beräknades förbränningsvärme, dels med konventionella ekvationer och dels med de modifierade ekvationerna, för test på spånskiva med strålning 50 kW/m² vid olika syrehalter. De konventionellt beräknade värdena visar på en ökad förbränningsvärme vid minskad syrehalt, vilket inte är rimligt. De modifierade ekvationerna gav däremot relativt konstanta värden vilket är vad som förväntas. En liten tendens till ökade värden kan dock urskiljas även med de modifierade ekvationerna. Detta kan eventuellt förklaras av reaktioner då rökgaserna blandas med omgivande luft efter kammaren. Författarna drar slutsatsen att de framtagna ekvationerna på ett bättre sätt representerar verkligheten vid försök med låga syrehalter (Werrel, et al., 2014).

De ekvationer som tagits fram för beräkning av effekt i en CACC med öppen anslutning är följande (Werrel, et al., 2014).

$$\dot{q} = E \cdot 1,10 \cdot \left(X_{O_2}^{A_0} \gamma - X_{O_2}^{A_S} (\gamma - 1) \right) \cdot C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \left[\frac{\phi - 0,172(1 - \phi) X_{CO}^A / X_{O_2}^A}{(1 - \phi) + \phi \left(1 + 0,5 \left(X_{O_2}^{A_0} \gamma - X_{O_2}^{A_S} (\gamma - 1) \right) \right)} \right] (1 - X_{H_2O}^S \tilde{\nu})$$

Ekvation 1.

$$\phi = \frac{\left[\left(X_{O_2}^{A_0} \gamma - X_{O_2}^{A_S} (\gamma - 1) \right) (1 - X_{CO_2}^A - X_{CO}^A) \right] - \left[X_{O_2}^A (1 - X_{CO_2}^S \tilde{\nu}) \right]}{(1 - X_{O_2}^A - X_{CO_2}^A - X_{CO}^A) \left(X_{O_2}^{A_0} \gamma - X_{O_2}^{A_S} (\gamma - 1) \right)}$$

Ekvation 2.

$$\gamma = \frac{\dot{m}_e^0}{\dot{m}_e} \quad \text{Ekvation 3.}$$

$$\tilde{\gamma} = 1 - \frac{\dot{m}_g^B}{\dot{m}_e} \quad \text{Ekvation 4.}$$

Där:

\dot{q} – Effekt [kW]

E – Genomsnittlig energi per massa förbrukat syre. $E = 13,1$ [kJ/g_{O₂}]

$X_{O_2}^{A^0}$ – Initial molfraktion syre i rökgaskanalen efter att flödet till förbränningskammaren har öppnats men innan försöket har startat. [-]

$X_{O_2}^{A^S}$ – Molfraktion syre i omgivande luft. [-]

C – Flödesöppningscoefficient $C = 0,043531$ [$m^{1/2}kg^{1/2}K^{1/2}$]

Δp – Tryckskillnad över flödesöppningen. [Pa]

T_e – Förbränningsgasernas temperatur vid flödesöppningen. [K]

X_{CO}^A – Molfraktion kolmonoxid i förbränningsgaserna. [-]

$X_{O_2}^A$ – Molfraktion syre i förbränningsgaserna. [-]

$X_{H_2O}^S$ – Molfraktion vattenånga i omgivande luft. [-]

$X_{CO_2}^A$ – Molfraktion koldioxid i förbränningsgaserna. [-]

$X_{CO_2}^{A^S}$ – Molfraktion koldioxid i omgivande luft. [-]

\dot{m}_e^0 – Massflöde i rökgaskanalen före försöket. [kg/s]

\dot{m}_e – Massflöde i rökgaskanalen under försöket. [kg/s]

\dot{m}_g^B – Massflöde in i förbränningskammaren. [kg/s]

2.3 Tidigare experiment

Här följer en sammanställning av tidigare experiment som gjorts med öppet och slutet system.

2.3.1 Mulholland, Twilley, Babrauskas, Janssens & Yusa 1991

Mulholland et al. (1991) gjorde försök i det slutna system som beskrivits tidigare i kapitel 2.1. Flödet in i provkammaren sattes till cirka 7,5 l/s. Det gjordes försök på flera olika material, bland annat PMMA och Douglasgran. Proven utfördes med strålningar mellan 15-50 kW/m² och vid syrehalter mellan 21 % och ner till den punkt där förbränning inte längre kunde ske.

Gällande resultaten så kunde konstateras att både effektutvecklingen och massavbrinningshastigheten minskade vid minskad syrekoncentration för samtliga testade material. Produktionen av kolmonoxid ökade med minst en faktor 2 då syrekoncentrationen minskade från 21-14 %. Däremot kunde ingen större skillnad i

produktionen av sot påvisas vid samma förändring av syrehalten (Mulholland, et al., 1991).

2.3.2 Luo, He, Dowling, Bowditch & Leonard 1998

Luo et al. (1998) gjorde försök i en modifierad konkalorimeter där syrehalten kunde kontrolleras. Ombyggnationen var ett slutet system och materialet som testades var tre olika typer av polyuretanskum. Försöken utfördes med syrekoncentrationer på 10, 15 och 21 % och strålningsnivåer på 10, 15 och 20 kW/m². Det mättes tid till antändning, effektutveckling, massavbrinningshastighet, kolmonoxidkoncentration, koldioxidkoncentration, optisk täthet och temperatur i rökgaskanalen (Luo, et al., 1998).

I försöken kunde ingen skillnad i antändningstid påvisas då syrehalten låg på 15 respektive 21 %. När syrehalten låg på 10 % antände inte materialen alls. Författarna drar slutsatsen att någonstans mellan 10 och 15 % bör antändningstiden vara känslig för syrekoncentrationen. Vidare dras slutsatsen att strålningsnivån har stor påverkan på brandförloppet vid syrehalten 15 %. Vid försök med 21 % syrehalt kunde däremot påverkan endast påvisas i några av försöken. Ur resultaten går även se att för det testade materialet minskar effektutvecklingen och massavbrinningshastigheten då syrekoncentrationen minskas från 21 % till 15 % (Luo, et al., 1998).

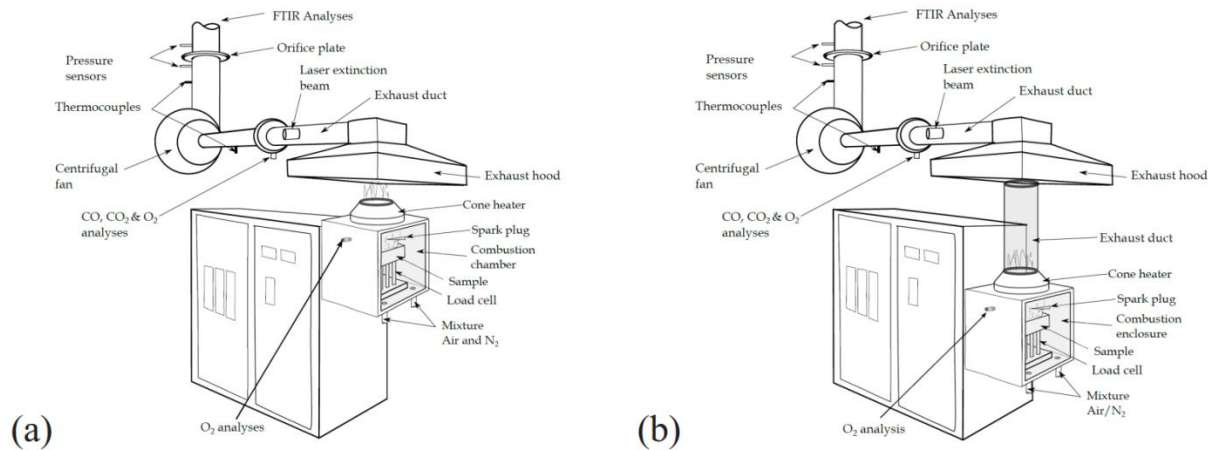
2.3.3 Werrel, Deubel, Krüger, Hofmann & Krause 2013

Werrel et al. (2014) har utfört försök med ett öppet system framtaget av Mikkola (1993) tidigare beskrivet i kapitel 2.2. Materialen som provades var PMMA och spånskiva. Försök utfördes med strålningsnivåer på 15, 25, 50 och 75 kW/m². En skorsten med diametern 8 cm och höjden 18 cm användes för att minimera oxidering vid inblandningen av luft från omgivningen. Syrehalterna som testades var 15, 17, 18, 19 och 21 %. Flödet i rökgaskanalen varierade mellan 12, 15, 18 och 24 l/s. Flödet in i kammaren var runt 3 l/s (Werrel, et al., 2014).

Försöken användes för att ta fram modifierade ekvationer för beräkning av effektutveckling vid låga syrehalter, se ekvation 1-4. Resultaten av försöken visar att de konventionella ekvationerna riskerar att överskatta effektutvecklingen med upp till 30 % vid försök med det aktuella öppna systemet. De modifierade ekvationerna tar hänsyn till det förändrade förhållandet i inblandning av omgivande luft under försökets gång och på så vis kan en överskattning av effekten undvikas (Werrel, et al., 2014).

2.3.4 Marquis, Guillaume & Lesenechal 2013

Marquis et al. (2013) har utfört försök med ett öppet system, se kapitel 2.2. Det gjordes dels försök med en vanlig konkalorimeter och dels med en provkammare där syrehalten kunde regleras. Provkammaren testades med två olika typer av skorstenar, men även helt utan skorsten. Skorstenarna var båda 60 cm höga men av olika material, kvarts och metall. Det gjordes alltså försök med fyra olika konfigurationer: standard konkalorimeter, konkalorimeter med provkammare men utan skorsten (figur 3a), konkalorimeter med provkammare och kvartsskorsten, och konkalorimeter med provkammare och metallskorsten (figur 3b). Materialet som testades var PMMA. Under testen var flödet i rökgaskanalen hos konkalorimetern 24±2 l/s. Det tillförda flödet in i provkammaren var 2,667±0,083 l/s (Marquis, et al., 2013).



Figur 3. Illustration över försök med och utan skorsten. Med tillstånd (Marquis, et al., 2013).

Först genomfördes försök med de fyra olika konfigurationerna utan att sänka syrehalten i provkammaren. Skillnader i resultaten mellan försöken antas bero på strålningspåverkan från provkammaren och påverkan från skorstenen på oxideringen av rökgaserna, det vill säga reaktionerna då rökgaserna blandas med luft från omgivningen. De skillnader som uppstår mellan försöken är dock så små att ingen signifikant skillnad kan påvisas (Marquis, et al., 2013).

Sedan gjordes försök där syrekoncentrationen minskades i de tre försöksuppställningarna med provkammare. Försöken gjordes med en strålning på 50 kW/m² och vid syrekoncentrationer på 10, 12,5, 15 och 21 vol%. Effektutveckling och massavbrinningshastighet mättes. Slutsatsen som drogs var att av de tre försöksuppställningar som testades så kunde ingen skillnad i massavbrinningshastighet påvisas. Däremot var skillnaden större när effektutvecklingen mättes. De två försöken med skorstenar gav liknande resultat, men försöket utan skorsten skiljde sig från de två andra. När det gällde försöken med syrehalt på 21, 15 och 12,5 vol% mättes en högre effektutveckling vid försöket utan skorsten. Detta förklaras med att de oförbrända gaserna kommer i kontakt med omgivande syrerik luft direkt då de lämnar provkammaren och därmed oxideras mer innan de samlas upp av konkalorimetern. I försöket med 10 vol% syrehalt uppmättes däremot en signifikant högre effekt i experimenten med skorsten. Detta är ett oväntat resultat som av artikelförfattarna beskrivs som icke intuitivt. En möjlig förklaring till detta som författarna ger är att gasblandningen ligger så pass nära den undre brännbarhetsgränsen att den i försöket utan skorsten späds ut så mycket när den kommer ut ur provkammaren att gasblandningen hamnar under den nedre brännbarhetsgränsen. I försöken med skorsten blir det däremot inte en lika stor utspädning. Slutsatsen författarna drar av detta är att försöksuppställningen utan skorsten är olämplig för att studera fenomen i gasfasen vid syrekoncentrationer lägre än normalt, dock kan den vara användbar vid mätningar av massavbrinningshastighet (Marquis, et al., 2013).

När det gäller försöken med skorsten kan det konstateras att höjden på denna har betydelse. Den måste vara tillräckligt hög för att effektivt kunna begränsa oxideringen av gaserna. Ju lägre skorstenen är desto mer närmar sig försöksuppställningen ett experiment utan skorsten. I dessa experiment har det inte gjorts försök med olika dimensioner på skorstenen (Marquis, et al., 2013).

2.4 Sammanfattning av litteraturstudie

Det finns två huvudalternativ för hur experiment kan genomföras vid en reglerad syrehalt. Slutet system med kammare innebär att utrymmet mellan kammaren och rökgashuven är förslutet, det vill säga ingen omgivande luft blandas med förbränningsgaserna under försöken. I ett öppet system tillåts en sådan inblandning. Den omgivande luften påverkar i ett öppet system resultatet på så sätt att effekten överskattas med upp till 30 % vid försök med låga syrehalter. För att komma ifrån denna överskattning har modifierade ekvationer tagits fram för beräkning av effektutvecklingen.

Gällande tidigare experiment i slutna system visar det sig att en lägre syrehalt leder till en minskning av effektutvecklingen och massavbrinningshastigheten. En ökning med minst en faktor 2 av kolmonoxidproduktionen kunde observeras vid en minskning av syrehalten från 21 till 14 %. Vid denna sänkning kunde dock ingen förändring i sotproduktionen konstateras. Skillnader mellan antändningstider vid 21 och 15 % kunde inte urskiljas medan ingen antändning uppstod vid 10 %.

Försök har genomförts med öppet system med kammare som inte har kunnat påvisa någon markant skillnad mellan försöken med kammare när denna provats vid en syrehalt på 21 % och konkalorimetern i sitt standardutförande. När skorsten användes på kammaren vid försök med låga syrehalter kunde ingen skillnad i massavbrinningshastighet påvisas mot då ingen skorsten användes. Effekten har däremot visats skilja sig mellan försök med och utan skorsten. Försök utan skorsten verkar resultera i något högre effekt vilket förklaras med en större oxidering av förbränningsgaserna vid kontakten med den omgivande luften.

3 Genomförande

Här beskrivs genomförandet av experimenten och de olika försöksuppställningarna kortfattat. För en mer detaljerad beskrivning av tillvägagångssättet, se bilaga 1.

Materialet som används i samtliga försök är spånskiva. Provmaterialets storlek är 100x100x10 mm. Strålningen från konen sätts till nivåerna 25 och 50 kW/m². Samtliga försök utförs tre gånger för att minimera felkällor.

Vid försöksuppställningarna med kammare används ett flöde in i kammaren mellan 2,1-2,2 l/s. Försöksuppställningarna 2, 3, 4, 5, 7 och 8 är de där en kammare används och utförs med en väntetid på 75 sekunder från det att provet lagts på plats till det att försöket startas. Detta görs för att syrehalten ska hinna stabilisera sig i de försök som utförs med en låg syrekonzentration. Som en följd av detta är tiden till antändning för försöksuppställning 1 och 6 inte jämförbar med de andra då provet i försöksuppställning 1 och 6 inte utsätts för lika mycket strålning innan försöket startas. Vid försöken med kammare tillåts denna svalna av något mellan försöken.

3.1 Försök vid strålningsnivå 50 kW/m²

Här presenteras försöksuppställningarna som genomförs vid strålningsnivå 50 kW/m².

Försöksuppställning 1

I försöksuppställning 1 används den konkolorimeter som följer standard ISO 5660, det vill säga den vanliga konkolorimetern.

Försöksuppställning 2

I försöksuppställning 2 används en kammare som placeras under rökgashuven till konkolorimetern. I denna kan sedan syrehalten regleras genom att tillföra en kontrollerad blandning av luft och kväve. En våg för mätning av provmaterialets massa placeras inne i kammaren. Försök utförs vid normal atmosfär med en syrehalt på 20,95 %.

Försöksuppställning 3

Försöksuppställning 3 är samma som försöksuppställning 2 men med en syrehalt på cirka 15 %.

Försöksuppställning 4

Denna försöksuppställning utförs på samma sätt som försöksuppställning 2 men med skillnaden att en skorsten med höjden 30 cm placeras ovanpå kammaren. Detta görs för att rökgaserna ska hinna kylas av innan de blandas med den omgivande luften och på så sätt minska oxideringen av gaserna.

Försöksuppställning 5

Försöksuppställning 5 är samma som försöksuppställning 4 men med en syrehalt på cirka 15 %.

3.2 Försök vid strålningsnivå 25 kW/m²

Här presenteras försöksuppställningarna som genomförs vid strålningsnivå 25 kW/m².

Försöksuppställning 6

I försöksuppställning 6 används den konkalorimeter som följer standard ISO 5660, det vill säga den vanliga konkalorimetern.

Försöksuppställning 7

Denna försöksuppställning utförs på samma sätt som försöksuppställning 6 men med skillnaden att en kammare för att reglera syrehalten används och en skorsten med höjden 30 cm placeras ovanpå kammaren. Försök utförs vid normal atmosfär med en syrehalt på 20,95 %. Denna försöksuppställning utfördes endast en gång då gnisttändaren slutade fungera och omöjliggjorde vidare försök.

Försöksuppställning 8

Försöksuppställning 8 är samma som försöksuppställning 7 men med en syrehalt på cirka 15 %. Denna försöksuppställning utfördes endast en gång då gnisttändaren slutade fungera och omöjliggjorde vidare försök.

3.3 Försök vid olika låga flöden

För att kunna se hur lågt flöde som är godtagbart in i kammaren så genomförs fyra separata försök med olika låga flöden. Flöden som provas är 1, 1,5, 1,8 och 2 l/s. Vid försöken mäts koldioxidhalten direkt i kammaren för att kontrollera om förbränningsgaser ansamlas i kammaren eller om flödet är tillräckligt för att gaserna ska hinna ventileras ut. Dessa mätningar i kammaren utförs med mätutrustning som inte är ansluten till datorn vilket betyder att ingen mätdata kan presenteras i diagram, resultaten beskrivs istället i text.

3.4 Avgränsningar

De avgränsningar som gäller för försöken listas här.

- Det enda materialet som provas är spånskiva.
- Endast försök med strålningsnivåerna 25 och 50 kW/m² genomförs.
- Varje försöksuppställning testas endast tre gånger.
- Experimenten med låga syrehalter begränsas till öppna system. Det vill säga luft från omgivningen blandas in med rökgaserna innan de analyseras i konkalorimetern.

4 Resultat

Här presenteras resultaten från testerna med de olika försöksuppställningarna. Samtliga försöksuppställningar är beskrivna i kapitel 3 och sammanfattas nedan i tabell 2, där X markerar de förutsättningar som gäller för varje försöksuppställning. De resultat som redovisas är effektutvecklingen, förändringen av massa, produktionen av kolmonoxid samt koldioxid och tid till antändning. Försöksuppställningarna 1-6 testas tre gånger, försöksuppställningarna 7 och 8 testas en gång vardera. Här redovisas enbart ett medelvärde av varje försöksuppställning, dessa är beräknade som medelvärdet av de tre delförsöken vid varje tidpunkt. Samtliga resultat presenteras i bilaga 2.

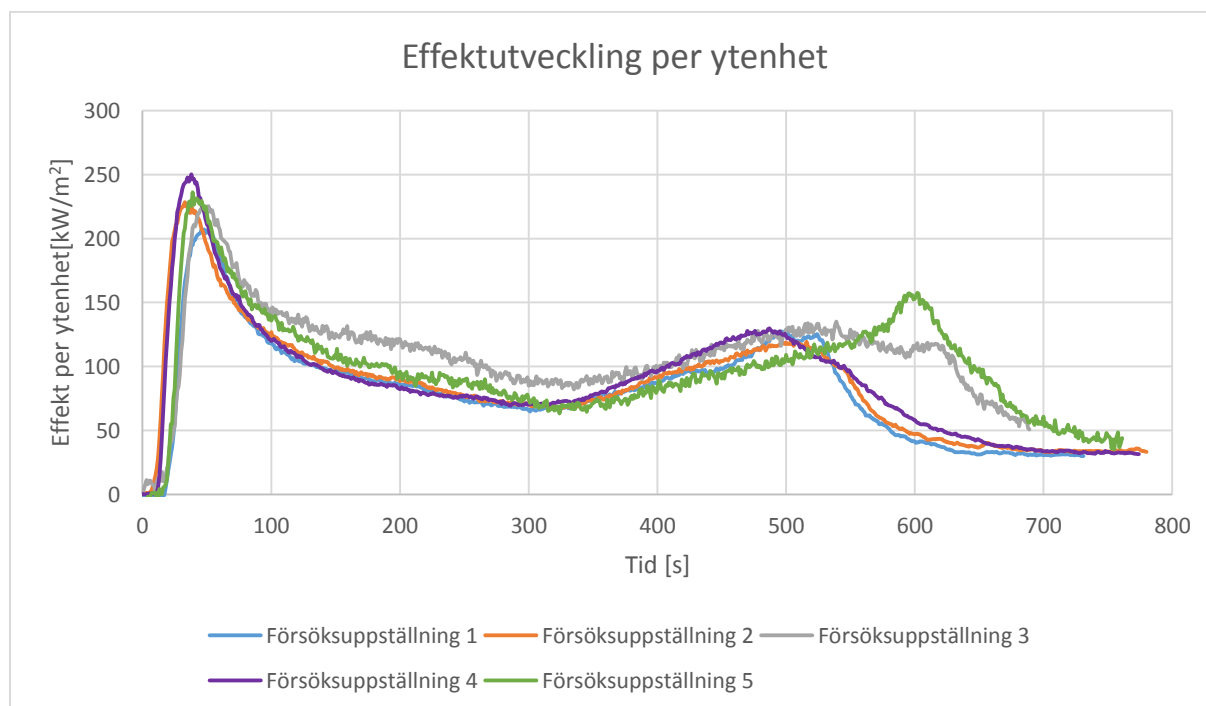
Tabell 2. Översiktstabell över de olika försöksuppställningarna.

Försöksuppställning	Strålningsnivå [kW/m ²]		Syrehalt [%]		Kammare används	Skorsten används
	25	50	20,95	15*		
1		X	X			
2		X	X		X	
3		X		X	X	
4		X	X		X	X
5		X		X	X	X
6	X		X			
7	X		X		X	X
8	X			X	X	X

*Denna syrehalt varierade mellan 15,1 och 15,8 %.

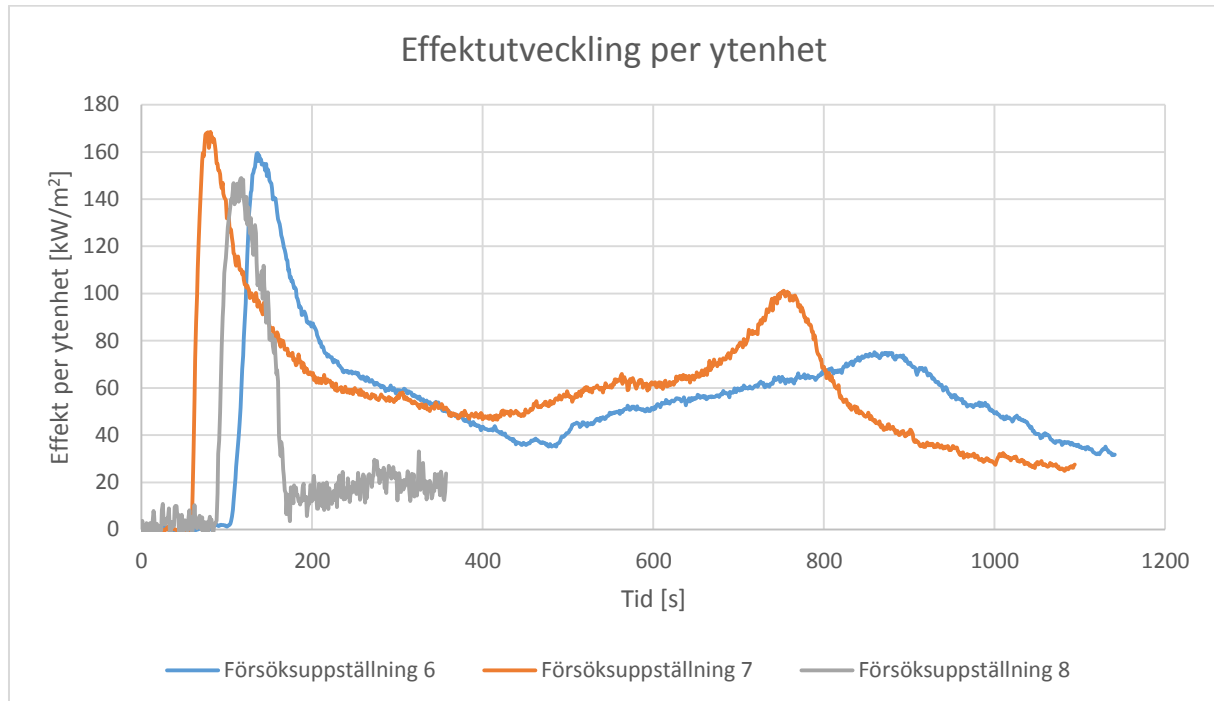
4.1 Effektutveckling

I figur 4 redovisas effektutvecklingen från de fem olika försöksuppställningarna som utfördes med en strålningsnivå på 50 kW/m². Effekten för försöksuppställning 3 och 5 är beräknade med hjälp av ekvation 1.



Figur 4. Medelvärden av effektutvecklingen vid försöksuppställningarna med strålningsnivå 50 kW/m².

Effektutvecklingen från de tre olika försöksuppställningar som utfördes med en strålningsnivå på 25 kW/m^2 presenteras i figur 5. Effekten för försöksuppställning 8 är beräknad med hjälp av ekvation 1. Försöksuppställning 8 slocknar redan efter cirka 170 sekunder, därför avslutades detta test betydligt tidigare än de övriga vilket kan ses i figur 5, 7, 9, 11 och 13.



Figur 5. Medelvärden av effektutvecklingen vid de olika försöksuppställningarna med strålningsnivå 25 kW/m^2 .

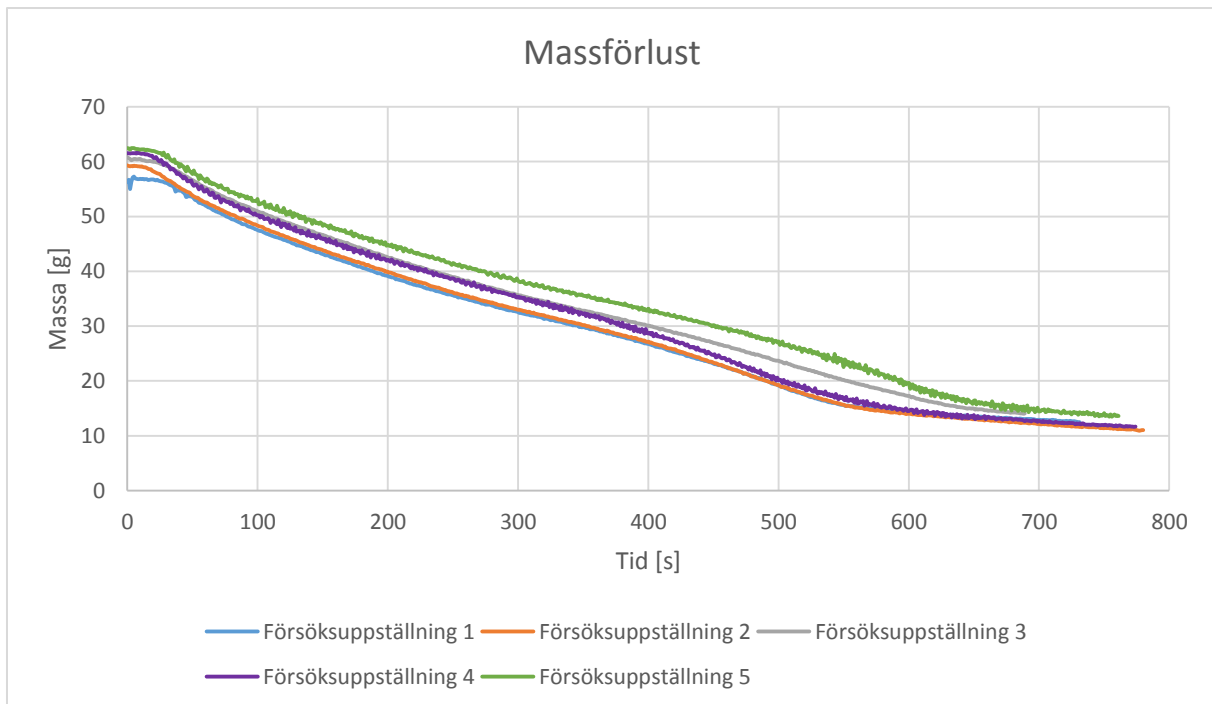
I tabell 3 presenteras maximal effektutveckling per ytenhet för samtliga redovisade försök, de olika försöken med samma försöksuppställning benämns A, B och C.

Tabell 3. Maximal effektutveckling vid de olika försöken.

Försöksuppställning	Maximal effektutveckling per ytenhet [kW/m^2]			
	A	B	C	Medel
1	233	214	211	219
2	228	244	233	235
3	223	252	230	235
4	251	252	252	252
5	245	245	236	242
6	167	162	159	163
7	169	-	-	169
8	149	-	-	149

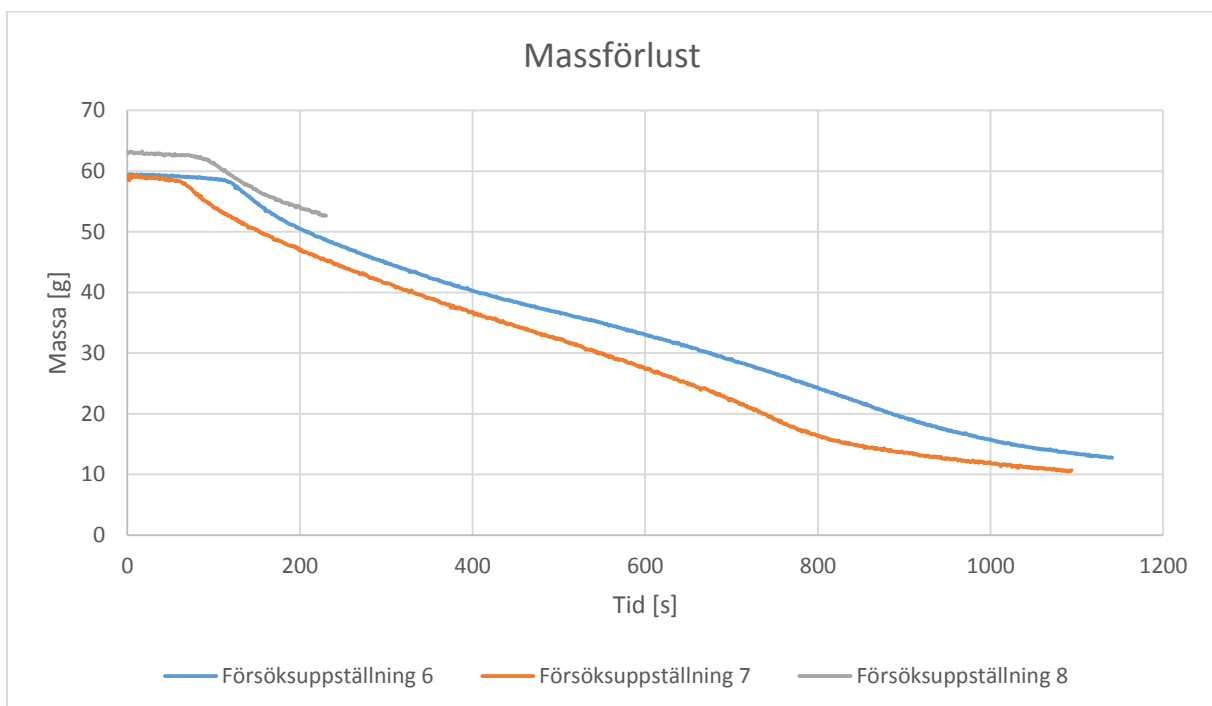
4.2 Massförlust och massavbrinningshastighet

Massförlusten vid de fem olika försöksuppställningarna med en strålningsnivå på 50 kW/m^2 presenteras i figur 6.



Figur 6. Medelvärden av massförlusten vid de olika försöksupställningarna med strålningsnivån 50 kW/m^2 .

I figur 7 presenteras massförlusten för de tre olika försöksupställningarna som utfördes med en strålningsnivå på 25 kW/m^2 .



Figur 7. Medelvärden av massförlusten vid de olika försöksupställningarna med strålningsnivån 25 kW/m^2 .

För att kunna jämföra förändringen i massa vid de olika försöksupställningarna visas ett medelvärde av massavbrinningshastigheten i tabell 4. Denna är beräknad genom att anpassa en trendlinje till de 400 första sekunderna efter antändning och beräkna lutningen för denna. Anledningen till att de första 400 sekunderna väljs är för att det observerades vid försöken att provmaterialet deformerades efter denna tidpunkt och försöken blev därefter inte likvärdiga.

Tabell 4. Genomsnittlig massavbrinningshastighet under de första 400 sekunderna efter antändning i försöken med strålningsnivån 50 kW/m².

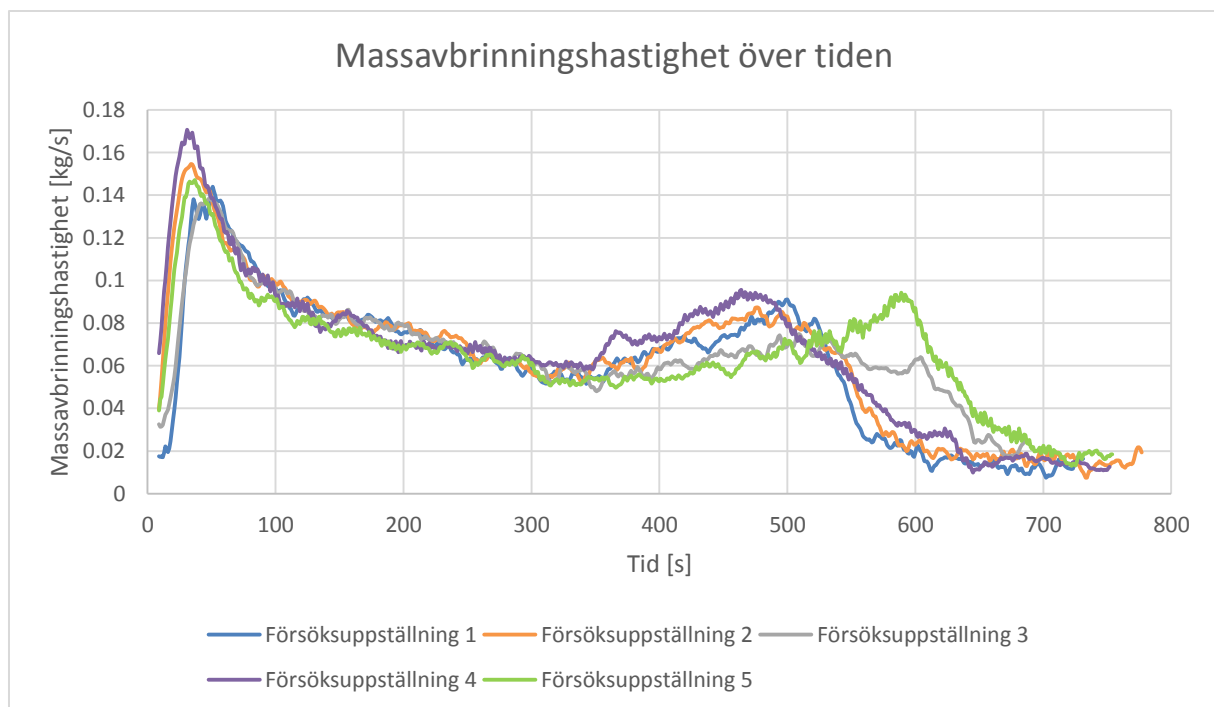
Försöksuppställning	Massavbrinningshastighet [g/s]
1	0,075
2	0,078
3	0,074
4	0,078
5	0,071
6	0,051
7	0,058

Eftersom försöksuppställning 8 inte höll på i 400 sekunder beräknas en genomsnittlig massavbrinningshastighet på samma sätt, men för de första 140 sekunderna efter antändning, för försöksuppställningarna med en strålningsnivå på 25 kW/m². Dessa presenteras i tabell 5.

Tabell 5. Genomsnittlig massavbrinningshastighet under de första 140 sekunderna efter antändning i försöken med strålningsnivån 25 kW/m².

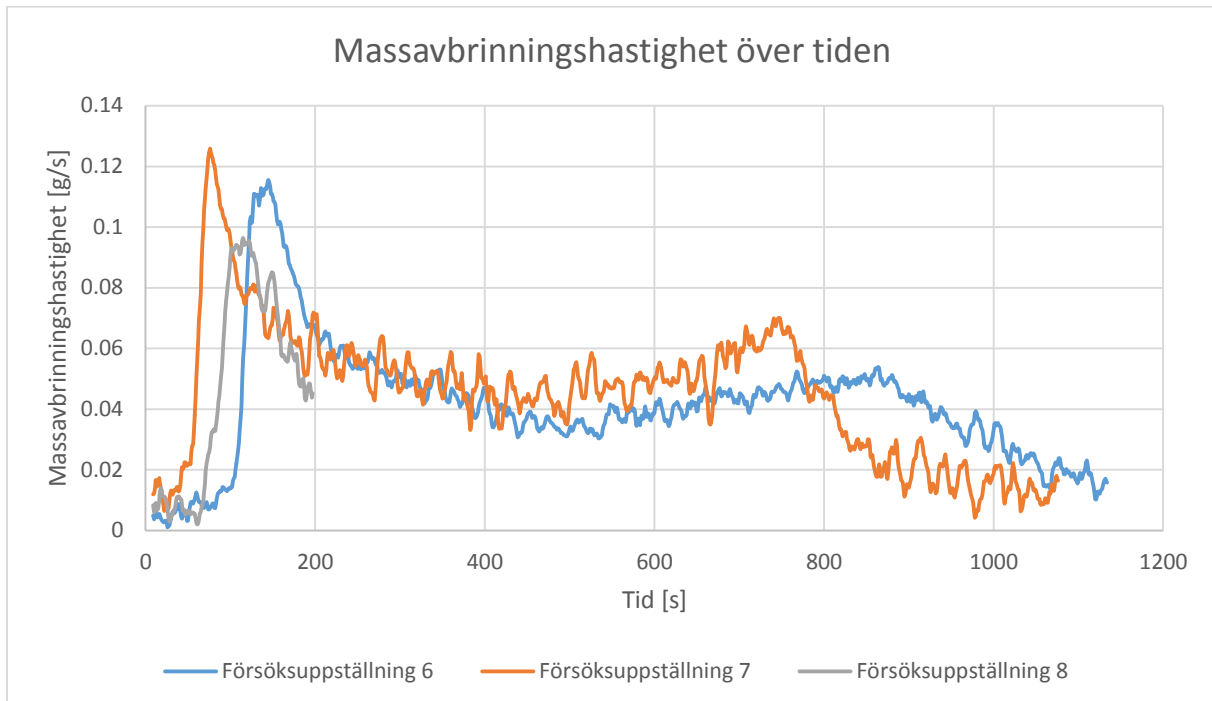
Försöksuppställning	Massavbrinningshastighet [g/s]
6	0,078
7	0,080
8	0,067

I figur 8 presenteras massavbrinningshastigheten över tiden för försöksuppställning 1-5. Mätdata togs vid försöken vid varje sekund vilket resulterar i att massavbrinningshastigheten som fås ur programmet fluktuerar kraftigt. Därför beräknas ett medelvärde och en trendlinje anpassas till kurvorna för att jämna ut dessa. För att få ett läsbart diagram är det dessa trendlinjer som visas i figur 8.



Figur 8. Medelvärden av massavbrinningshastigheten vid de olika försöksuppställningarna med strålningsnivån 50 kW/m².

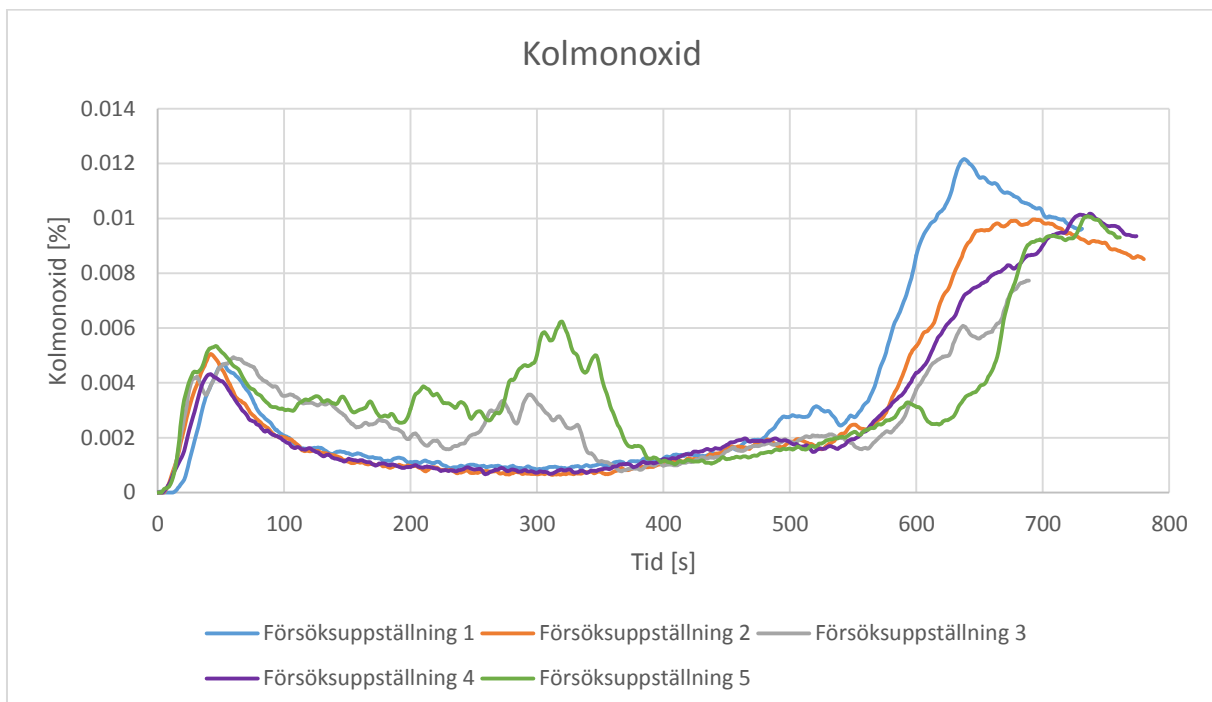
Massavbrinningshastigheten över tiden för försöksuppställning 6-8 presenteras i figur 9. På samma sätt som för figur 8 är det trendlinjer som visas i figur 9.



Figur 9. Medelvärden av massavbrinningshastigheten vid de olika försöksuppställningarna med strålningsnivån 25 kW/m^2 .

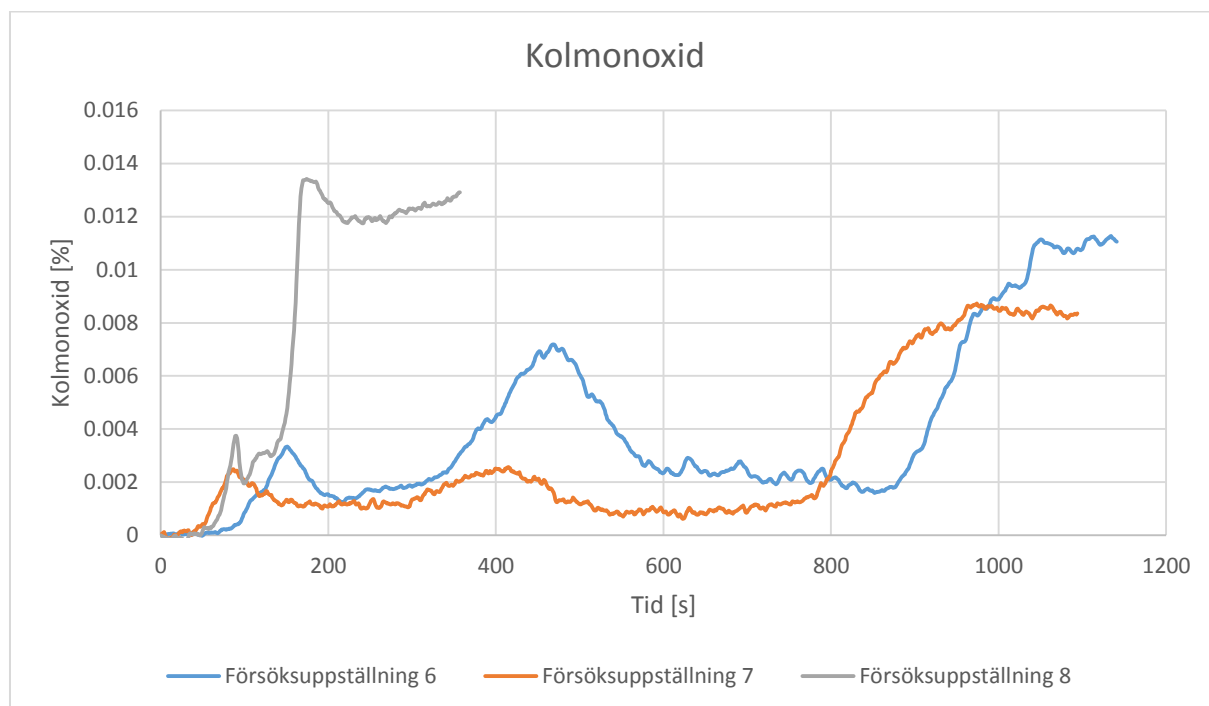
4.3 Produktion av kolmonoxid

I figur 10 visas produktionen av kolmonoxid i de fem olika försöksuppställningarna som utfördes med en strålningsnivå på 50 kW/m^2 .



Figur 10. Medelvärden av kolmonoxidproduktionen vid de olika försöksuppställningarna med strålningsnivån 50 kW/m^2 .

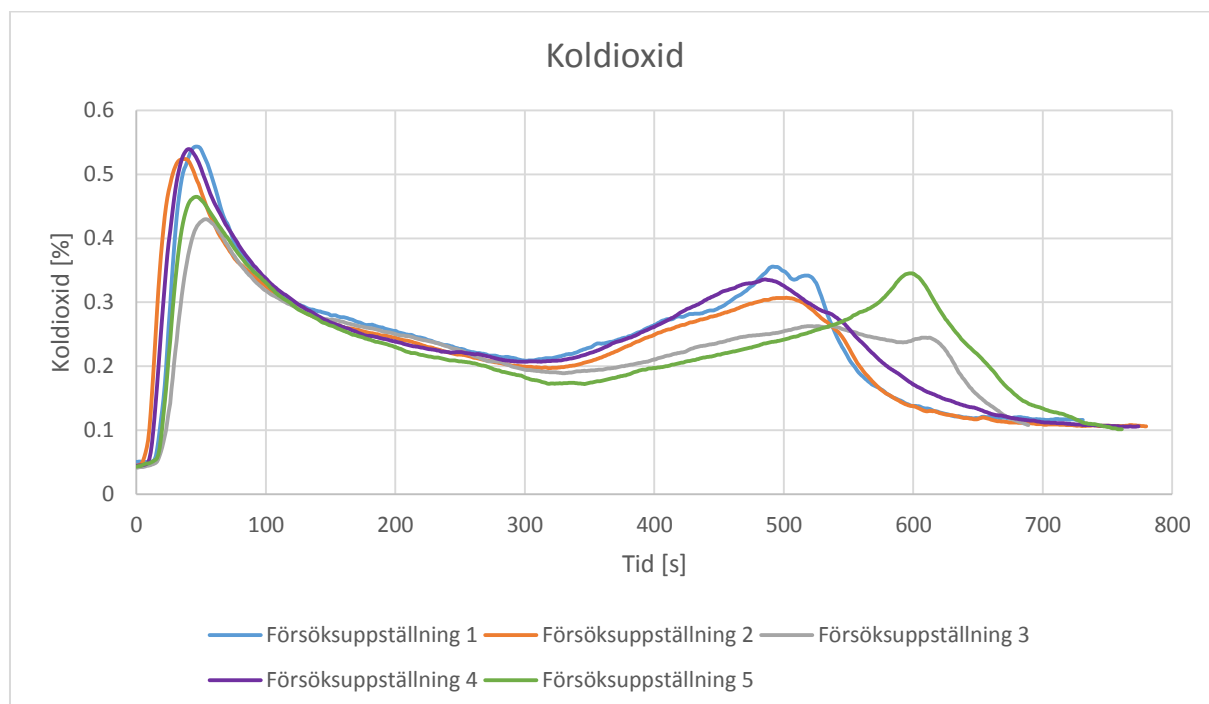
Produktionen av kolmonoxid för de tre försöksupställningar som gjordes med en strålningsnivå på 25 kW/m² redovisas i figur 11.



Figur 11. Medelvärden av kolmonoxidproduktionen vid de olika försöksupställningarna med strålningsnivån 25 kW/m².

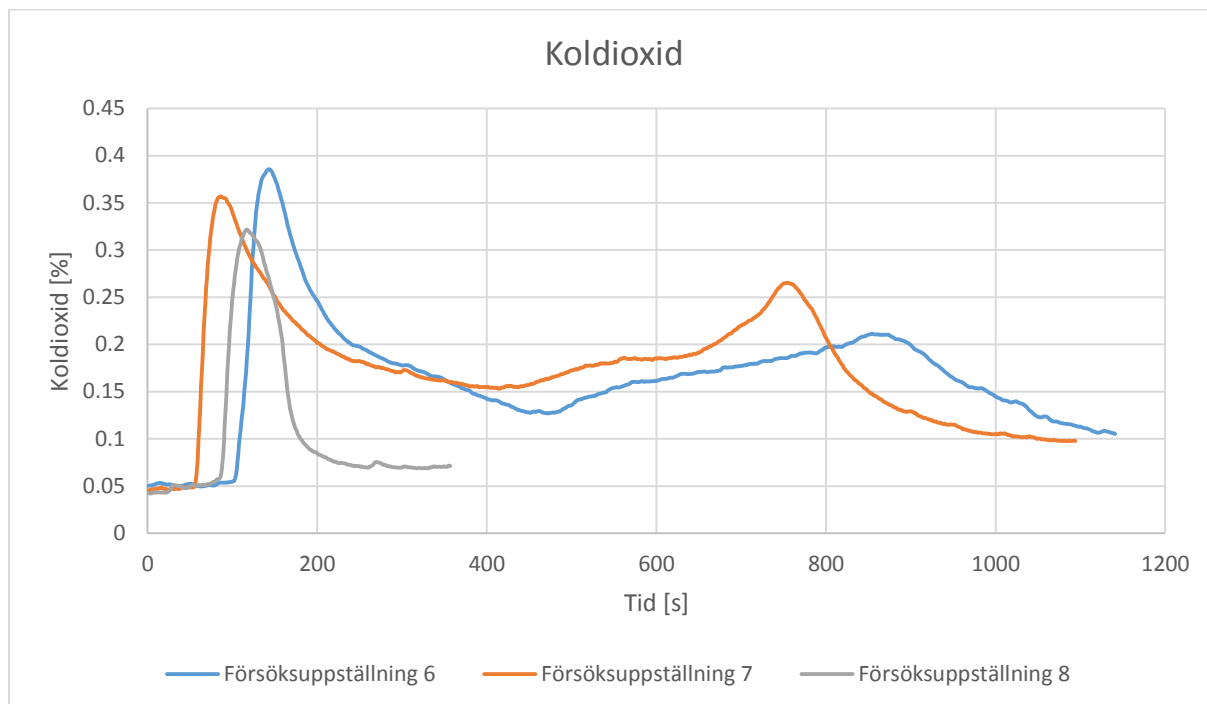
4.4 Produktion av koldioxid

Koldioxidproduktionen i de fem olika försöksupställningarna med strålningsnivån 50 kW/m² presenteras i figur 12.



Figur 12. Medelvärden av koldioxidproduktionen vid de olika försöksupställningarna med strålningsnivån 50 kW/m².

I figur 13 visas koldioxidproduktionen vid försöksuppställningarna med strålningsnivån 25 kW/m^2



Figur 13. Medelvärden av koldioxidproduktionen vid de olika försöksuppställningarna med strålningsnivån 25 kW/m^2 .

4.5 Tid till antändning

I tabell 6 presenteras jämförelser av tiden till antändning från de olika försöksuppställningarna. Försöksuppställningarna 2-5 och 7-8 utfördes med en väntetid på 75 sekunder från det att provet lagts på plats till det att försöket startades, vilket gör att dessa inte går att jämföra med försöksuppställning 1 och 6.

Tabell 6. Genomsnittlig tid till antändning för varje försöksuppställning.

Försöksuppställning	Tid till antändning [s]
1	23*
2	12
3	27
4	13
5	22
6	114*
7	60
8	90

* Ej jämförbara med övriga försöksuppställningar då försöken inte genomfördes med lika lång väntetid från det att provmaterialet placerades under värmaren till det att försöket startade.

4.6 Försök vid olika låga flöden

Vid försöken med tillfört flöde på 1,0 och 1,5 l/s observerades att mängden koldioxid ökade i kammaren efter antändning av materialet. Efter att maxeffekten avtagit och stabiliserats på en lägre nivå sjönk koldioxidhalten tillbaka till sitt ursprungliga värde.

Vid ett flöde på 1,8 l/s observerades en ökning av koldioxidhalten om cirka 0,01-0,02 procentenheter vid försökets maxeffekt.

I försöket med ett flöde på 2,0 l/s kunde ingen ökning av koldioxidhalten iakttas.

5 Analys och diskussion

Här diskuteras effektutvecklingen, massförlusten, produktionen kolmonoxid och koldioxid samt tid till antändning mellan de olika försöksuppställningarna. Även felkällor och osäkerheter diskuteras här.

Något som är genomgående för samtliga mätvärden är att användandet av skorsten inte har så stor inverkan vid de testade försöksuppställningarna. Vid experiment med ännu lägre syrehalter än de som testats i detta arbete är det möjligt att en skorsten skulle ha större påverkan på resultaten.

5.1 Effektutveckling

Här diskuteras resultaten för effektutvecklingen vid försöken med strålning på 50 respektive 25 kW/m².

5.1.1 50 kW/m²

Effektutvecklingskurvorna för försöksuppställning 1,2 och 4 följer varandra väl, se figur 4. Försöksuppställning 3 och 5 skiljer sig från de andra kurvorna då de är förskjutna åt höger. Denna fördröjning beror av att i försöksuppställning 3 och 5 är syrehalten lägre, därav blir tiden till antändning längre och förbränningsprocessen förskjuten. Det förväntade resultatet angående effekten var att försöksuppställning 3 och 5 skulle ha lägre effektutveckling än försöksuppställning 2 och 4. Detta kan dock inte styrkas med hjälp av resultaten. Tabell 3 visar på en något högre maxeffekt hos försöksuppställning 4 än försöksuppställning 5. Däremot kan ingen skillnad ses i medelvärdena hos försöksuppställning 2 och 3. Detta då test B i försöksuppställning 3 sticker ut och drar upp medelvärdet, se tabell 3. I figur 4 verkar försöksuppställning 3 och 5 till och med ha något högre effekt omkring tiden 200 sekunder in i försöket. Att en lägre syrehalt skulle resultera i en högre effekt är inte rimligt och tyder på någon brist i hur effekten beräknas. Eftersom effekten beräknas med hjälp av mängden syre i konkalorimetern skulle det kunna tyda på att ekvationerna 1-4 i detta fall inte har kompenserat tillräckligt för den lägre syrehalten.

Även om effektutvecklingskurvan för försöksuppställning 1 följer kurvorna för försöksuppställning 2 och 4 under större delen av brandförloppet kan det konstateras att försöksuppställning 1 har en lägre maxeffekt, se figur 4 och tabell 3. Detta skulle kunna förklaras med en ökad temperatur inne i kammaren och strålningspåverkan från omslutningsytorna. Dock är skillnaden störst precis i början av försöket för att sedan bli närmast obefintlig. Detta pekar på att kammarens påverkan inte borde vara stor. En förklaring som bättre motiverar skillnaden i maxeffekt i början kan därför vara den längre tid som provmaterialet utsattes för strålningspåverkan innan försöket startade i samtliga försöksuppställningar med kammare.

I samtliga försöksuppställningar ökar effekten stadigt i början där samtliga kurvor når sin maximumpunkt för att sedan sjunka. Efter att kurvorna sjunkit så stiger de igen för att sedan sjunka när flammorna slocknar. Vid den senare stigningen så observerades det vid försöken att provmaterialet deformerades och buktade upp. Detta leder till att yta på materialet som ännu inte deltagit i förbränningen exponeras vilket tros ligga bakom ökningen i effekt vid denna tidpunkt.

5.1.2 25 kW/m²

Försöksuppställning 6 och 7 har liknande utseende, dock har försöksuppställning 6 en lägre maxeffekt samt en fördröjning på grund av den senare antändningen. Att maxeffekten är högst hos försöksuppställning 7 kan bero på den längre tiden provet utsattes för strålning innan försöket startade jämfört med försöksuppställning 6, men då försöksuppställning 7 har en högre effektutveckling under nästan hela tiden verkar det även troligt att temperaturökning inne i kammaren och strålningspåverkan från omslutningsytorna också spelar in.

Försöksuppställning 8 har en lägre effektutveckling än försöksuppställning 7 vilket beror på den lägre syrehalten. Båda försöksuppställningarna 6 och 7 har en andra uppgång i effekt då provmaterialet deformerades och buktade upp. Försöksuppställning 8 har däremot inte denna andra ökning då den på grund av den låga syrehalten slocknar redan efter cirka 170 sekunder. Försöket fortsatte sedan under drygt tre minuter för att se om provet skulle återantända. Någon antändning skedde inte och försöket avslutades efter cirka 360 sekunder.

Försöksuppställning 6-8 har genomgående lägre effektutveckling än försöksuppställning 1-5, se tabell 3. Detta visar på att strålningen på konvärmaren påverkar försöken med samtliga syrehalter.

5.2 Massförlust och massavbrinningshastighet

Massan under försöken med de olika strålningsnivåerna diskuteras här.

5.2.1 50 kW/m²

Massan minskar relativt linjärt för samtliga försöksuppställningar fram till dess att de börjar plana ut. Utplaningen sker vid omkring 600 sekunder för försöksuppställning 1,2 och 4 och vid cirka 700 sekunder för försöksuppställning 3 och 5. Att massförlusten planar ut vid dessa tidpunkter sammanfaller med en kraftigt minskad effekt, se figur 4, och beror på att förbränningen håller på att avstanna. Någon markant skillnad gällande massförlusterna kan inte urskiljas, se figur 6. Det kan dock ses en tendens till att massavbrinningshastigheten är något långsammare vid försöken med lägre syrehalt (3 och 5) än de övriga med kammare (2 och 4), se tabell 4. Försöksuppställning 1 har något högre massavbrinningshastighet än 3 och 5 men något lägre än 2 och 4. Att massavbrinningshastigheten är högre vid försöksuppställning 1 än vid 3 och 5 kan bero på att den högre syrehalten leder till ett något snabbare brandförlopp. Kammaren som används leder till att temperaturen ökar inne i denna, samt att strålningen mot provmaterialet kan bli något högre på grund av strålning från kammarens ytor. Detta kan förklara den något högre massavbrinningshastigheten i försöksuppställning 2 och 4 jämfört med försöksuppställning 1.

Vid en jämförelse av figur 8 och figur 4 kan det konstateras att massavbrinningshastigheten följer effektutvecklingen väl. På samma sätt som för effektutvecklingen har försöksuppställningarna 3 och 5 en viss fördröjning och en lägre maximal massavbrinningshastighet jämfört med försöksuppställningarna 2 och 4. Likaså är förklaringen den lägre syrehalten.

5.2.2 25 kW/m²

Massan för försöksuppställningarna med en strålning på 25 kW/m² följer samma mönster som de vid 50 kW/m². Generellt har försöksuppställning 6-8 dock en lägre massavbrinningshastighet under hela förloppet beroende av den lägre strålningen.

5.3 Produktion av kolmonoxid

Produktionen av kolmonoxid och koldioxid följer varandra under större delen av försöken, se figur 10 och figur 12. De skiljer sig dock helt då flammorna slocknar. Kolmonoxidproduktionen ökar markant då flammorna slocknar i samtliga försöksuppställningar, se figur 10. Efter detta blir produktionen av kolmonoxid som störst. Det vill säga när effekten minskar så ökar drastiskt halten kolmonoxid. Detta beror av att förbränningen blir mer ofullständig.

5.3.1 50 kW/m²

I försöksuppställningarna 3 och 5 är kolmonoxidproduktionen högre i större delen av försöket jämfört med försöksuppställningarna 1, 2 och 4. Detta tros bero på att den lägre syrehalten leder till en mer ofullständig förbränning och därmed en ökad produktion av kolmonoxid. Detta kan även förklara topparna mitt under försöket i försöksuppställning 3 och 5.

5.3.2 25 kW/m²

Angående försöksuppställningarna vid strålningsnivån 25 kW/m² så har både försöksuppställning 6 och 7 en topp i mitten av kurvan. Denna topp skulle kunna bero på att båda försöken går in i en fas där ofullständig förbränning sker. Vid jämförelse med försöken vid 50 kW/m² ses samma tendens hos försöksuppställningarna 3 och 5, det vill säga med låg syrehalt. Däremot uppstår inte denna ökning i försöksuppställningarna 1, 2 och 4, vilket tyder på att både en låg strålning eller syrehalt leder till en ökad kolmonoxidproduktion.

Försöksuppställning 8 har en ökad kolmonoxidproduktion under stort sett hela förloppet. Den har en topp som de andra försöksuppställningarna men istället för att sjunka och stabiliseras efter denna så ökar den kraftigt, då provet slocknar redan efter cirka 170 sekunder. Efter att provmaterialet slocknat fram till det att försöket avslutas efter cirka 360 sekunder kan en ökning av kolmonoxidproduktionen ses. Denna produktion beror av att materialet glöder och det hade varit intressant att se hur produktionen hade utvecklats vidare, om mätningar hade fortsatt under längre tid.

5.4 Produktion av koldioxid

Här diskuteras produktionen koldioxid vid strålningsnivåerna 50 kW/m² respektive 25 kW/m², se figur 12 och figur 13.

5.4.1 50 kW/m²

Gällande produktionen koldioxid är de första topparna för försöksuppställning 3 och 5 lägre än de övriga. Detta skulle kunna bero på att förbränningen är mer ofullständig, men vid en jämförelse med produktionen av kolmonoxid kan inte detta styrkas. Vidare kommer den andra toppen i koldioxidproduktionen senare för försöksuppställning 3 och 5 vilket bör hänga samman med det mer utdragna brandförloppet som den lägre syrehalten ger upphov till.

5.4.2 25 kW/m²

Försöksuppställningarna 6 och 7 har en sjunkande koldioxidproduktion vid cirka 400 sekunder in i försöken, vilket sammanfaller med en ökande kolmonoxidproduktion. Detta kommer sig av att förbränningen är ofullständig i denna fas av förloppet.

Försöksuppställning 8 har en lägre maxproduktion av koldioxid än försöksuppställning 6 och 7. Detta beror av att den lägre syrehalten som används vid försöksuppställning 8 leder till att det istället bildas mer kolmonoxid.

5.5 Tid till antändning

Försöksuppställning 1 och 6 är inte jämförbara med övriga försöksuppställningar på grund av den tidigare nämnda väntetiden på 75 sekunder. Om dessa jämförs med övriga så ses att tiden till antändning är betydligt kortare när kammaren används än vid konkalorimetern i sitt standardutförande. Detta innebär att provmaterialet har förvärmats under de extra 75 sekunder som de varit placerade under konen i kammaren, trots att strålningskyddet varit stängt. För att få tillförlitliga värden på tid till antändning vid försök med låg syrehalt i kammaren krävs en effektivare strålningskärm. En annan orsak till förvärmning av provmaterialet kan vara strålning från kammarens omslutningsytor. Detta bedöms dock vara en mindre faktor då kammaren tilläts svalna av mellan försöken.

Tiderna till antändning är kortare i försöksuppställning 2 och 4 jämfört med försöksuppställning 3 och 5. Att tiden är längre i försöksuppställning 3 och 5 beror på att syrehalten är lägre, vilket i sin tur gör att förbränningsprocessen blir fördröjd.

Försöken med lägre strålning har naturligt längre tid till antändning än de med högre strålning. Tiden till antändning är längre i försöksuppställning 8 än i försöksuppställning 7, vilket beror av den lägre syrehalten.

5.6 Försök vid olika låga flöden

En ansamling av förbränningsgaser i kammaren kan uppstå vid för låga flöden in i denna. Denna ansamling stör förbränningen och ger missvisande resultat. Det är därför av betydelse att flödet in i kammaren är tillräckligt högt.

Ökningen av koldioxid vid flödena 1,0 och 1,5 l/s tyder på en ansamling av gaser i kammaren. Även vid försöket med 1,8 l/s kan en viss ökning av koldioxidhalten observeras. Detta medför att dessa låga flöden är olämpliga vid försök.

Vid flödet 2,0 l/s ökade inte koldioxiden något, vilket gör att gränsen för hur lågt flödet bör vara ligger någonstans mellan 1,8-2,0 l/s. Därför kan det vara lämpligt att inte låta flödet understiga 2,0 l/s.

5.7 Felkällor och osäkerheter

Det är många parametrar som påverkar resultatet. Detta kan speciellt urskiljas i diagrammen där kurvorna fluktuerar.

Då tillgången på kväve var begränsad och minskade under försökens gång, uppstod svårigheter att hålla syrehalten konstant mellan de olika försöken med låg syrehalt.

Därav varierade denna mellan 15,1 och 15,2 % vid försöksuppställning 3, mellan 15,2 och 15,4 % vid försöksuppställning 5 och låg runt cirka 15,8 % vid försöksuppställning 8.

Av försöksuppställningarna 1-6 har det gjorts 3 försök. Ett större antal försök på varje försöksuppställning skulle öka reliabiliteten, då en ökad datainsamling skulle ge ett mer representativt resultat då varje försök i sig inte skulle påverka resultatet lika mycket. Dock är detta väldigt tids- och resurskrävande och en avgränsning att genomföra 3 försök i varje försöksuppställning var tvungen att göras för att hinna genomföra examensarbetet inom den uppsatta tiden. När kurvorna för de olika försöken med samma försöksuppställning jämförs kan det konstateras att skillnaderna mellan försöken är relativt liten. Detta gäller främst för det initiala skedet, innan provmaterialet börjar bukta upp och spricka. Detta innebär att repeterbarheten verkar vara god vilket motiverar att medelvärden för försöken kan användas för att jämföra olika försöksuppställningar med varandra.

Försöksuppställningarna 7 och 8 har bara utförts en gång vardera på grund av fel på gnisttändaren. Detta innebär att resultaten för dessa är mer osäkra och slutsatserna angående dem bör tas med försiktighet.

Strålningsskärmen i kammaren är inte tillräckligt effektiv för att förhindra förvärmning av provmaterialet. Detta leder till att det inte går att jämföra tid till antändning mellan försöksuppställningarna med och utan kammare. Om en sådan jämförelse ska göras krävs en lika lång väntetid för försöken utan kammare som med kammare. Denna väntetid är beskriven i kapitel 3. Alternativt krävs en effektivare strålningsskärm i kammaren. Den strålningsskärm som användes i kammaren i de aktuella försöken var en icke vätskekyld platta liknande den som finns i konkalorimetern i standardutförande.

Något som observerades i figur 4 var att effektutvecklingskurvorna för försöksuppställning 3 och 5 fluktuerade mycket mer än övriga. Detta beror troligen på ekvation 1 och alla dess ingående variabler, som användes för att räkna fram kurvorna för dessa försöksuppställningar. Något annat som inverkat här skulle kunna vara att syrehalten fluktuerar under försöken.

Ett öppet system i sig innebär vissa osäkerheter då förbränningsgaserna blandas med den omgivande luften innan dessa analyseras i konkalorimetern. Dessa osäkerheter kan minskas med hjälp av de modifierade ekvationerna men en viss osäkerhet kvarstår dock vilket kunde konstateras när effektutvecklingen diskuterades.

6 Slutsatser

Efter genomförda experiment och analys av resultaten dras följande slutsatser vid försök på spånskiva i ett öppet system. Slutsatserna besvarar den frågeställning som sattes upp i början av arbetet.

Vilka felkällor och problem finns vid experiment med bränder vid reducerad syrehalt i konkalorimetern?

- För att kunna jämföra tid till antändning mellan försök med kammare och försök i konkalorimetern enligt standard behövs en effektivare strålningskärm, då extra väntetid krävs för att stabilisera syrehalten i kammaren.
- Vid försök på spånskiva i det aktuella öppna systemet bör inte flödet in i kammaren understiga 2,0 l/s.

Hur beter sig spånskiva vid brand i syrefattig miljö i förhållande till normal atmosfär?

- Vid en strålningsnivå på 25 kW/m² kan en lägre effektutveckling konstateras då syrehalten reduceras, jämfört med försöken vid normal atmosfär. Vid en strålningsnivå på 50 kW/m² kan samma sak inte bevisas av försöken.
- Massavbrinningshastigheten följer effektutvecklingen väl.
- En lägre syrehalt resulterar i en högre kolmonoxidproduktion och en lägre koldioxidproduktion.
- Lägre syrehalt ger längre tid till antändning.

Vilka åtgärder finns för att få så tillförlitliga resultat som möjligt vid experiment i ett öppet system?

- Vid de aktuella försöken verkar inte användandet av en skorsten påverka resultatet i någon större utsträckning.
- Att tillåta inblandning av omgivande luft innan analys sker leder till osäkerheter. Dessa kan kompenseras med hjälp av modifierade ekvationer men en viss osäkerhet kvarstår.

7 Förslag till fortsatt arbete

Detta arbete är ett pilotprojekt vid LTH i att utföra tester vid låga syrehalter i konkalorimetern. Det finns många aspekter att utreda och många fler försöksupställningar som skulle vara intressanta att prova. Här följer några förslag till fortsatta arbeten.

- Jämförande experiment mellan öppet och slutet system.
- Fler experiment i olika variationer. Särskilt vid ännu lägre syrehalter, eller med andra skorstensdimensioner.
- Undersöka sotproduktionen mellan olika experiment.
- Försök med andra material än spånskiva.

8 Referenser

- Babrauskas, V., 1984. Development of the Cone Calorimeter - A Bench-scale Heat Release Rate Apparatus Based on Oxygen Consumption. *Fire and Materials*, Volym 8, pp. 81-95.
- Babrauskas, V., Twilley, W. H., Janssen, M. & Yusa, S., 1992. A Cone Calorimeter for Controlled-atmosphere Studies. *Fire and Materials*, Volym 16, pp. 37-43.
- Chiti, S., 2009. *Test Methods for Hypoxic Air Fire Prevention Systems and Overall Environmental Impact of Applications*, Modena: University of Modena.
- Drysdale, D., 2011. *An Introduction to Fire Dynamics*. 3 red. Chichester: John Wiley & sons Ltd.
- Huggett, C., 1980. Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements. *Fire and Materials*, Volym 4, pp. 61-65.
- Höst, M., Regnell, B. & Runeson, P., 2006. *Att genomföra examensarbete*. 1:6 red. Lund: Studentlitteratur AB.
- ISO 5660-1, 2002. *Heat release rate (cone calorimeter method)*, Geneva: The International Organization for Standardization.
- Janssens, M. L., 1991. *Measuring Rate of Heat Release by Oxygen Consumption*, Washington,DC: Fire Technology.
- Lindholm, J., Brink, A. & Hupa, M., 2009. *Cone Calorimeter - A Tool for Measuring Heat Release Rate*, Åbo: Åbo Akademi Process Chemistry Centre.
- Luo, M., He, Y., Dowling, V., Bowditch, P. & Leonard, J. 1998. *Combustion Behaviour of Polyurethane Foams under Depleted Oxygen Environment*. Singapore, Fire Science and Technology: proceedings of the Third Asia-Oceania Symposium.
- Marquis, D., Guillaume, E. & Lesenechal, D., 2013. Accuracy (trueness and precision) of cone calorimeter tests with and without a vitiated air enclosure. *Procedia Engineering* 62, pp. 103-119.
- Mikkola, E., 1993. *Effects of Oxygen Concentration on Cone Calorimeter Results*. , Proceedings of the Sixth International Fire Conference, pp. 49-56.
- Mulholland, G., Twilley, W., Babrauskas, V., Janssens, M. & Yusa, S. 1991. *The Effect of Oxygen Concentration on CO and Smoke Produced by Flames*, Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.
- Nilsson, M. & van Hees, P., 2013. *Advantages and challenges with using hypoxic air venting as fire protection*, Lund: Wiley Online Library.
- SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, 2014. *SP*. [Online]
Available at:
http://www.sp.se/sv/index/services/firetest_building/firetest_bu%C3%ADlding/iso_5660_konkalorimeter/Sidor/default.aspx
[Använd 09 09 2014].

Thornton, W., 1917. The relation of oxygen to the heat of combustion of organic compounds. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, pp. 196-203.

Werrel, M., Deubel, J. H., Krüger, S., Hofmann, A. & Krause, U. 2014. The calculation of the heat release rate by oxygen consumption in a controlled-atmosphere cone calorimeter. *Fire and Materials*, Issue 38, pp. 204-226.

Bilaga 1. Tillvägagångssätt

Här presenteras tillvägagångssättet för samtliga försöksuppställningar, både med och utan kammare och skorsten.

Provmaterialet vägs och slås sedan in i aluminiumfolie.



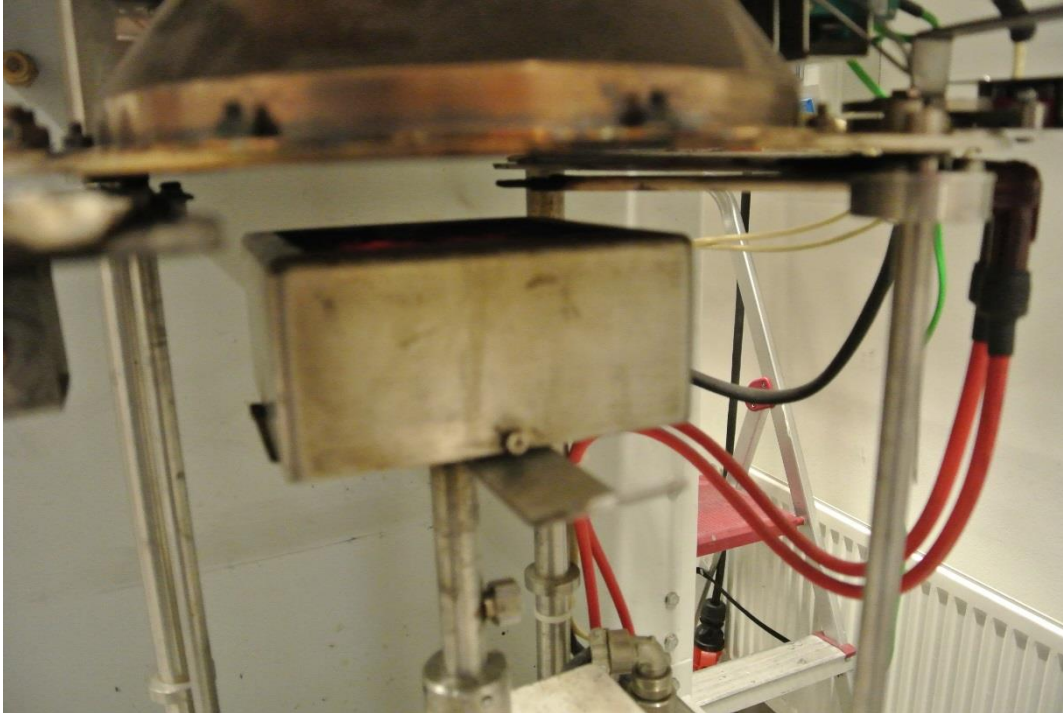
Figur 14. Provmaterialet till vänster inslaget i aluminiumfolie. Till höger ses metallhållarens två delar.

Provmaterialet placeras sedan i en metallhållare som sätts under konen.



Figur 15. Provmaterialet i metallhållaren.

Strålningsskyddet för konen förs undan och gnisttändaren förs fram ovanför provmaterialet.



Figur 16. Metallhållaren på plats i konkalorimetern.

När antändning har skett förs gnisttändaren undan.



Figur 17. Antändning har skett och gnisttändaren förs undan.

I försöksuppställning 2-5 och 7-8 används en kammare under rökgashuven för att kunna reglera syrehalten. Kammaren har höjden 33 cm, bredden 38 cm och djupet 30 cm. Avståndet från hålet i kammarens översta del till nedre delen av rökgashuven är 8 cm.



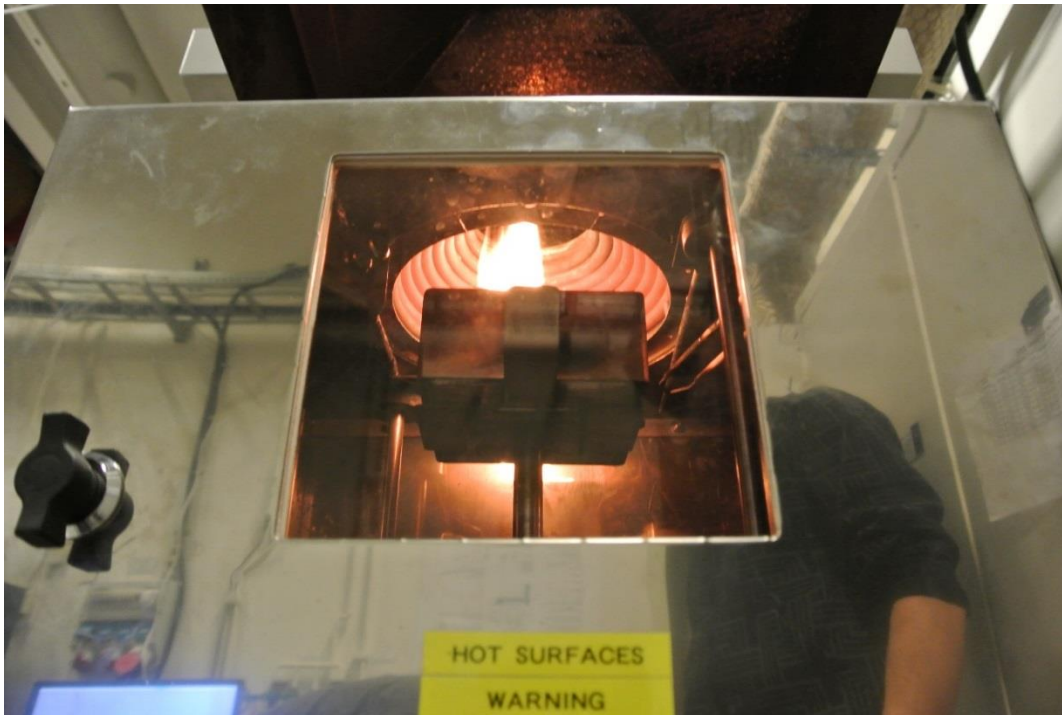
Figur 18. Kammaren placerad under rökgashuven.

Syrehalten tillåts stabiliseras i kammaren. Sedan öppnas dörren till kammaren och provmaterialet sätts på plats. Därefter stängs dörren till kammaren. Sedan väntas det 75 sekunder innan försöket startas för att låta syrehalten inne i kammaren stabiliseras. Under denna tid är strålningskyddet för konen stängt för att minimera uppvärmning av provmaterialet i förväg.



Figur 19. Provmaterialet inne i kammaren.

Därefter förs strålningskyddet bort, gnisttändaren förs till och provet startas.



Figur 20. Metallhållaren sedd genom observationsfönstret placerad i kammaren.

I försöksupställning 4, 5, 7 och 8 sätts en skorsten med höjden 30 cm och diametern 10 cm ovanpå kammaren.



Figur 21. Skorsten placerad på konvärmaren.

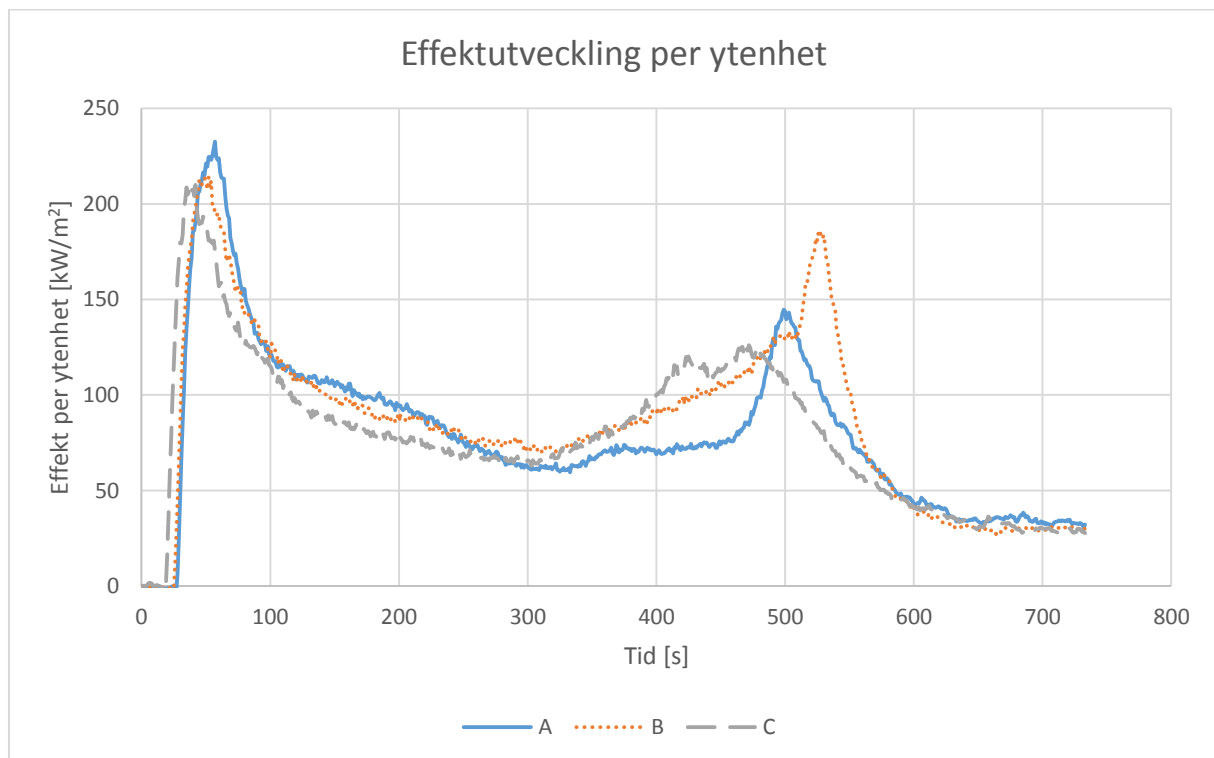
Bilaga 2. Resultat

Här presenteras resultaten från testerna med de olika försöksuppställningarna. Det som redovisas är effektutvecklingen, massförlusten, massavbrinningshastigheten och produktionen av kolmonoxid samt koldioxid. Försöksuppställningarna 1-6 testades tre gånger. De olika testerna med samma försöksuppställning kallas A, B och C.

Försöksuppställningarna 7 och 8 testades enbart en gång vardera då fel på utrustningen omöjliggjorde vidare försök.

Försöksuppställning 1

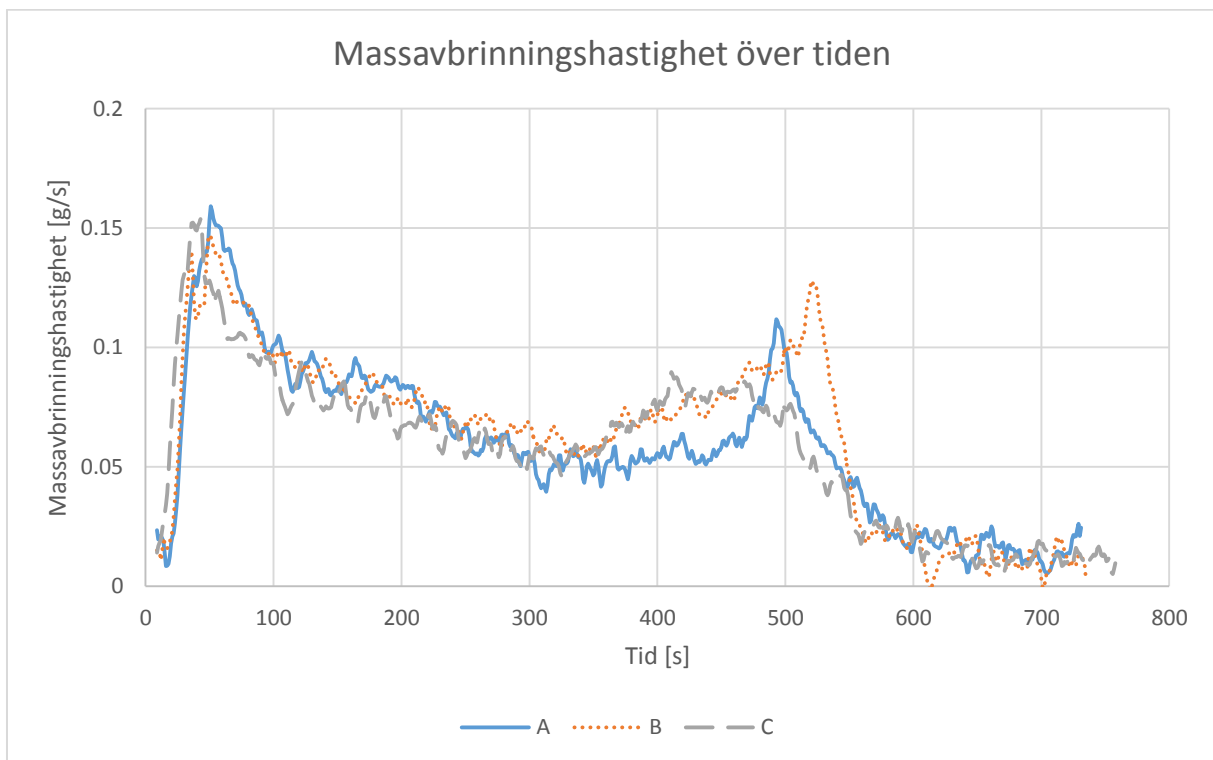
Här presenteras resultaten från försöksuppställning 1, det vill säga tester i konkalorimeterns standardutförande utan kammare under. Strålningsnivån på konen är 50 kW/m^2 .



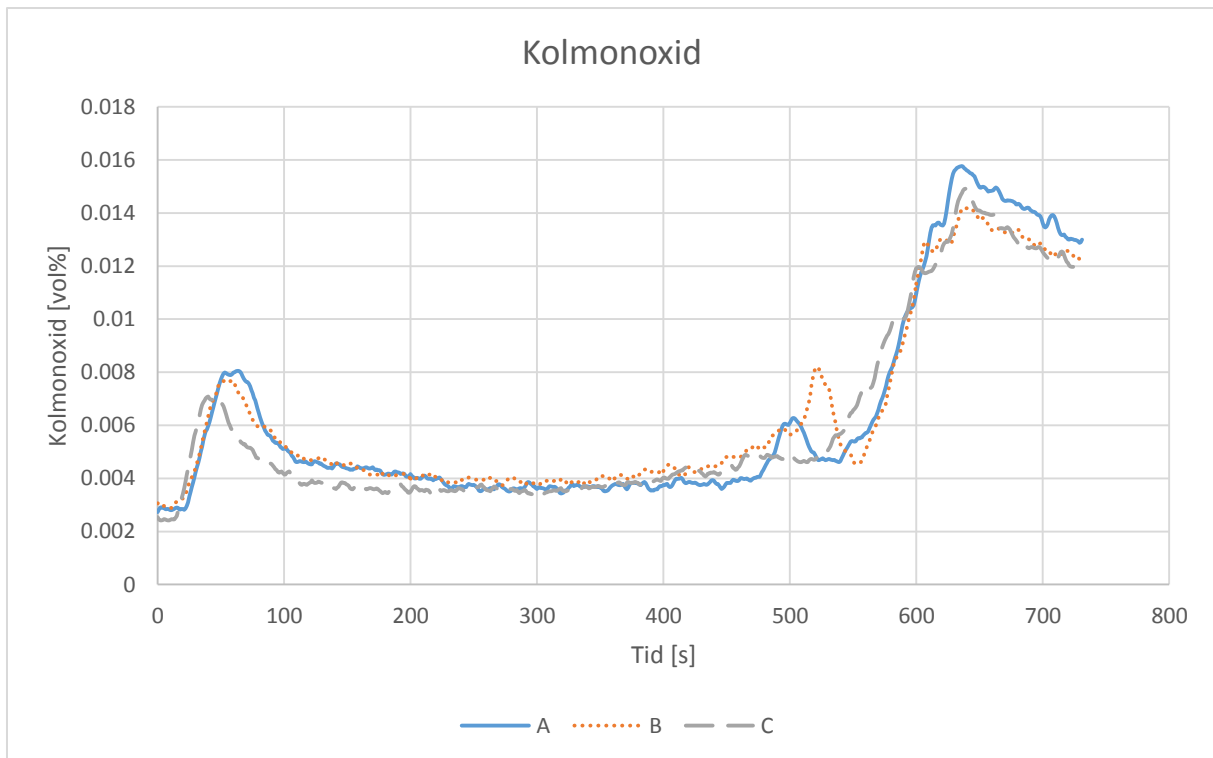
Figur 22. Effektutveckling per ytenhet vid försöksuppställning 1.



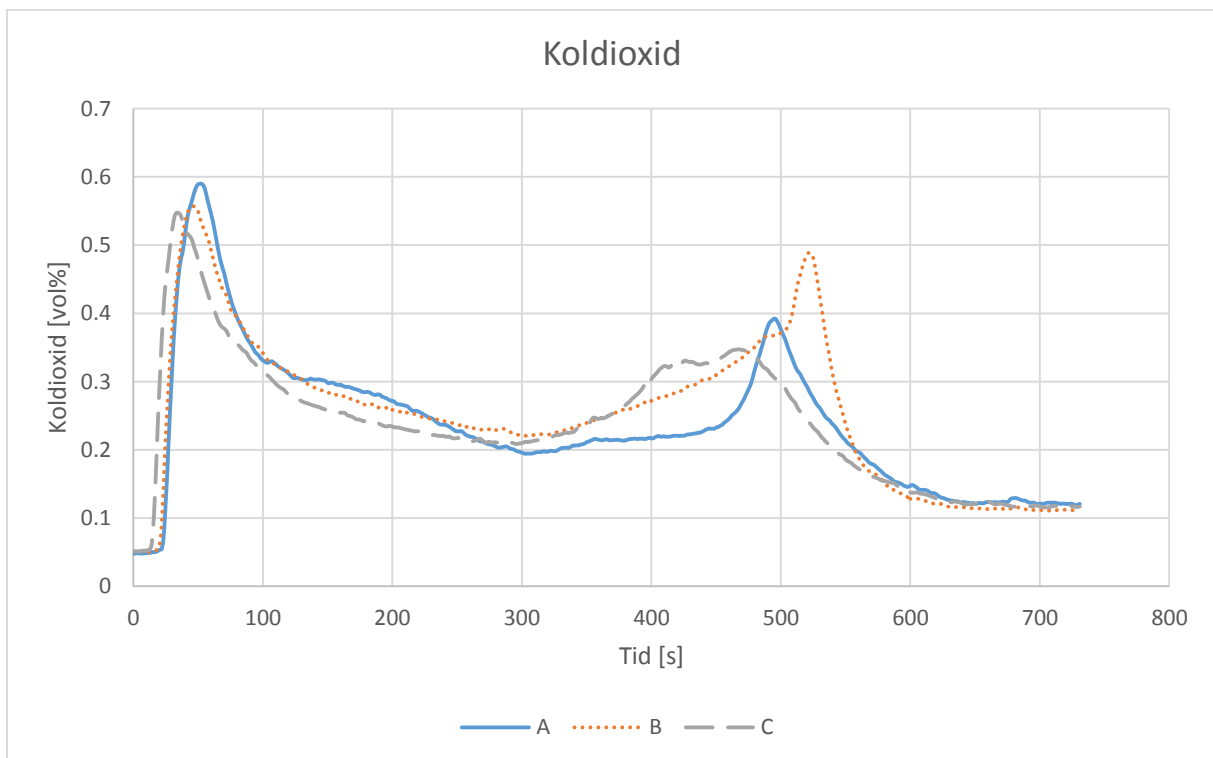
Figur 23. Massförlust över tid i försöksupställning 1.



Figur 24. Massavbrinningshastighet vid försöksupställning 1.



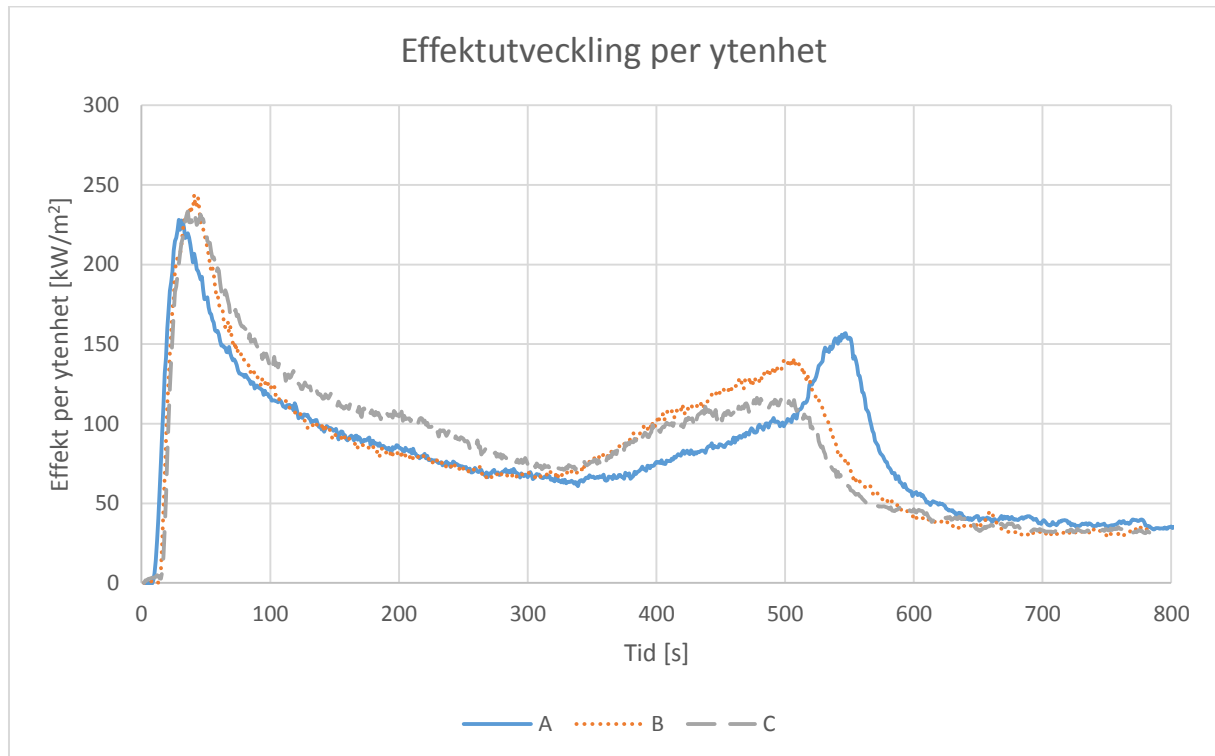
Figur 25. Kolmonoxidproduktion över tid i försöksupställning 1.



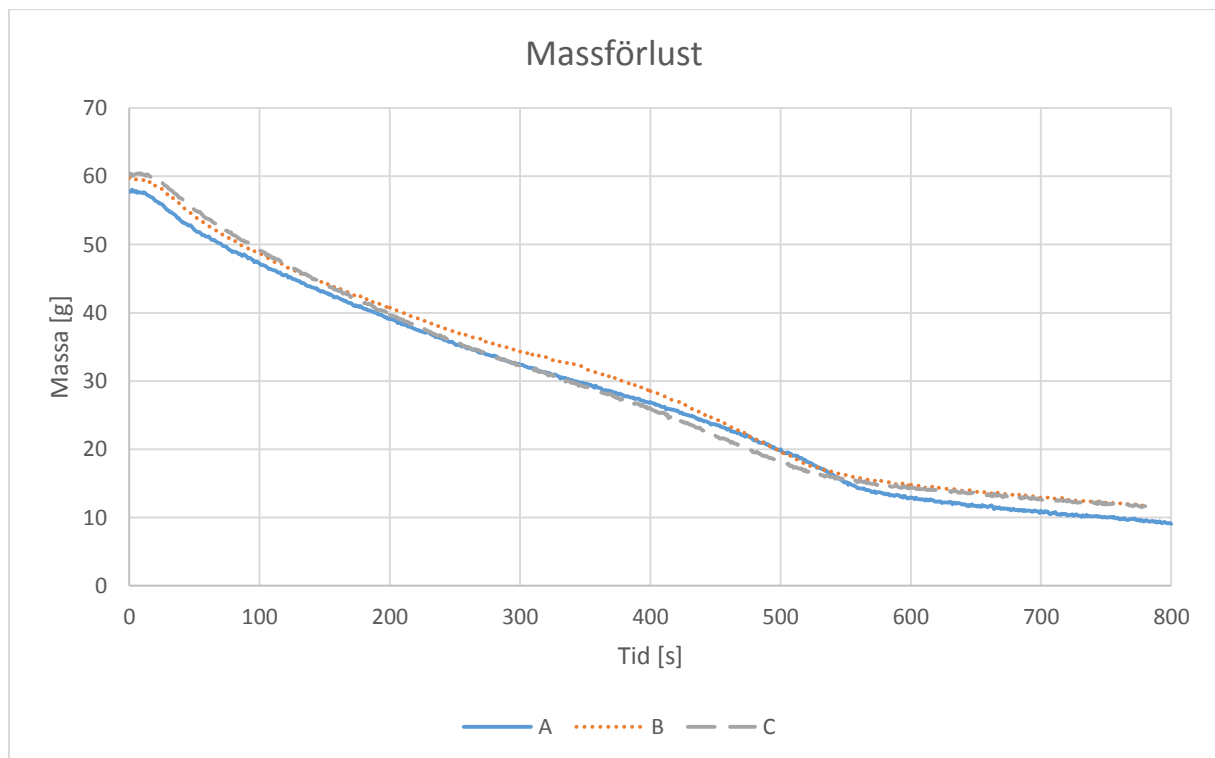
Figur 26. Koldioxidproduktion över tid i försöksupställning 1.

Försökuppställning 2

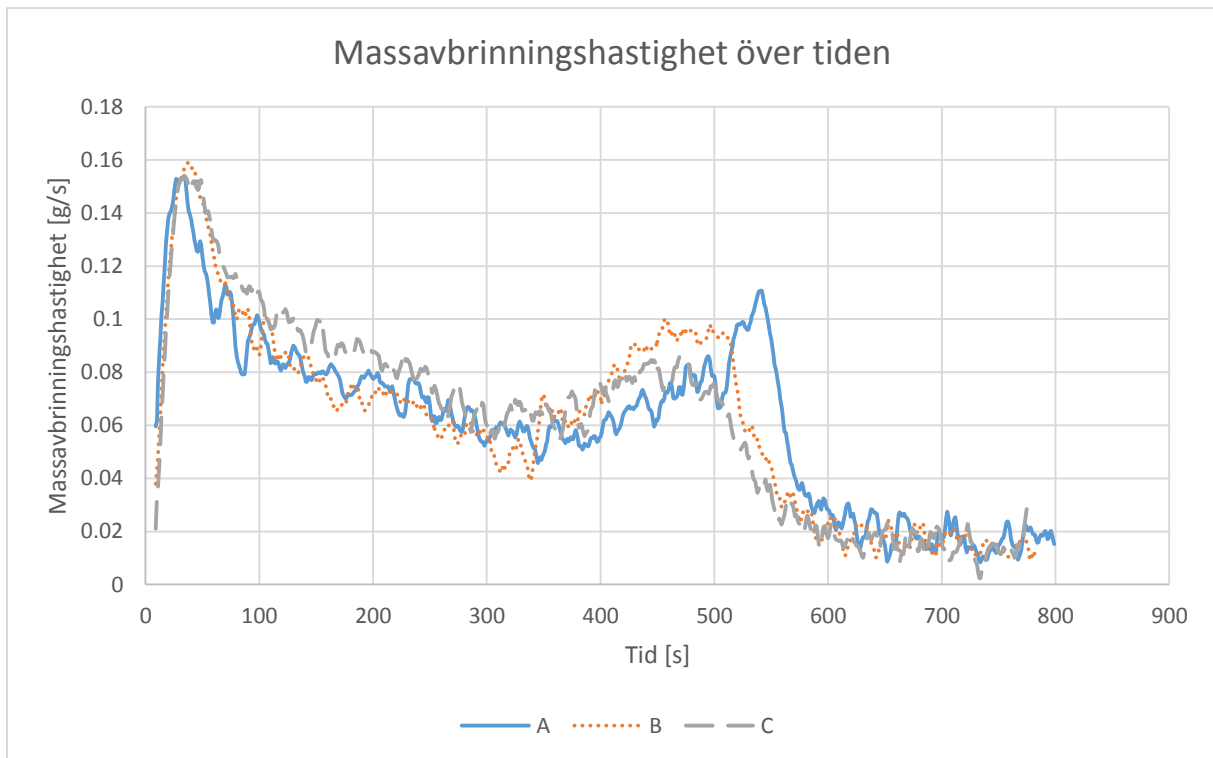
Här presenteras resultaten från försökuppställning 2. I försökuppställning 2 används en kammare som placeras under rökgashuven till konkalorimetern. Försök utförs vid normal atmosfär med en syrehalt på 20,95 %.



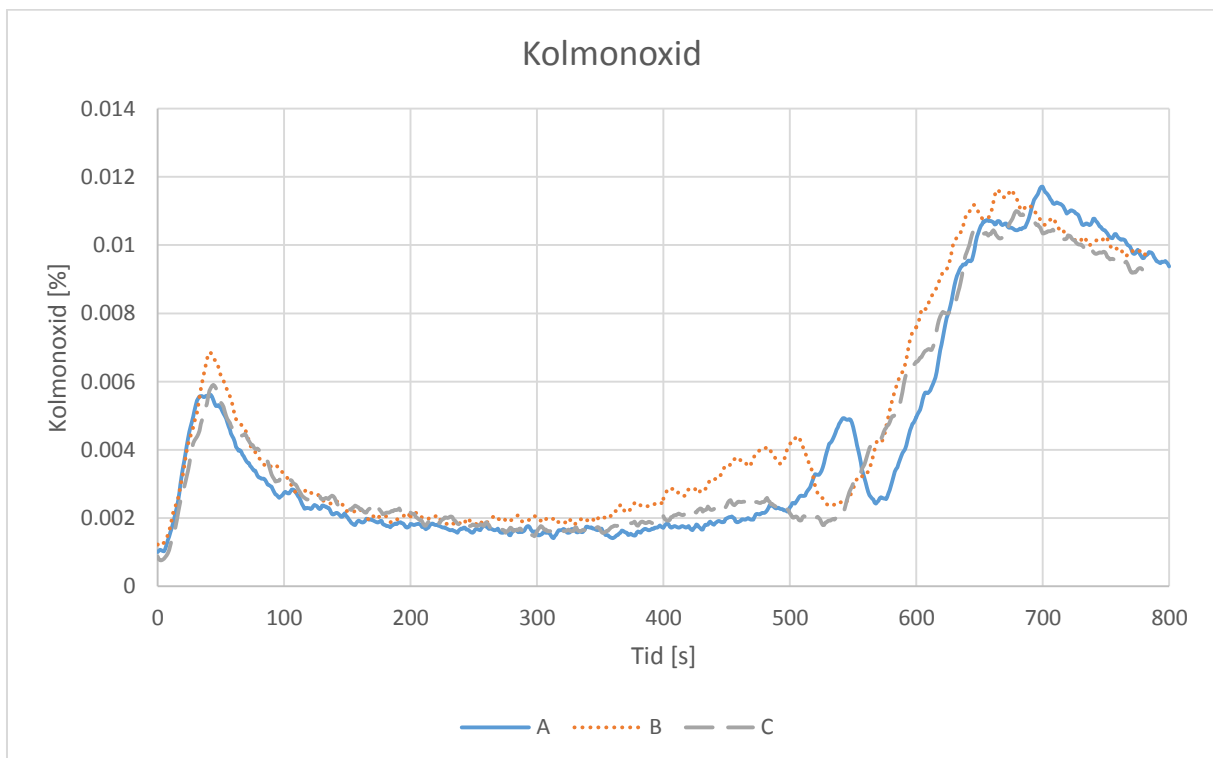
Figur 27. Effektutveckling vid försökuppställning 2.



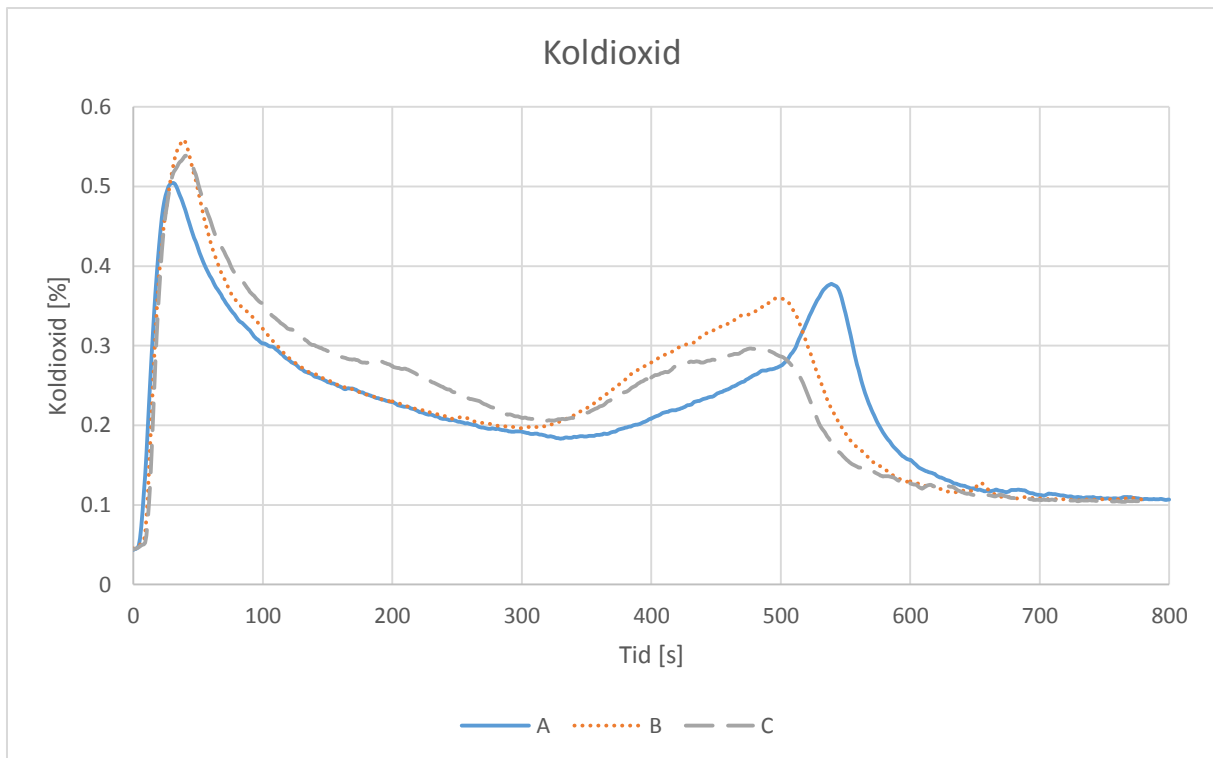
Figur 28. Massförlust över tid i försökuppställning 2.



Figur 29. Massavbrinningshastighet vid försöksupställning 2.



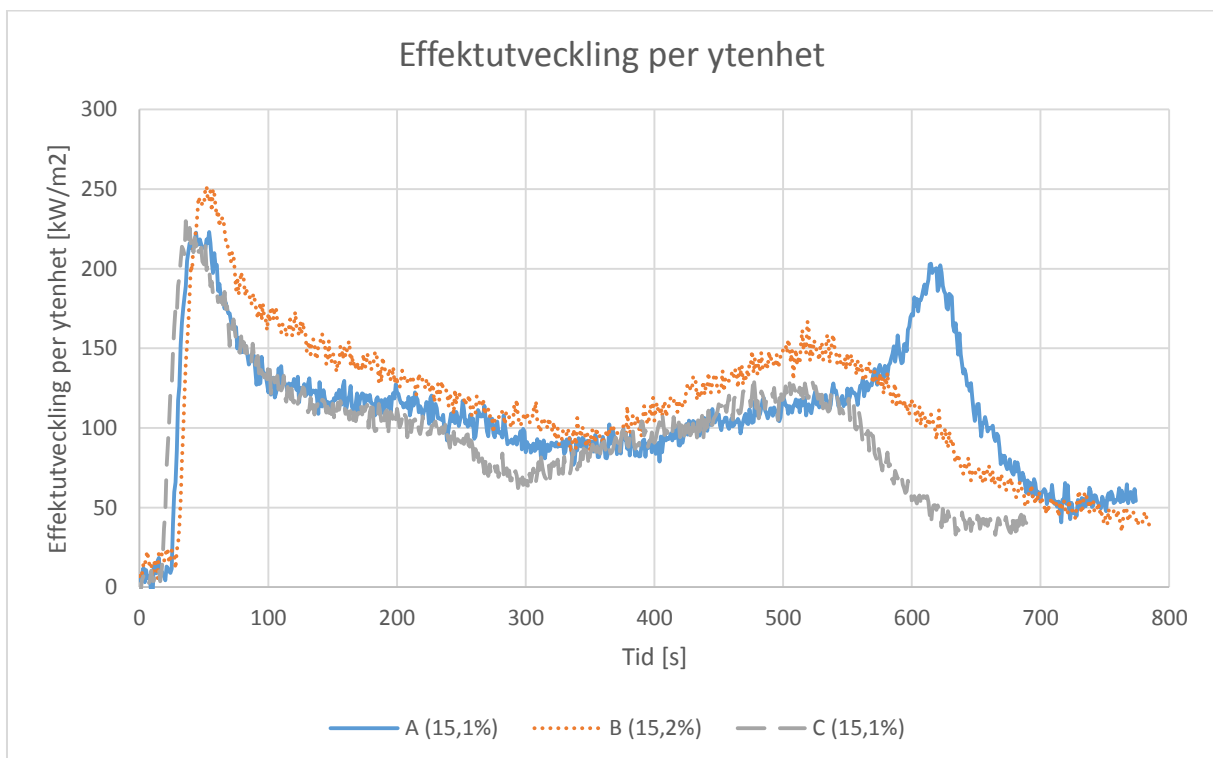
Figur 30. Kolmonoxidproduktion i försöksupställning 2.



Figur 31. Koldioxidproduktion i försöksupställning 2.

Försöksupställning 3

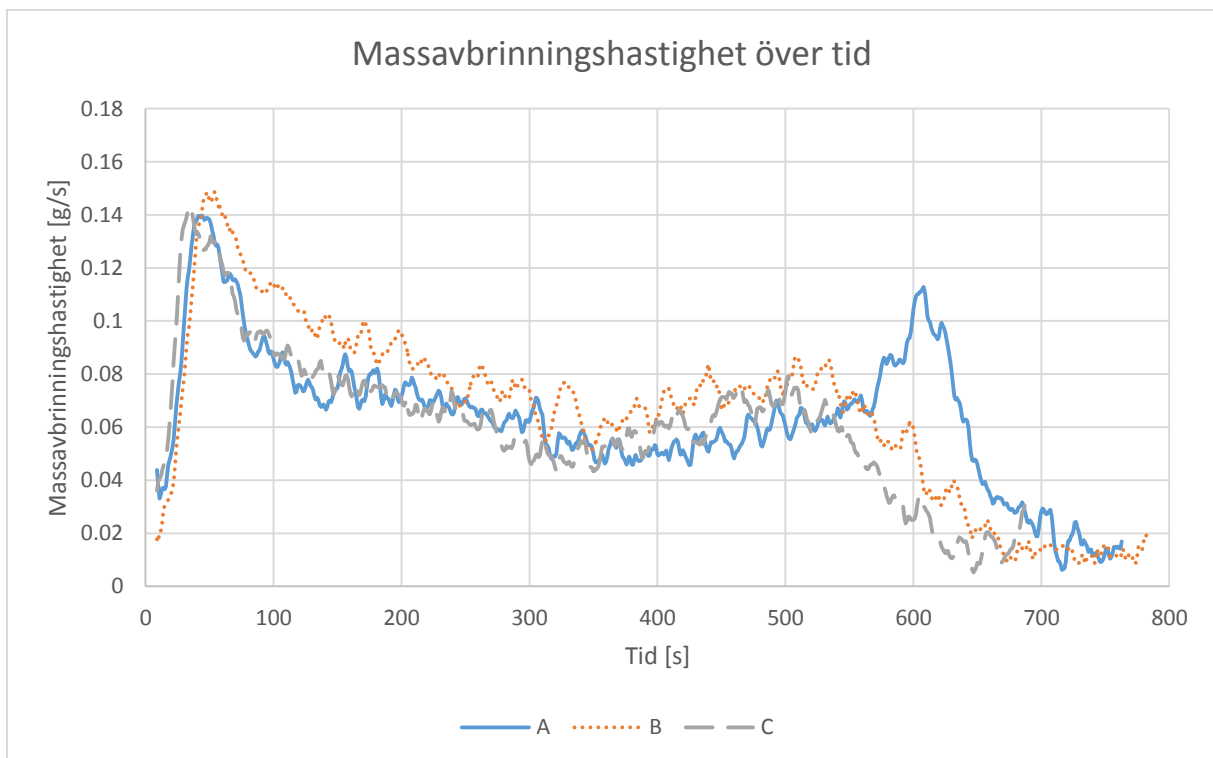
Här presenteras resultaten från försöksupställning 3. Försöksupställning 3 är samma som försöksupställning 2 men syrehalten i kammaren reduceras till cirka 15 %.



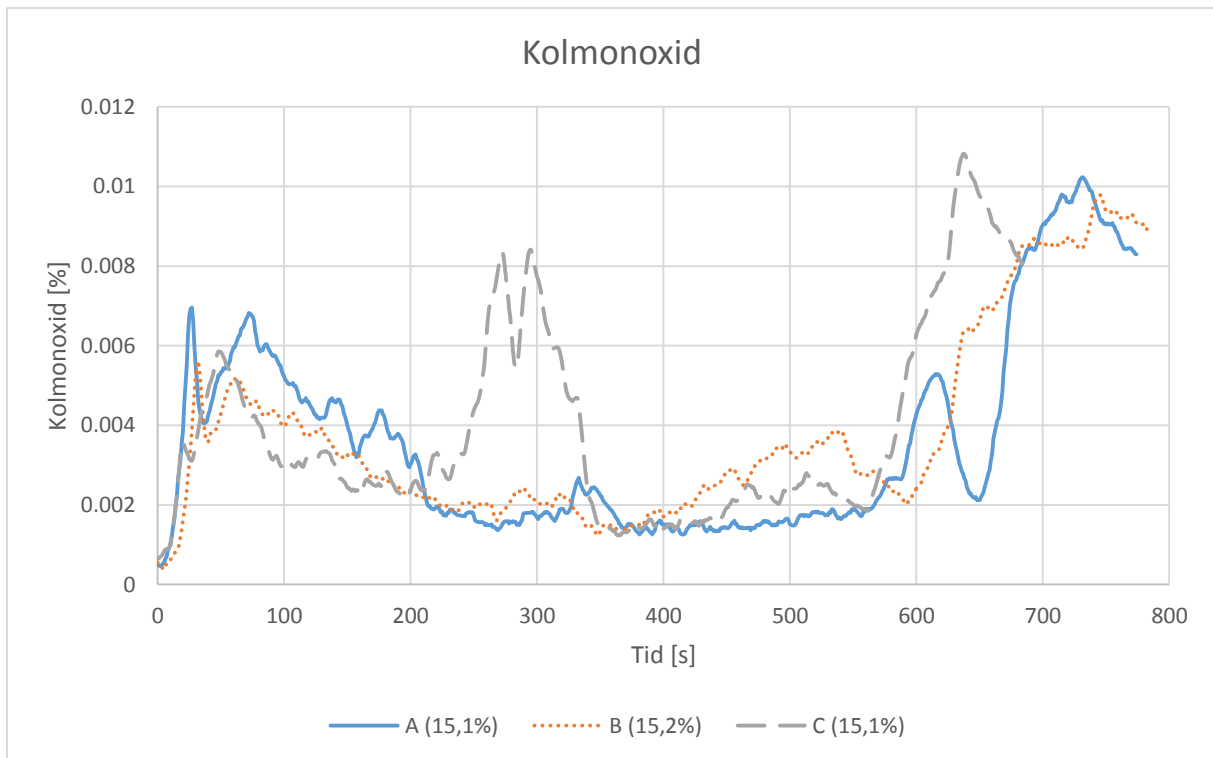
Figur 32. Effektutveckling per ytenhet vid försöksupställning 3.



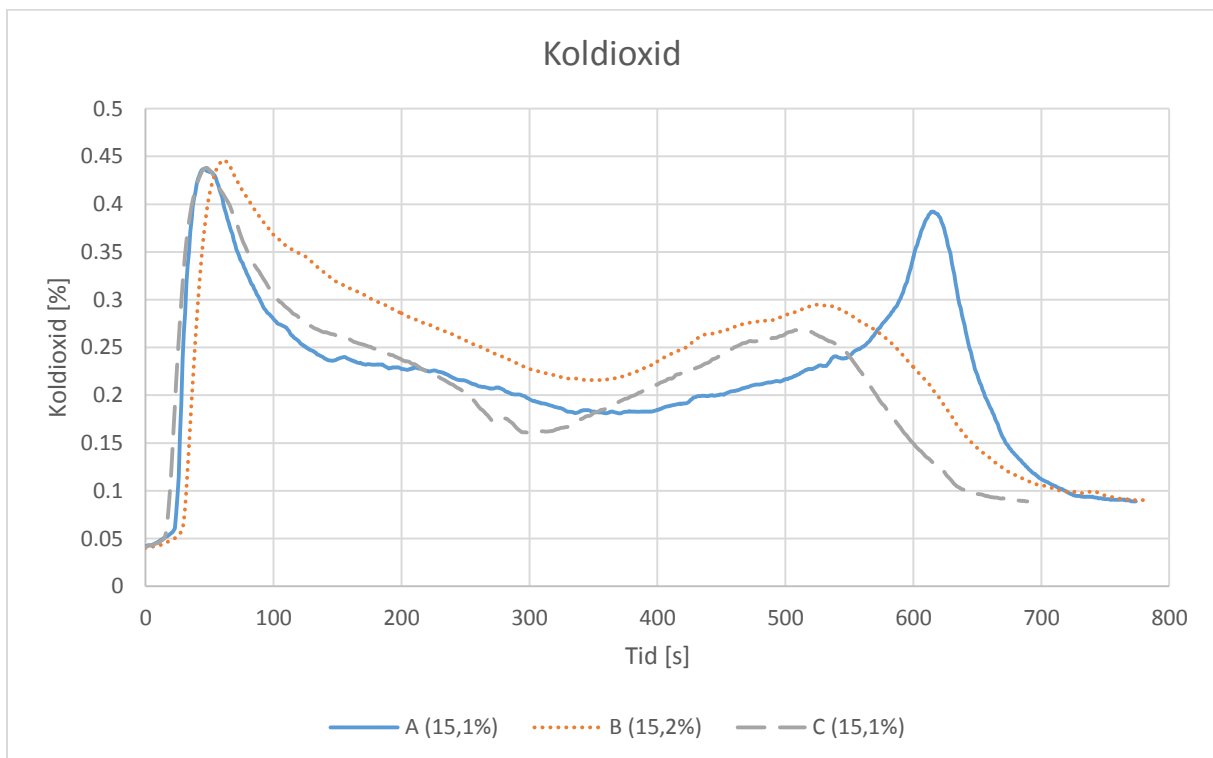
Figur 33. Massförlust vid försöksupställning 3.



Figur 34. Massavbrinningshastighet vid försöksupställning 3.



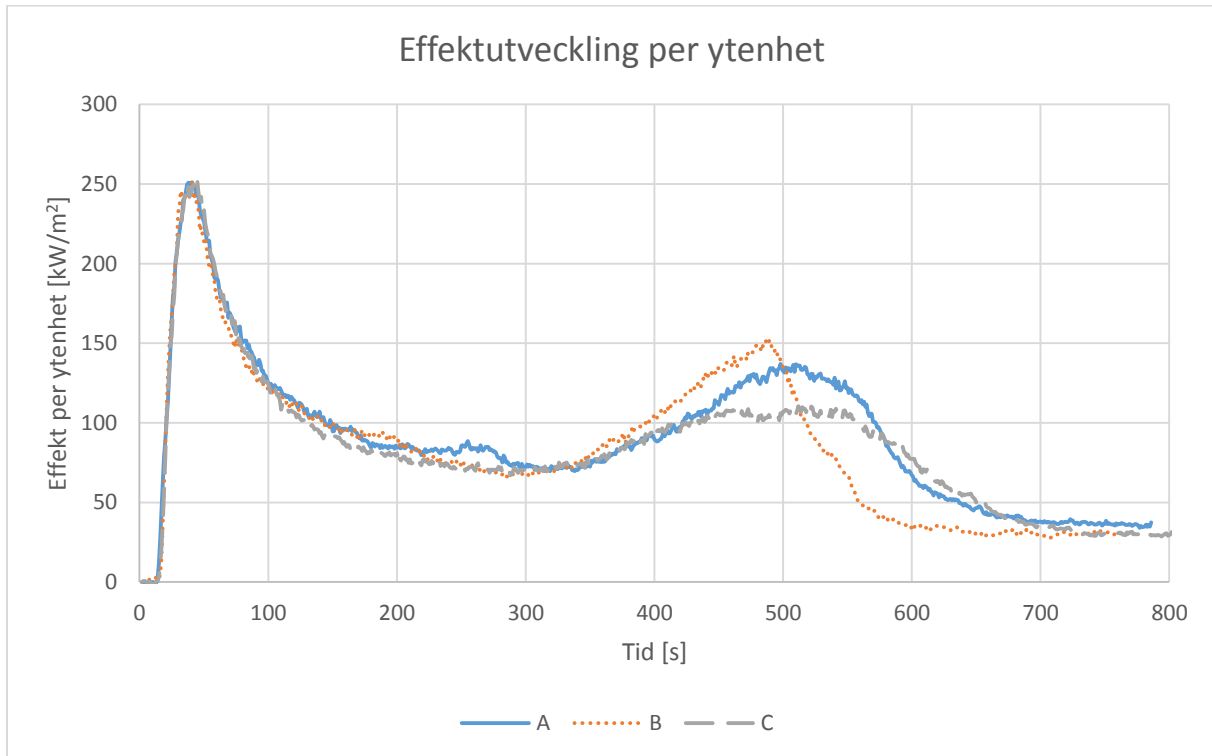
Figur 35. Kolmonoxidproduktion i försöksupställning 3.



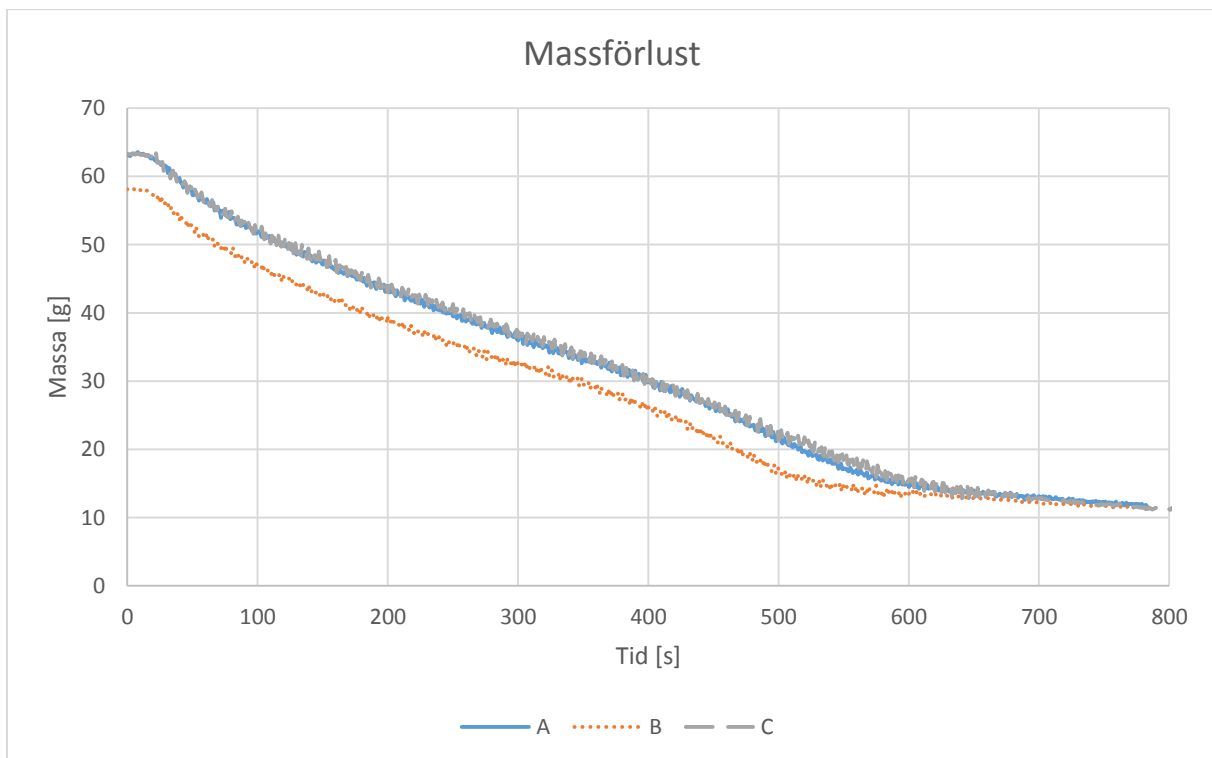
Figur 36. Koldioxidproduktion i försöksupställning 3.

Försökuppställning 4

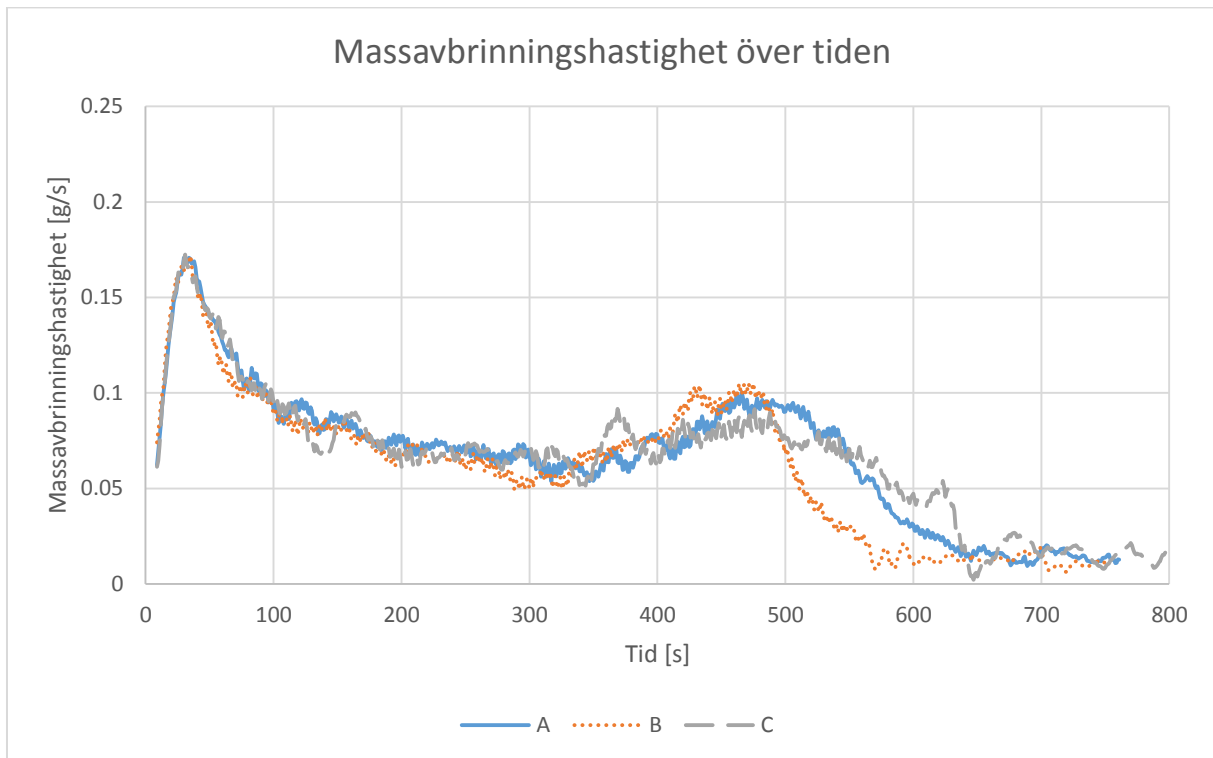
Här presenteras resultaten från försökuppställning 4. I försökuppställning 4 används en kammare som placeras under rökgashuven till konkalorimeter. Ovanpå denna placeras en 30 centimeter hög skorsten. Försök utförs vid normal atmosfär med en syrehalt på 20,95 %.



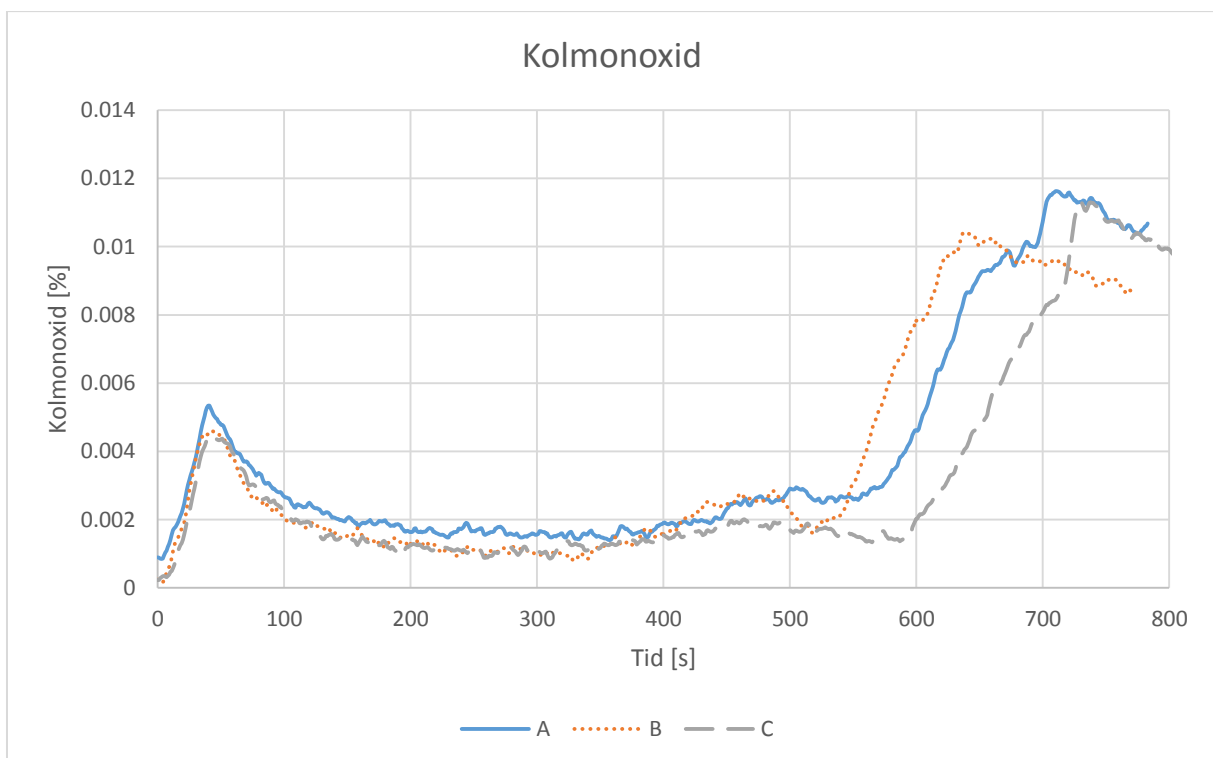
Figur 37. Effektutveckling per ytenhet vid försökuppställning 4.



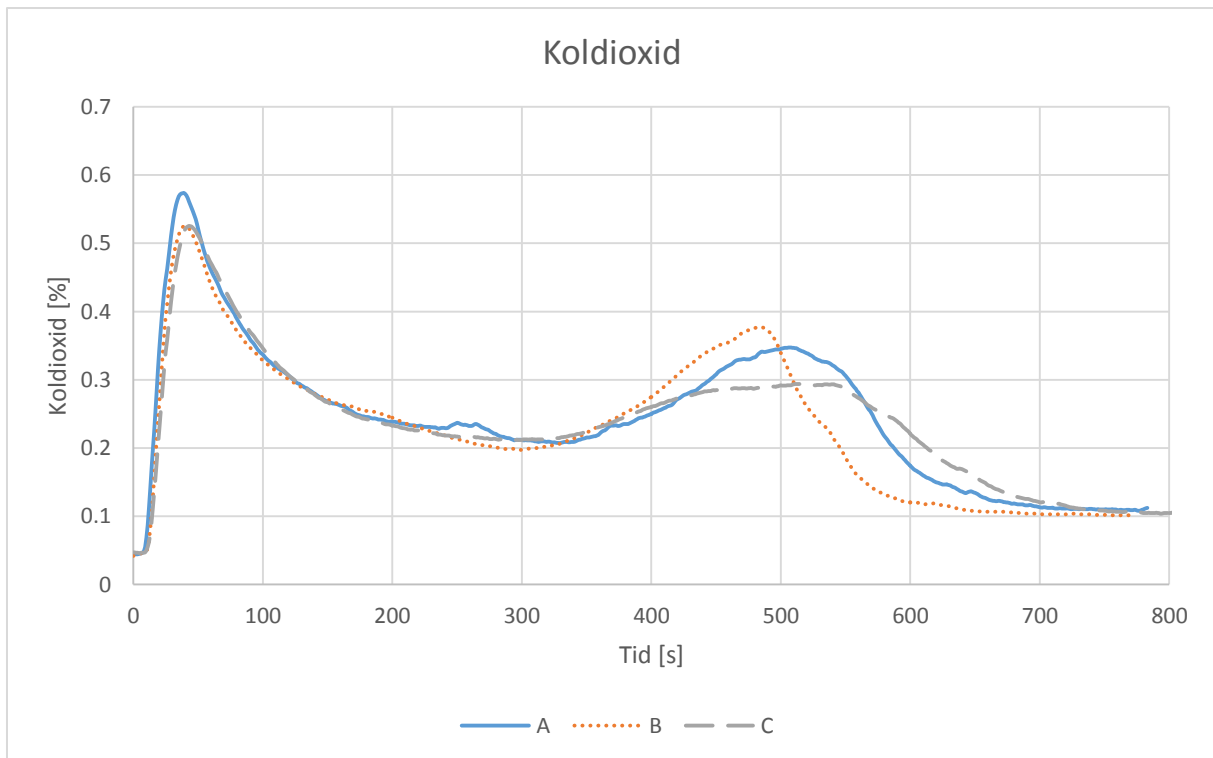
Figur 38. Massförlust över tid i försökuppställning 4.



Figur 39. Massavbrinningshastighet vid försöksupställning 4.



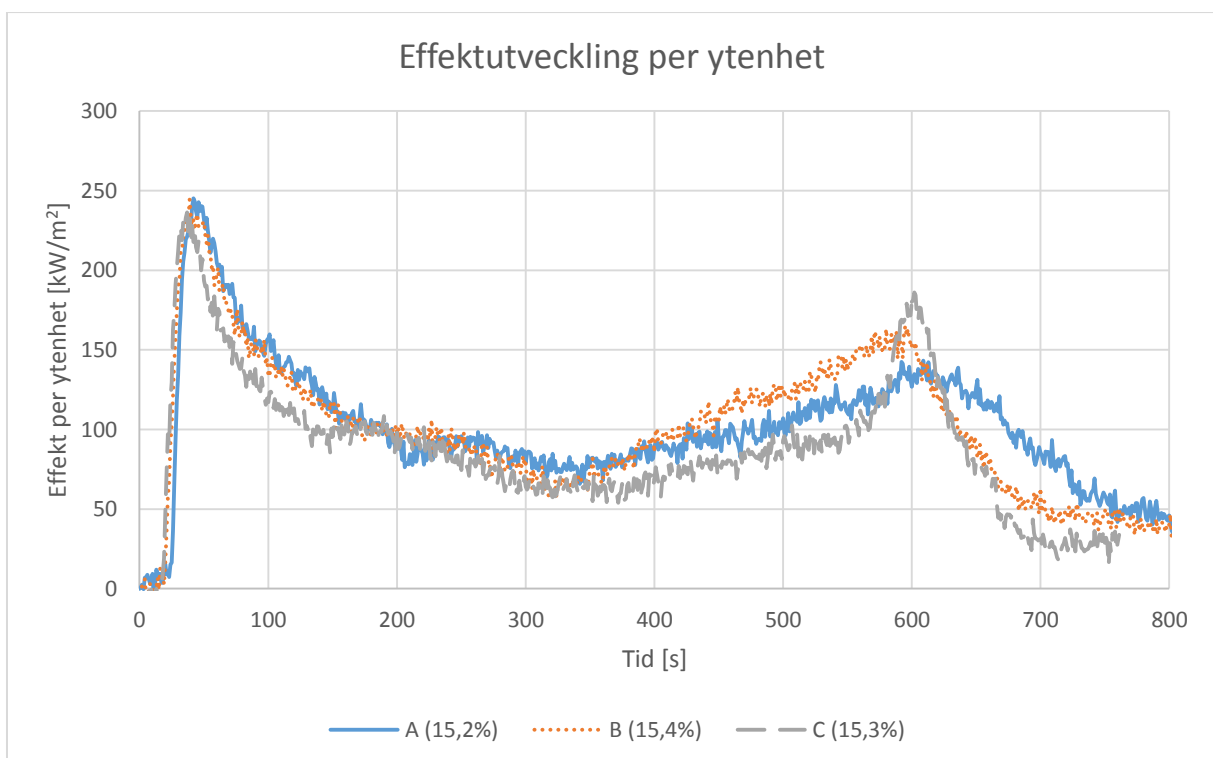
Figur 40. Kolmonoxidproduktion i försöksupställning 4.



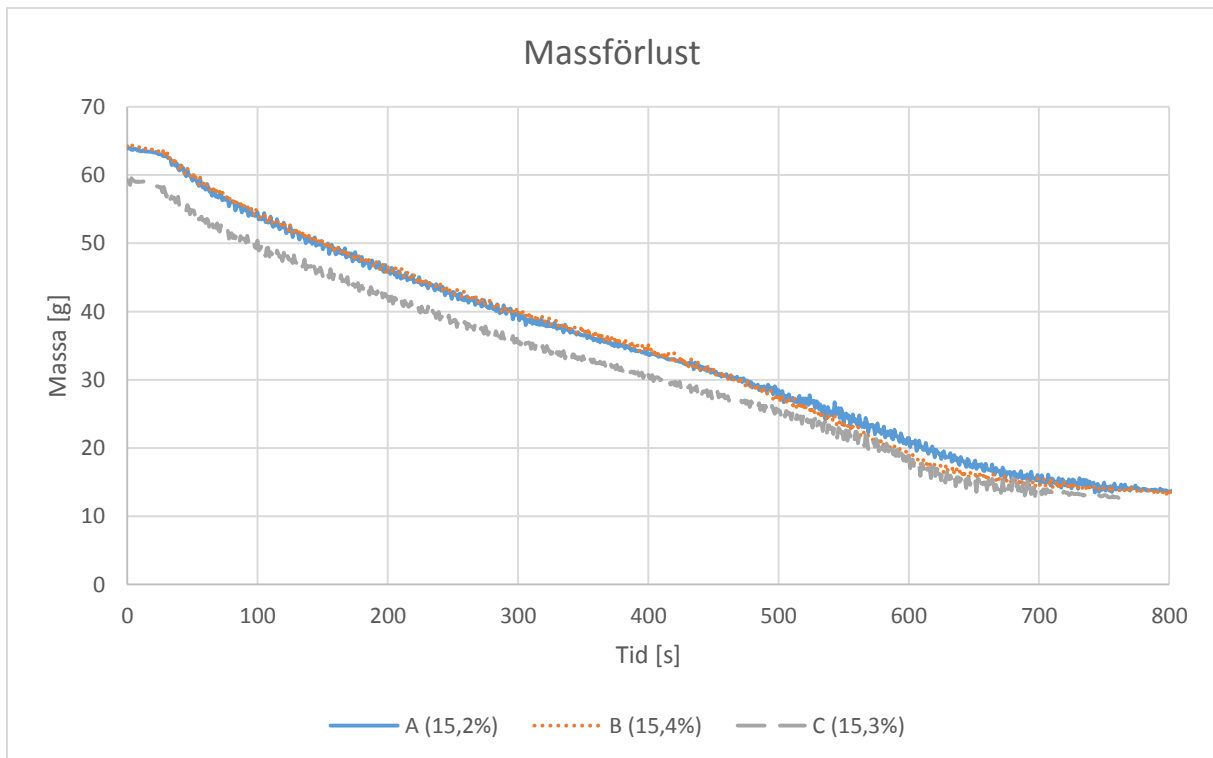
Figur 41. Koldioxidproduktion i försöksupställning 4.

Försöksupställning 5

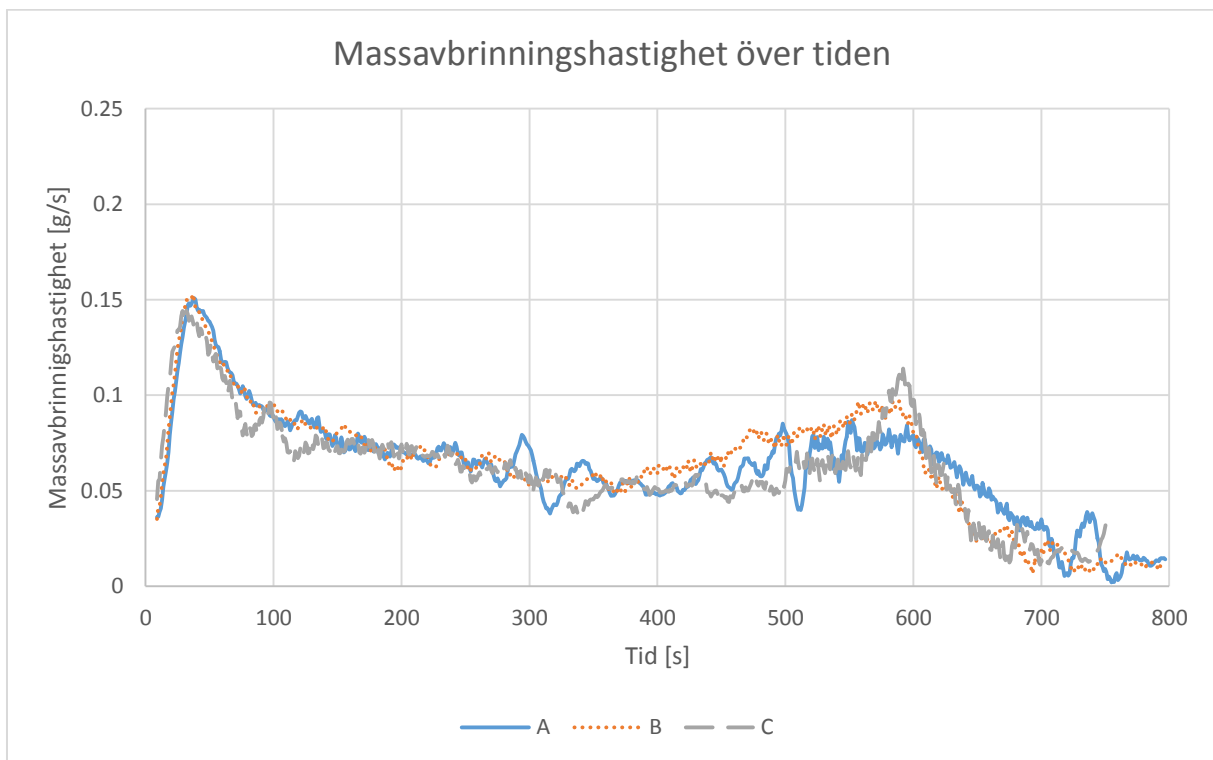
Försöksupställning 5 är samma som försöksupställning 4 men med en syrehalt på cirka 15 %.



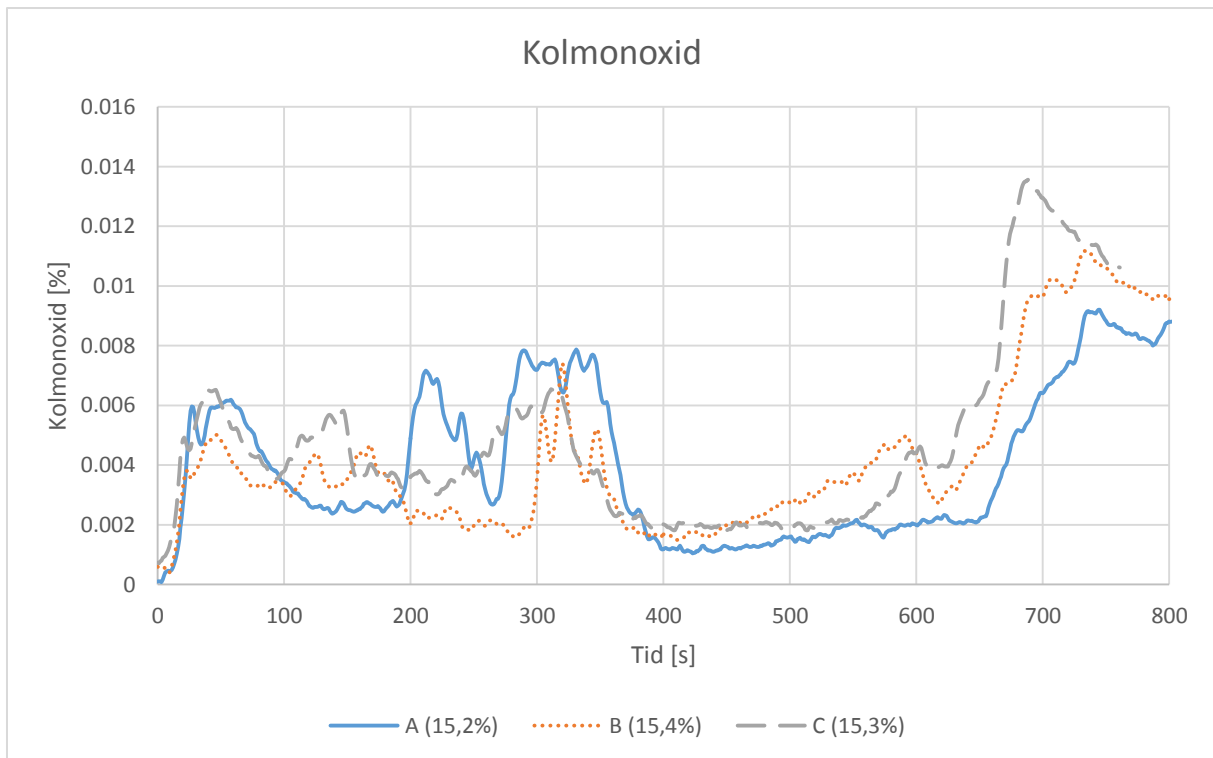
Figur 42. Effektutveckling per ytenhet vid försöksupställning 5.



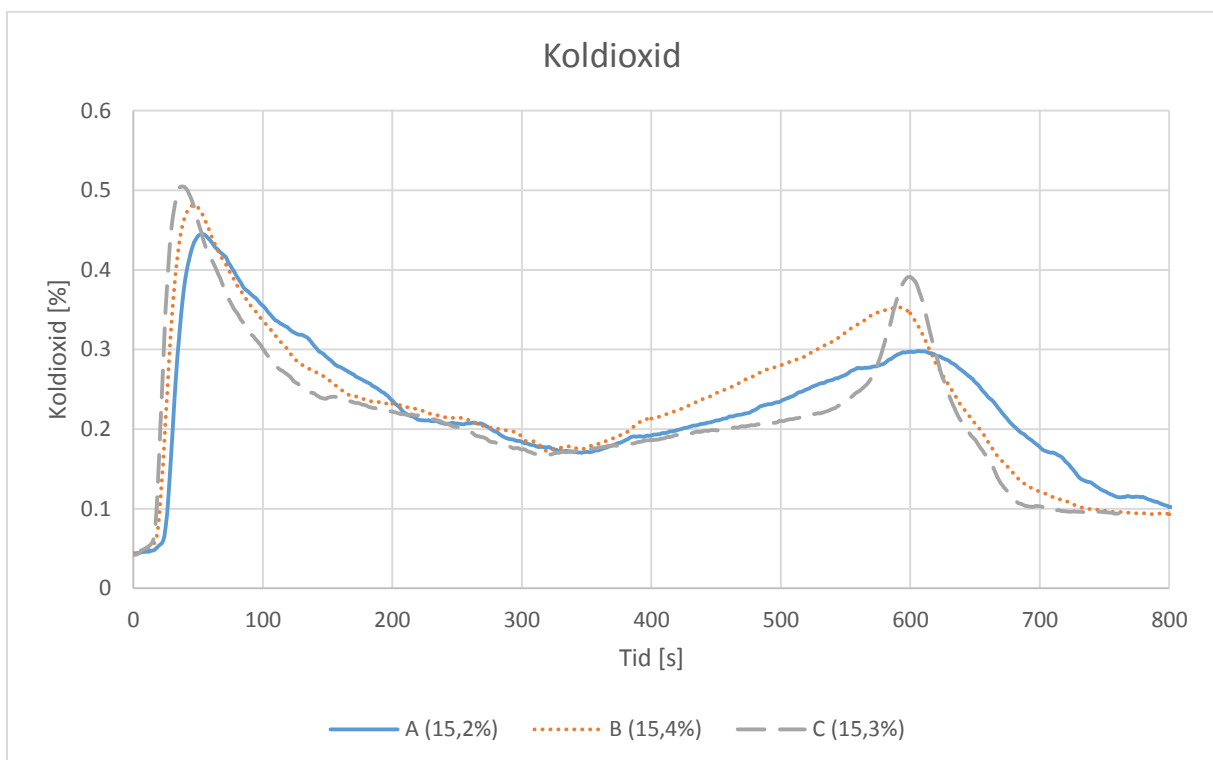
Figur 43. Massförlust över tid i försöksupställning 5.



Figur 44. Massavbrinningshastighet vid försöksupställning 5.



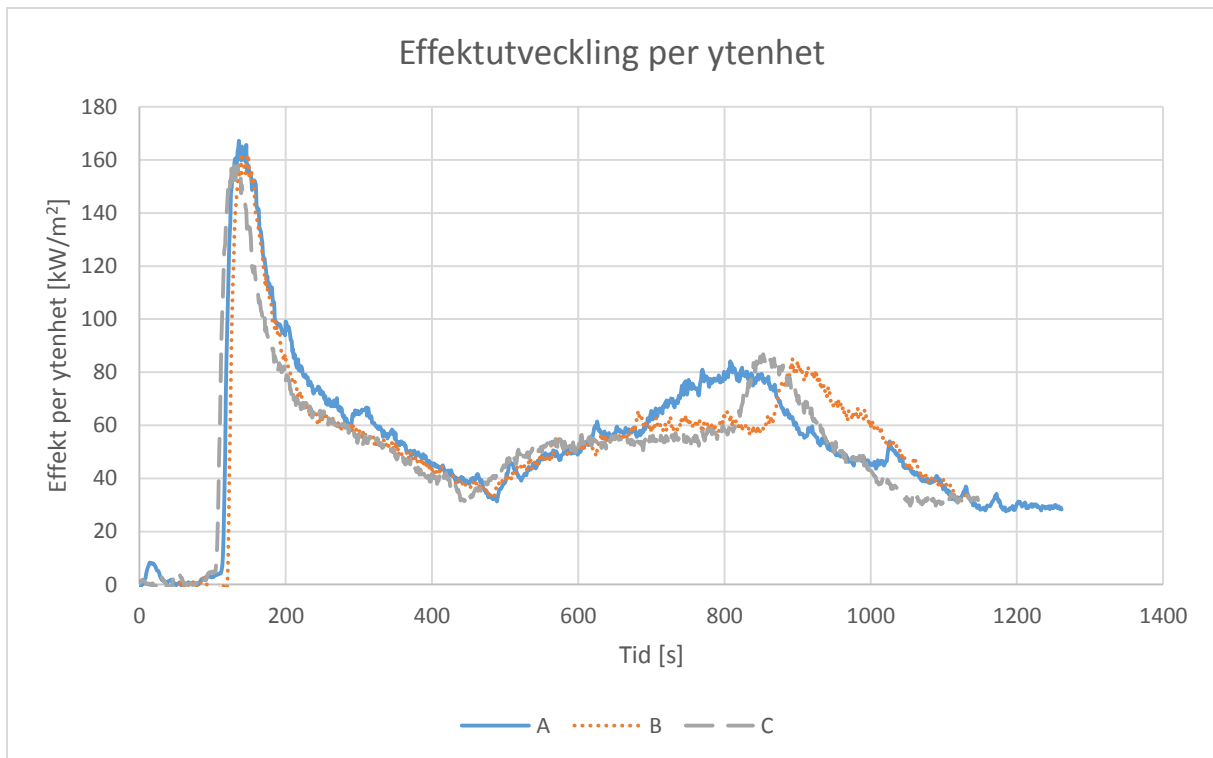
Figur 45. Kolmonoxidproduktion i försöksuppställning 5.



Figur 46. Koldioxidproduktion i försöksuppställning 5.

Försöksuppställning 6

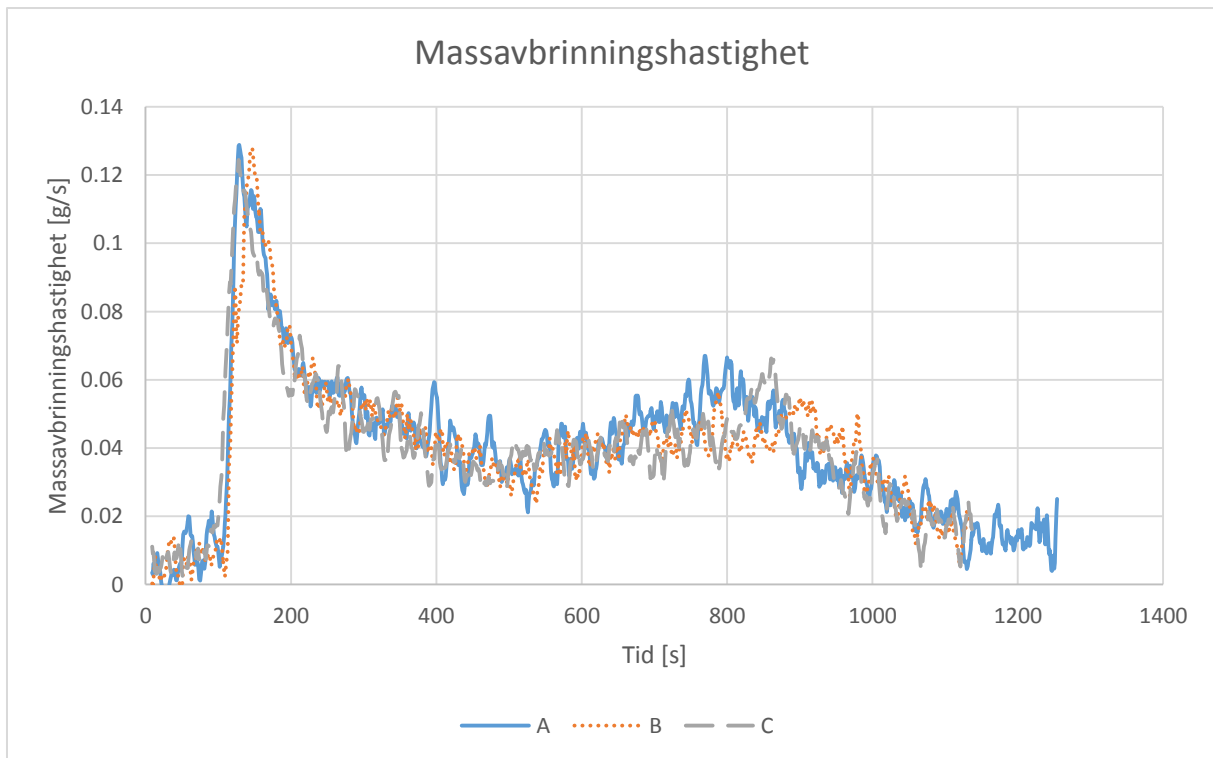
Här presenteras resultaten från försöksuppställning 6, det vill säga tester i konkalorimeterns standardutförande utan kammare under. Strålningsnivån på konen är 25 kW/m^2 .



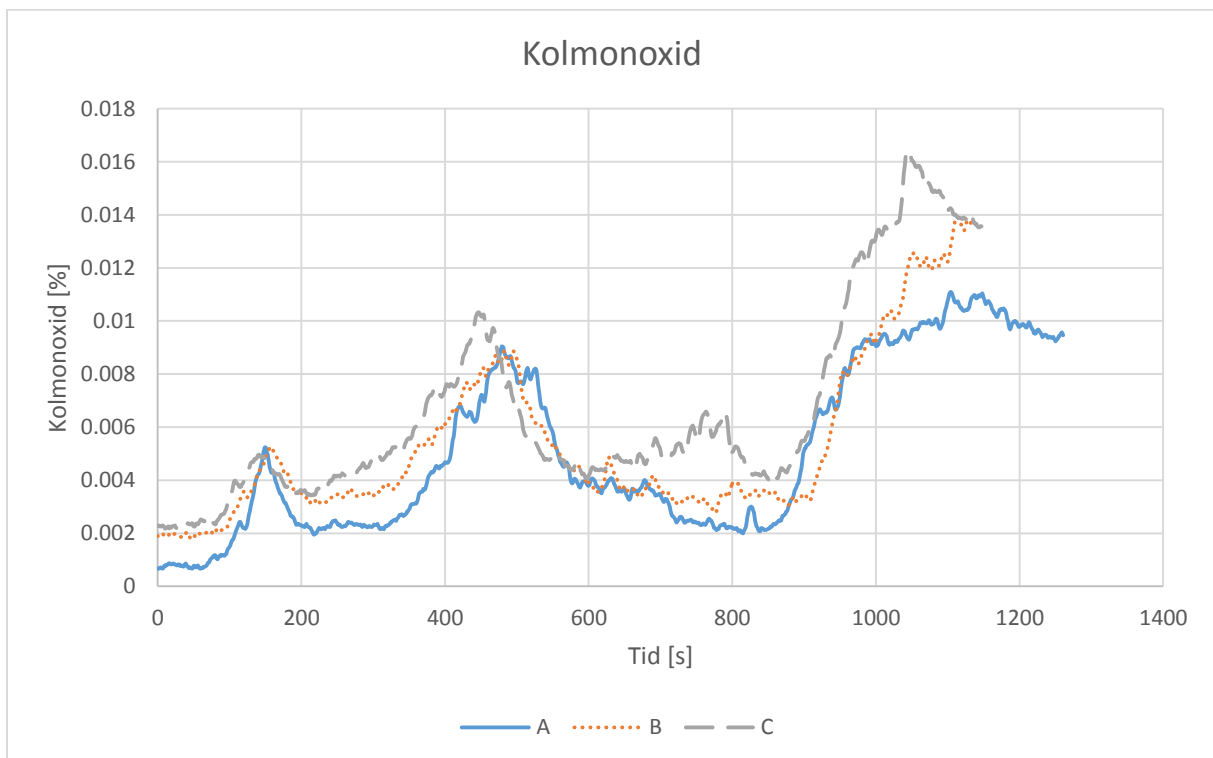
Figur 47. Effektutveckling per ytenhet vid försöksupställning 6.



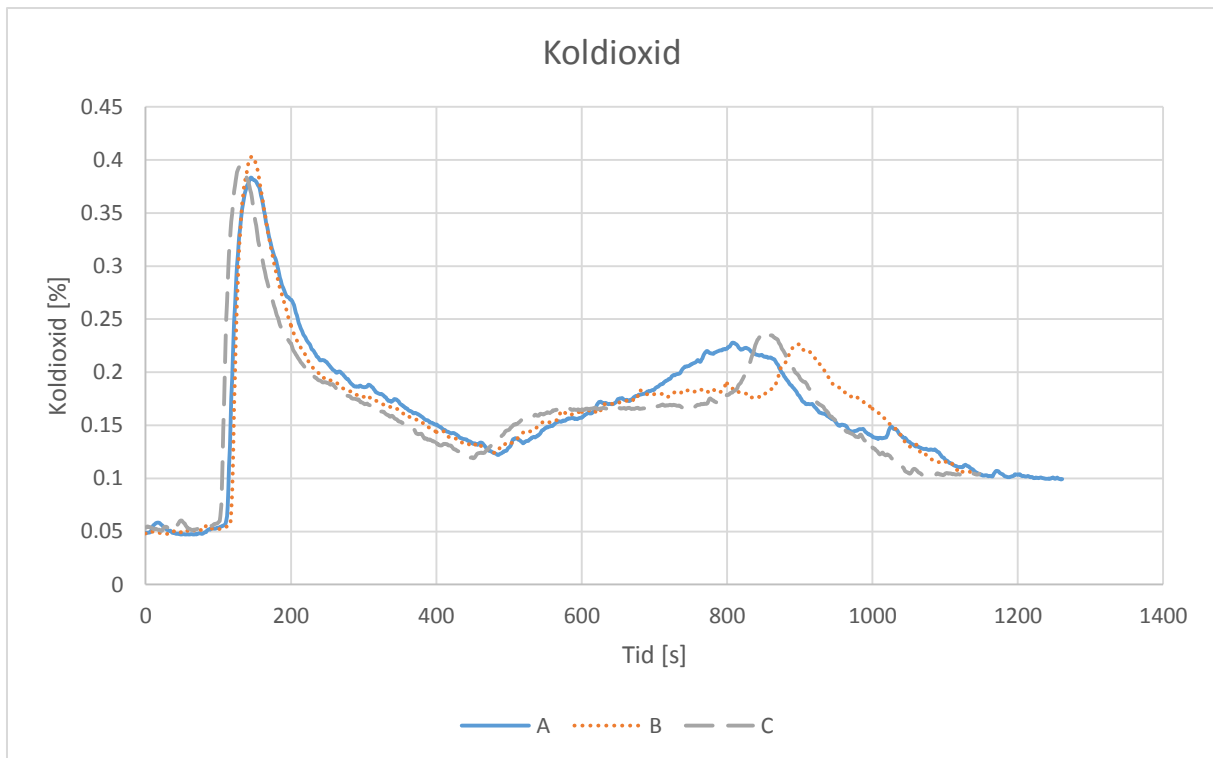
Figur 48. Massförlust i försöksupställning 6.



Figur 49. Massavbrinningshastighet i försöksupställning 6.



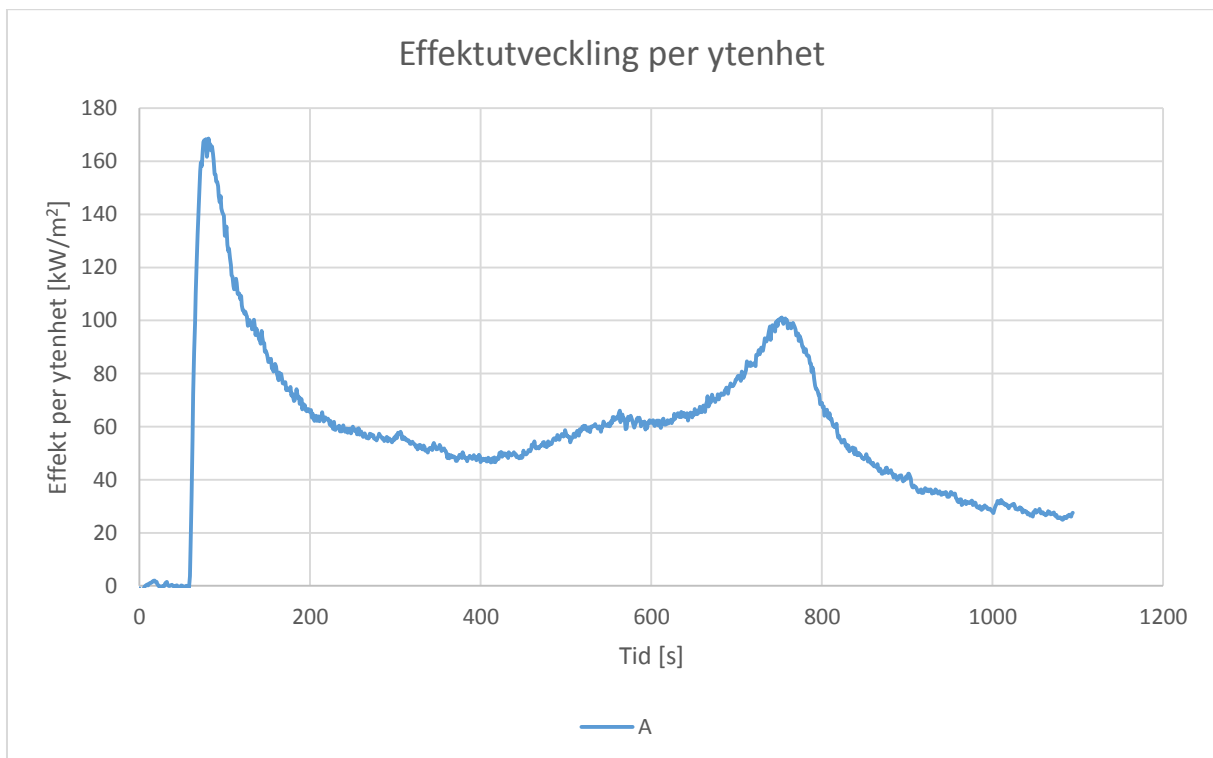
Figur 50. Kolmonoxidproduktion i försöksupställning 6.



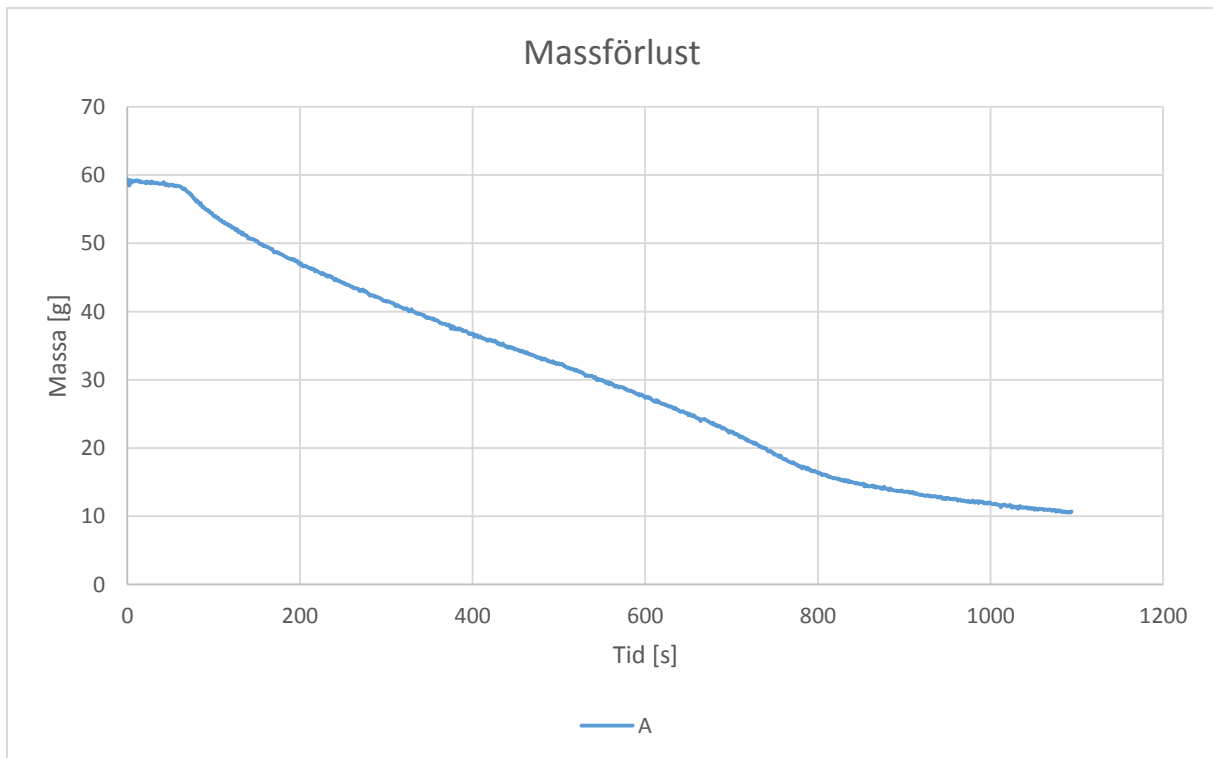
Figur 51. Koldioxidproduktion i försöksuppställning 6.

Försöksuppställning 7

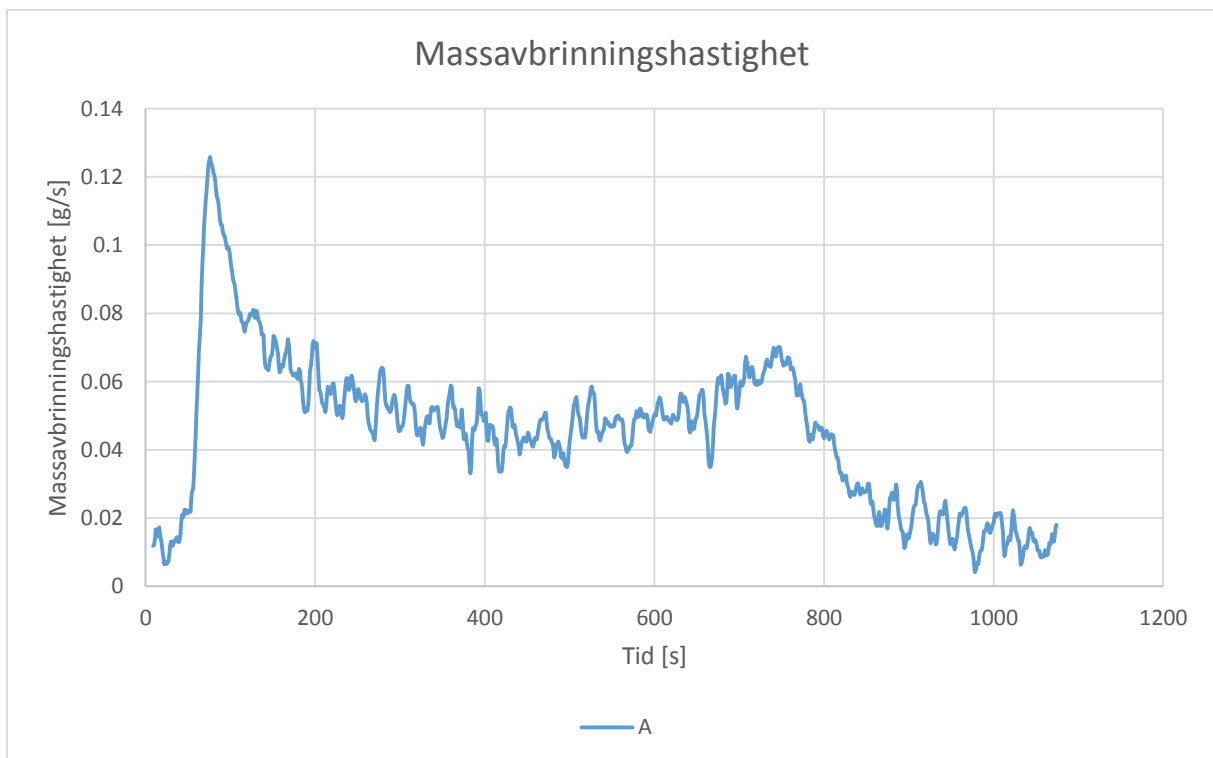
Här presenteras resultaten från försöksuppställning 7. I försöksuppställning 7 används en kammare som placeras under rökgashuven till konkalorimetern. Ovanpå denna placeras en 30 centimeter hög skorsten. Försök utförs vid normal atmosfär med en syrehalt på 20,95 %. Strålningsnivån på konen är 25 kW/m².



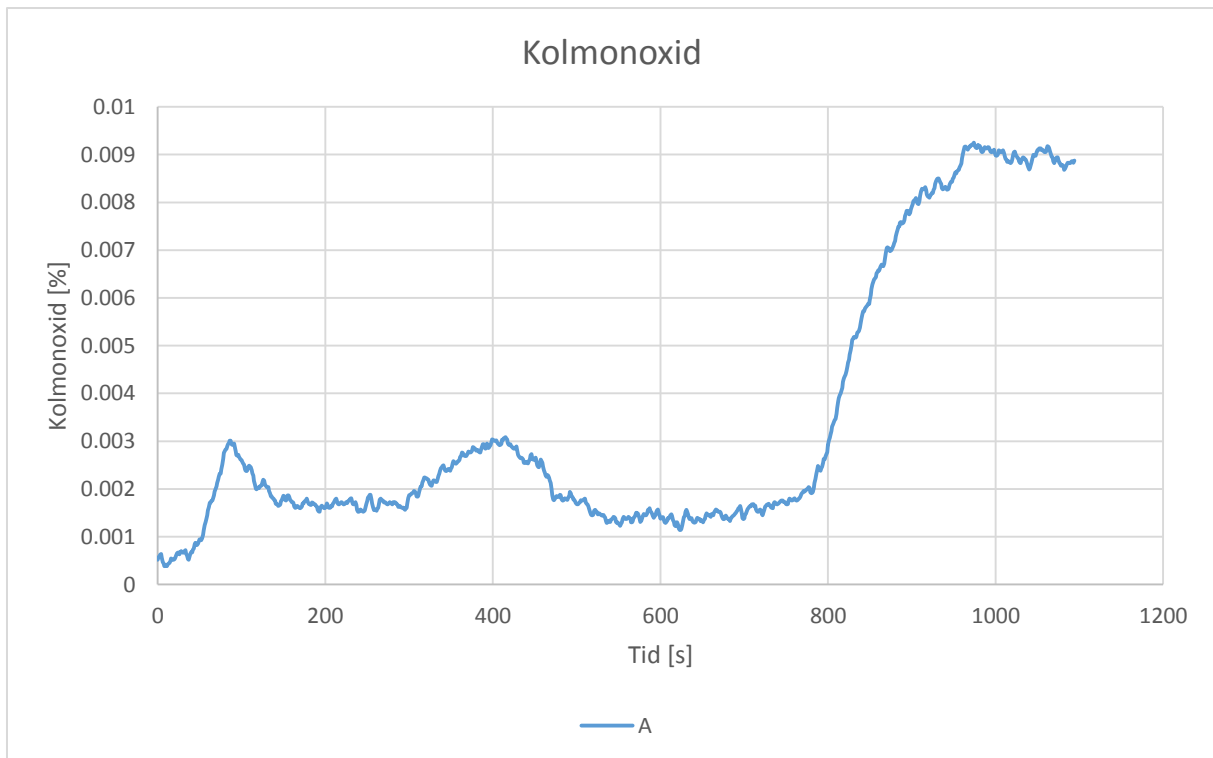
Figur 52. Effektutveckling per ytenhet vid försöksuppställning 7.



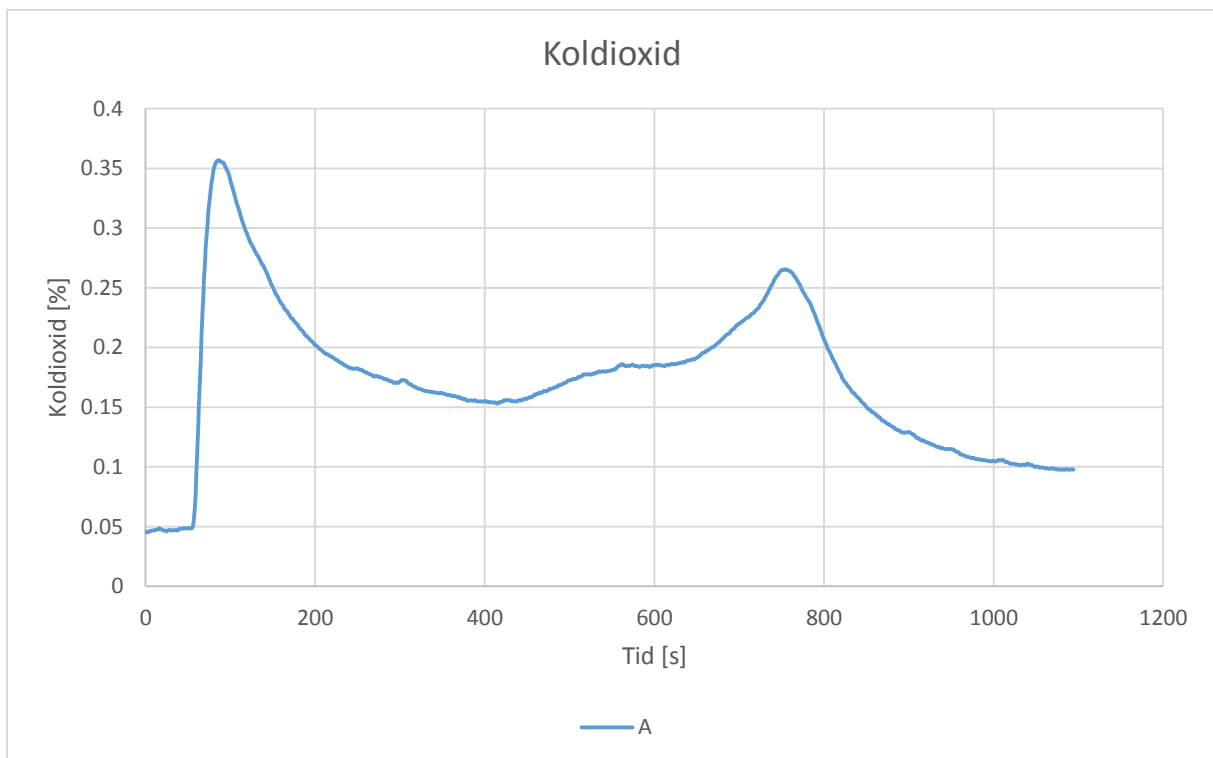
Figur 53. Massförlust i försöksupställning 7.



Figur 54. Massavbrinningshastighet i försöksupställning 7.



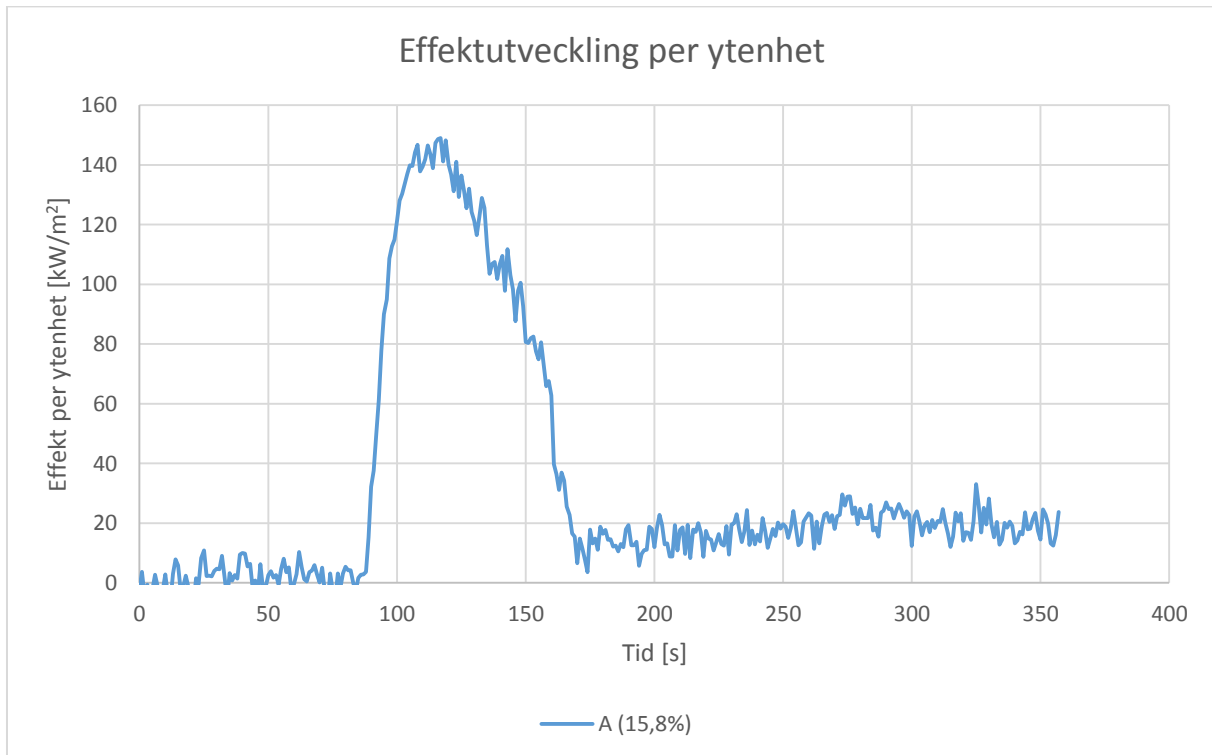
Figur 55. Kolmonoxidproduktion i försöksupställning 7.



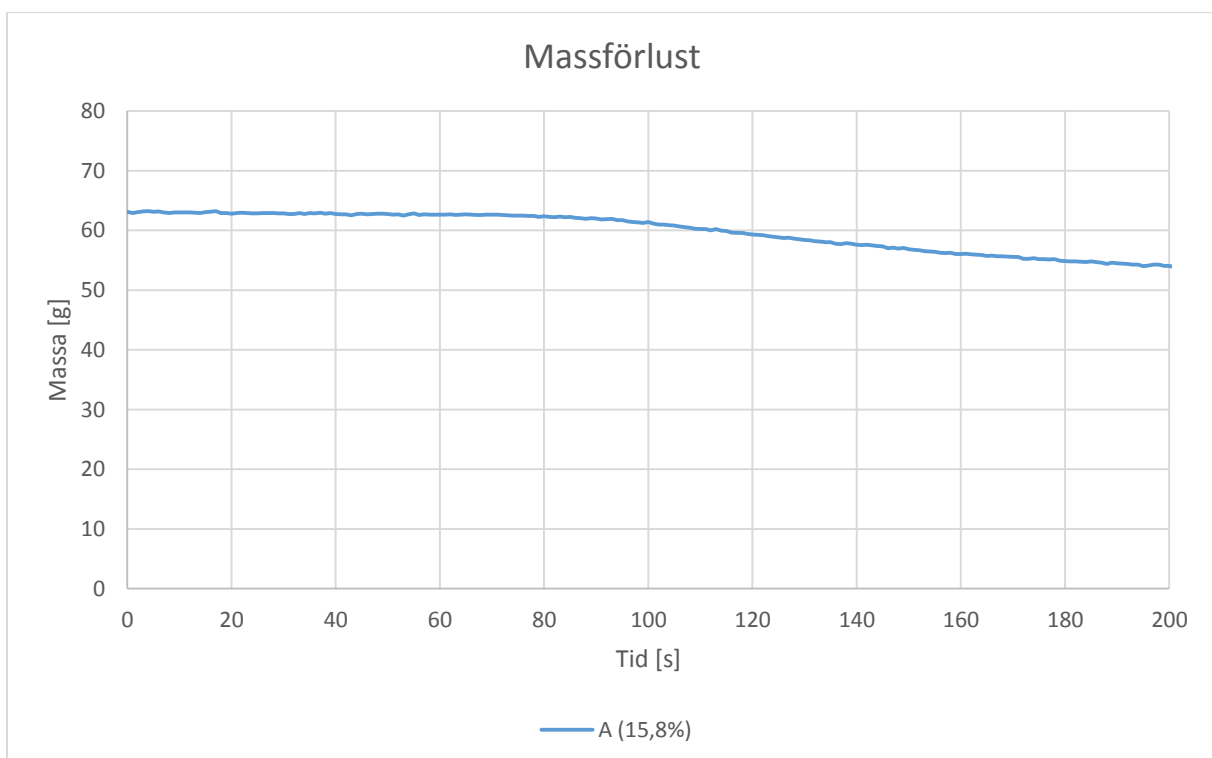
Figur 56. Koldioxidproduktion i försöksupställning 7.

Försöksuppställning 8

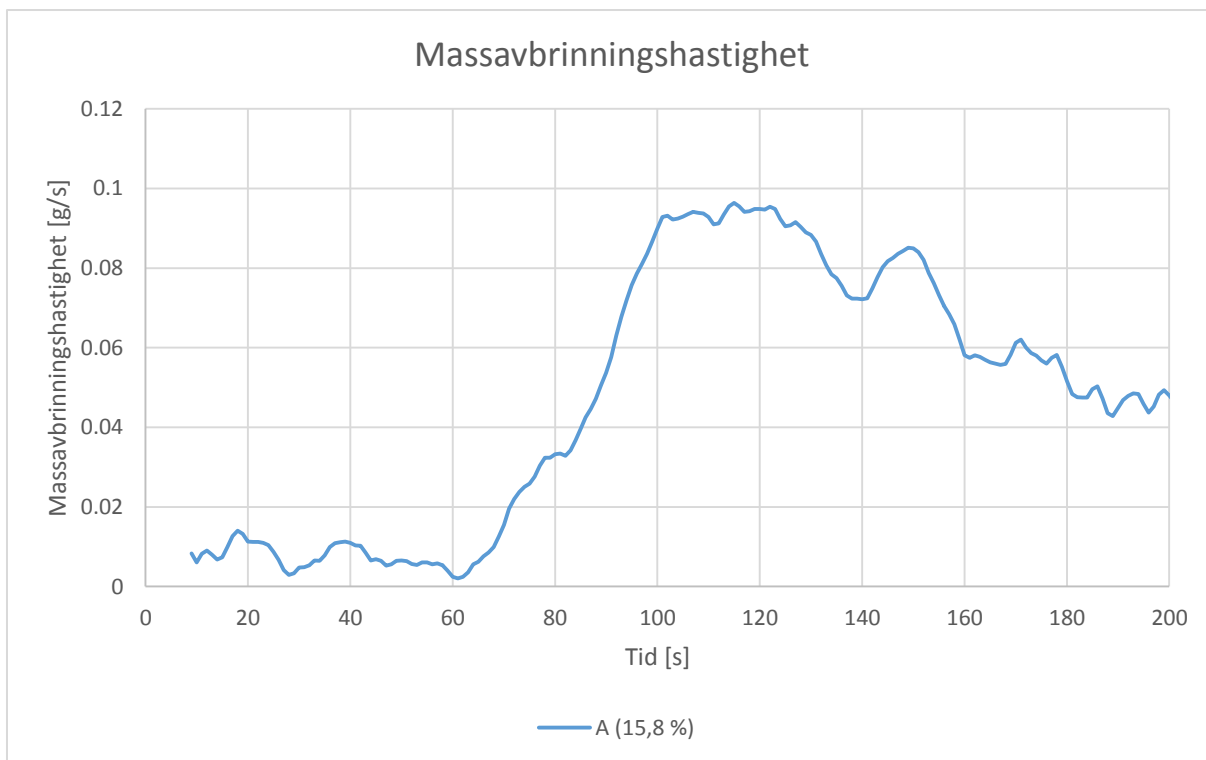
Här presenteras resultaten från försöksuppställning 8. Försöksuppställning 8 är samma som försöksuppställning 7 men vid en syrehalt på ca 15,8 %.



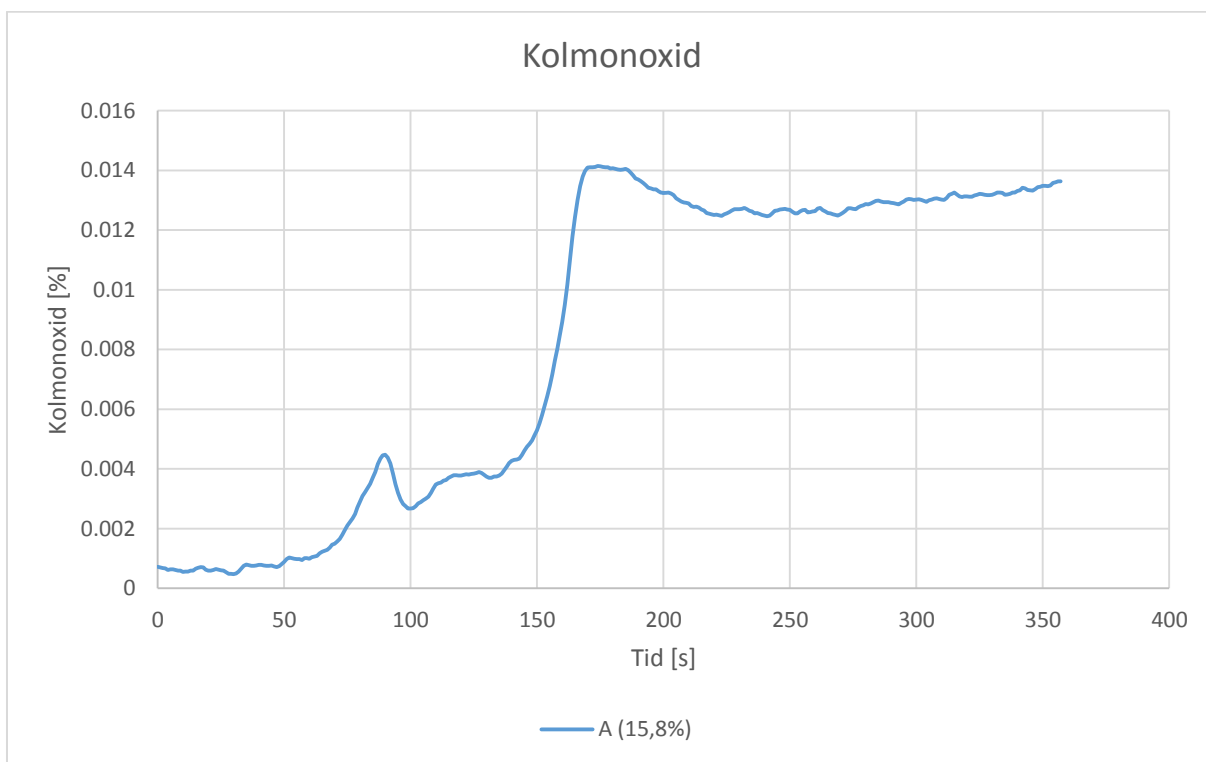
Figur 57. Effektutveckling per ytenhet vid försöksuppställning 8.



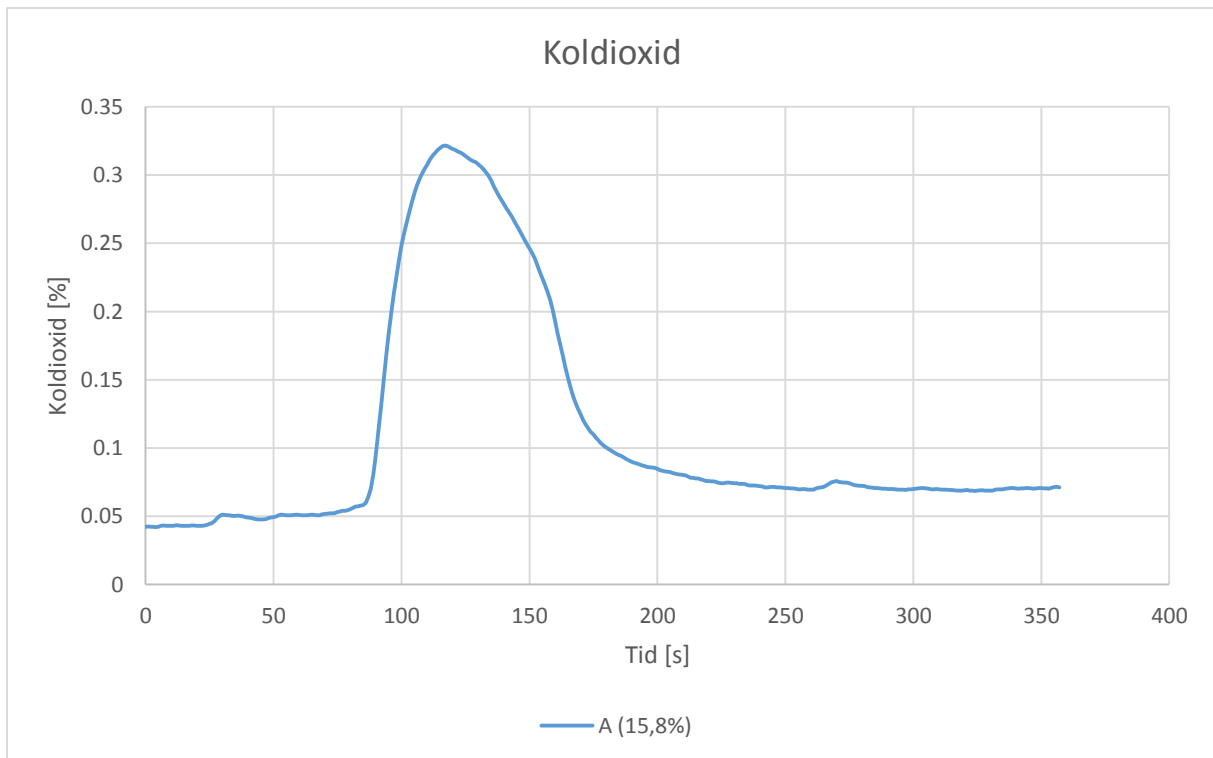
Figur 58. Massförlust i försöksuppställning 8.



Figur 59. Massavbrinningshastighet i försöksupställning 8.



Figur 60. Kolmonoxidproduktion i försöksupställning 8.



Figur 61. Koldioxidproduktion i försöksupställning 8.



LUNDS UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola