

Rökpartiklars storleks beroende av syrehalt

Karl Wendt Höjer | Avdelningen för Brandteknik

LTH | LUNDS UNIVERSITET



Rökpartiklars storleks beroende av syrehalt

Karl Wendt Höjer

Lund 2022

Rökpartiklars storleks beroende av syrehalt

Författare – Karl Wendt Höjer

Handledare – Patrick van Hees

Report 5679

ISRN: LUTVDG/TVBB--5679--SE

Antal sidor: 75

Sökord

Particle size – Hypoxic – CACC – Reducerad syrehalt – Cone calorimeter – Multi-wavelength light transmission measurements - Partikelstorlek

Abstract

Particle size can be an important variable to know in many different areas, be it smoke simulations, toxicity of materials or tests of face masks. Fires in a reduced oxygen environment can occur for ventilation-controlled fires or in areas with artificially lowered oxygen levels. The effects of lower concentrations of oxygen on heat release rate, smoke production etc. has been studied, but any effect these changes in the combustion process has on the smoke particle size is not well known.

In this report three different materials are studied at different oxygen levels: polyetene (unexpanded plastic), polystyrene (expanded plastic) and cardboard. They are burned at 21, 19, 17 and 15 % oxygen and the smoke particle size is measured with a DMS500 particulate analyzer. Three lasers of wavelength 735, 650 and 532 nm are also used to compare it as a possible future method of studying particle sizes.

The measurements with the DMS 500 showed that the particle diameters of polyetene decreased by approximately 4 nm per percent oxygen reduced from 21 from an initial size of around 200 nm, and polystyrene decreased by approximately 2-3 nm/percent oxygen from an initial size of around 240 nm.

Cardboard showed a big switch around 19-17 % oxygen, where the combustion went from flaming to smouldering. During flaming combustion the particle diameters were around 20 nm, and during smouldering around 50-60 nm. All experiments also trended towards a secondary type of particle sizes during the end of tests, the particle size in every experiment ended around 20-30 nm in diameter.

Measurements with the lasers did not yield good values for the diameters for any of the tests. Variations in the lasers were tested in a basic sensitivity analysis and could be the reason for the poor results. A code was developed where other combinations of lasers can be tested in the future, when more lasers or a wider span of wavelengths might be able to yield more accurate results.

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2022
Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2022.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

www.brand.lth.se
Telefon: 046 - 222 73 60

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

www.brand.lth.se
Telephone: +46 46 222 73 60

Erkännanden

Jag vill tacka min handledare Patrick van Hees för hjälp under detta arbete. Jag vill också rikta ett särskilt tack till Joakim Åström för stor hjälp under de experimentella delarna av arbetet, och till Avdelningen för Ergonomi och Aerosolteknik för lånet av deras DCM500 som var helt avgörande för att experimenten skulle kunna genomföras.

Sammanfattning

Storleken på rökpartiklar har en stor betydelse för flera av dess egenskaper, som tendens att fastna på ytor, giftighet (och därmed också miljöfara) och förmåga att tränga igenom olika typer av andningsskydd. För att kunna skapa bättre modeller för dessa typer av problem behövs en större förståelse för vilka faktorer som påverkar partikelstorleken. Den faktor denna rapport fokuserar på är reducerad syrehalt, som kan uppkomma till exempel vid ventilationskontrollerade bränder eller i syrereducerade miljöer.

Denna rapport syftar till att undersöka sambandet mellan reducerad syrenivå och partikelstorlek gällande ett antal utvalda ämnen. De valda ämnena är polystyren (expanderad plast), polyeten (oexpanderad plast) och kartong. Dessa är några av de standardiserade ämnena som testas vid olika typer av förbränningstest, vilket kan ge ett bra framtida underlag att jämföra andra experiment med.

Rapporten syftar dessutom till att testa att mäta partikelstorleken med lasrar i flera olika våglängder för en tidsberoende brand och undersöka under vilka förhållanden en sådan mätmetod kan anses som ett bra alternativ.

Experimenten utfördes i två serier om 21, 19, 17 och 15 % syre med en infallande strålning på 20 kW/m^2 , med extra experiment inlagda för polystyren vid 16 % och kartong vid 17 % och en högre infallande strålning på 30 kW/m^2 . Data samlades in med både lasrar med våglängd 532, 650 och 735 nm och med mätinstrumentet DMS500 som använder sig av elektrisk mobilitetsanalys för att bestämma partikelstorleken.

För mätningarna med laser vidareutvecklades också en kod som tidigare tagit ett medelvärde för transmission values för att med detta beräkna en medeldiameter för partiklarna till att i stället kontinuerligt beräkna detta för samtliga mätpunkter. Detta gjordes då proverna varierade för mycket i rök – och effektutveckling för att de medelvärden som använts i tidigare iterationer skulle vara acceptabla.

Experimenten med DMS500 visar att polyeten avgav en partikeldiameter med ett medelvärde på runt 200 nm vid 21 % syre, som minskade med ca 4 nm per procent syre reducerat från 21 %. Polystyren avgav en partikelstorlek på runt 240 nm och minskade med runt 2 nm/procent. Kartong avgav partiklar runt 20 nm i diameter under flammande förbränning, mellan 21 och 19-17 % syre, och sjönk till runt 60 nm vid glödande förbränning som skedde vid lägre syrehalter. Vid alla experiment för alla ämnen minskade storleken på partiklarna i slutet av förbränningen ned till runt 20-30 nm, vilket gav en totalt sätt bimodal fördelning för hela förloppet.

Lasermätningarna visade sig vara för varierande för att få ut några acceptabla värden på partikelstorlekarna. En känslighetsanalys gjordes i efterhand som visade att med de variationer som uppmättes i lasrarna under experimenten kunde samma indata variera mellan 30 och 900 nm. Lasrarna kunde dock inte ens mäta de minsta partiklarna under experimentet (mindre än 100 nm), vilket kan tyda på en lägre gräns för dess användbarhet även med stabilare mätvärden.

Ett antal förslag på vidare forskning, både kopplat till partikelstorlekarna vid reducerad syremiljö och mätning med laser, har tagits fram. För partikelstorlekarna föreslås vidare forskning som fokuserar på andra ämnen, större provkroppar eller mer detaljerad analys av partiklarna som bildas vid de olika stadierna av förbränningen. För mätning med laser föreslås teoretiska tester med hjälp av den framtagna matlabkoden om hur stora variationer som kan accepteras vid olika uppsättningar lasrar (varierade antal och våglängder) följt av experiment med den nya uppsättningen. Experiment vid steady-state skulle också kunna göras där medelvärden skulle kunna gå att använda med bättre säkerhet.

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte och Mål	1
1.3	Frågeställningar.....	1
1.4	Avgränsningar	2
1.5	Begränsningar	2
2	Litteratur och Teori	3
2.1	Översikt över Mätmetoder	3
2.1.1	Elektriska Mätmetoder	3
2.1.2	Optiska mätmetoder.....	4
2.1.3	Val av mätmetod.....	4
2.2	Tidigare forskning kring partikelstorlekar	5
2.3	Konkalorimeter	6
2.3.1	Konkalorimeterns uppställning.....	6
2.3.2	Beräkning av effektutveckling.....	8
3	Genomförande.....	9
3.1	Val av material, testförutsättningar och begränsningar	9
3.2	Praktiskt utförande av experiment	11
3.3	Behandling av data från DMS500	12
3.4	Behandling av data från mätningar med laser.....	12
3.5	Känslighetsanalys av mätningar från laser.....	13
4	Resultat DMS500.....	14
4.1	Polyeten	15
4.1.1	Allmänna observationer.....	15
4.1.2	Partikelstorleksfördelning.....	15
4.1.3	Effektutveckling (HRR)	17
4.1.4	Analys Polyeten.....	18
4.2	Polystyren	19
4.2.1	Allmänna observationer.....	19
4.2.2	Partikelstorleksfördelning.....	19
4.2.3	Effektutveckling (HRR)	21
4.2.4	Analys Polystyren	21
4.3	Kartong.....	22
4.3.1	Allmänna observationer.....	22
4.3.2	Partikelstorleksfördelning.....	22
4.3.3	Effektutveckling (HRR)	25
4.3.4	Analys Kartong	25

5	Resultat mätningar med laser.....	26
5.1	Analys mätningar med laser.....	27
5.2	Känslighetsanalys av lasermätning	29
6	Diskussion	30
6.1	Partikelstorlek	30
6.2	Felkällor DMS500	31
6.3	Lasermätning.....	32
7	Möjliga framtida projekt	33
8	Slutsats	33
9	Referenser	34

Lista över bilagor:

Bilaga 1: Alla mätningar med DMS500 från alla experiment

Bilaga 2: Alla mätningar med lasrar från alla experiment

Bilaga 3: Effektutvecklingskurvorna från alla experiment

Bilaga 4: Matlabkoden som användes för att beräkna partikelstorleken med hjälp av lasrarna

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Partikelstorleken vid rökutveckling kan vara viktig att veta i flera situationer. Avancerade simulationer av rökspridning i FDS (Fire Dynamics Simulator) tar till exempel hänsyn till hur mycket partiklar som stannar på väggar och tak, och partikelstorlek är en mycket viktig faktor för detta (Floyd, Overholt, & Ezeoye, 2014). Partikelstorleken kan också vara avgörande för hur giftiga partiklarna blir (Gorbunov, Priest, Muir, Jackson, & Gnewuch, 2009) och kan påverka hur bra masker och andra skydd mot partiklar fungerar (He, Reponen, McKay, & Grinshpun, 2013).

Förbränning vid lägre syrehalt kan uppkomma vid ventilationskontrollerade bränder eller vid bränder vid redan syrereducerade miljöer (Nilsson & Hersner, 2021). En reducerad syrehalt påverkar en brand på flera olika sätt. Effekttutvecklingen går ned och produktionen av bland annat sot och kolmonoxid ökar (Nilsson & van Hees, 2013). Effekten dessa förändringar i förbränningsprocessen kan ha på partikelstorleken är dock dåligt förstådd.

Mätningar av partikelstorlekar kan ske på ett antal olika sätt. Några exempel på mätmetoder är mätningar med laser, andra optiska metoder eller elektrisk mobilitetsanalys (Wilkens Flecknoe-Brown & van Hees, 2015). Cashdollar et.al visade att laser går att använda för att få fram partikelstorlekar under stabilt brinnande förhållanden, och Konrad Wilkens och Patrick van Hees vidareutvecklade en metod för att med datorkraft optimera beräkningsgången (Cashdollar, Lee, & Singer, 1979) (Wilkens Flecknoe-Brown & van Hees, 2015). Dessa beräkningar använder ett medelvärde från lasrarnas mätningar och är därför mest lämpade för förbränning i "steady-state" där mätningarna inte förändras snabbt.

1.2 Syfte och Mål

Denna rapport har två olika syften. Det första syftet är att undersöka hur en reducerad syrenivå kan påverka partikelstorleken av de skapade rökpartiklarna. Det andra syftet är att jämföra två olika mätmetoder för partikelstorleksfördelning, elektrisk mobilitetsanalys med hjälp av en DMS500 och mätning med tre lasrar.

Ett av målen med rapporten är att genom experiment på olika material vid olika syrehalter undersöka hur partikelstorleken förändras samt eventuella kopplingar till effekttutveckling eller typ av material.

Ett annat mål är att undersöka om mätningar med laser kan användas tillförlitligt för att mäta partikelstorleken som bildas vid en förbränning som inte sker i ett steady-state.

1.3 Frågeställningar

Följande frågeställningar ska besvaras i denna rapport:

- Hur påverkas partikelstorleken vid förbränning av en reducerad syrenivå?
- Hur skiljer sig partikelstorleken åt vid förbränning av olika ämnen?
- Hur kan mätningar med lasrar i olika våglängder användas för att mäta partikelstorlek för en förbränning som förändras med tiden?
- Vilka möjliga framtida projekt skulle behövas för att utveckla resultatet i denna rapport?

1.4 Avgränsningar

Följande avgränsningar har gjorts i rapporten. Argument för dessa presenteras i avsnitt 3 "Genomförande" nedan.

- Endast partiklarnas storlek har studerats, inte deras uppbyggnad, mängd eller andra egenskaper.
- Teoretiska beräkningar och känslighetsanalys för lasrar har endast genomförts för de våglängder på lasrarna som användes i experimentet och inte för möjliga framtida kombinationer.
- Endast intervall mellan 15 och 21 % syre har undersökts.
- Endast småskaliga försök har genomförts.

1.5 Begränsningar

Följande begränsningar har gjorts i rapporten. Argument för dessa presenteras i avsnitt 3 "Genomförande" nedan.

- Varje prov har testats på syrenivåer 21, 19, 17 och 15 % om någon speciell anledning inte har funnits för att testa på någon mellanliggande nivå.
- Varje prov genomfördes bara två gånger, med vissa som bara genomfördes en.
- Bara två mätinstrument, DMS500 och lasrar, har använts.
- Endast tre ämnen har undersökts, polystyren, polyeten och kartong.

2 Litteratur och Teori

I detta avsnitt presenteras litteraturstudier och bakgrundsinformation som behövs för att sätta denna rapport i ett sammanhang. Först presenteras olika typer av mätmetoder som finns för att mäta partikelstorlekar och de som valts för dessa experiment motiveras. Sedan görs en översikt över tidigare experiment som kan användas för att tolka resultaten i denna rapport. Till sist presenteras konkalorimetern och teori som behövs för att kunna använda den.

2.1 Översikt över Mätmetoder

Det finns många olika sätt att mäta partikelstorlekar med olika för- och nackdelar. Ett urval av metoder som har används i tidigare relevant forskning presenteras här. Listan är inte komplett men täcker in de metoder som oftast har refererats till under litteraturstudien.

2.1.1 Elektriska Mätmetoder

Electric Aerosol Analyzer (EAA) är ett mätinstrument där partikelstorlek mäts genom att partiklarna laddas upp av positiva joner. Metoden utvecklades av W. E. Clark på 1960-talet, och vidareutvecklades av B. Y. H. Liu, K. T. Whitby och D. Y. H. Pui på 1970-talet (Liu, Pui, & Kapadia, 1976). Partiklarna späds ut och förs genom ett rör där de laddas upp av positiva joner. Därefter utsätts de för ett elektriskt fält som får de nu laddade partiklarna att attraheras åt den motsatt laddade sidan. Beroende på partiklarnas storlek och det elektriska fältets styrka kommer de driva olika snabbt åt sidan. Genom att variera styrkan på det elektriska fältet kan partiklarnas bana därmed påverkas. En elektrisk sensor placeras som kan mäta den ström som uppkommer när laddade partiklarna träffar den. När det elektriska fältet varieras kommer partiklar av olika storlek få precis rätt bana för att träffa detektorn, och olika stor ström uppmäts därmed. Genom att kalibrera instrumentet mot kända partikelstorlekar kan sedan storleken på okända partiklar mätas. Denna typ av mätningar är begränsad till partiklar under 1000 nm i storlek, då större partiklar än så kan få mer än en laddning av jonerna vilket skulle öka deras hastighet i det elektriska fältet (Liu, Pui, & Kapadia, 1976).

Ett problem med EAA är den långa tid som krävs för att få fram en partikelfördelning, då varje mätpunkt kräver en omställning av det elektriska fältet plus extra tid för att tillåta instrumentet och luftflödet att ställa in sig till den nya fältstyrkan. För att öka responstiden utvecklades en Scanning Electrical Mobility Spectrometer (SEMS) (Wang & Flagan, 1990). Detta instrument bygger på samma princip som EAA med partiklar som laddas upp av joner för att sedan utnyttja deras elektriska mobilitet i ett elektriskt fält för att bestämma deras storlek och massa. Skillnaden är att det elektriska fältet i en SEMS kontinuerligt varieras i stället för att ändras i steg. Genom att utveckla en metod för att översätta mätresultaten från ett varierande fält till en partikelstorleksfördelning kan mätningar ske betydligt snabbare än med en EAA. Mätningar på 100 punkter kan ske på mellan fem och åtta minuter i stället för mellan 15 och 50, vilket tidigare krävdes med en EAA (Wang & Flagan, 1990). Detta gör SEMS mer lämpad för att mäta partikelstorlekar vid förbränningar där storleken kan förändras över tid, samt för att upptäcka den typen av förändring.

Det sista steget i utvecklingen av mätinstrument som använder sig av elektrisk mobilitet är en fast particulate spectrometer. Den utvecklades från början för att undersöka utsläpp från förbränningsmotorer av Kingsley Reavell, Tim Hands och Nick Collings (Reavell, Hands, & Collings, 2002). Ett prov med partiklarna som ska undersökas späds ut i två olika steg och leds genom en upphettad ledning till en cyklonseparator där partiklar större än 1000 nm filtreras bort. Det kvarvarande provet leds sedan till en laddare där positiva joner liksom i tidigare instrument laddar partiklarna. Dessa leds in i ett ihåligt rör med en central elektrod vilken repellerar partiklarna. En fast particulate spectrometer använder ett konstant elektriskt fält, men i stället för att ha en enda mätpunkt finns många mätpunkter i form av jordade ringar runt den yttre cylindern. När de laddade partiklarna träffar en ring leds dess extra laddning bort. Denna ström är indikatorn för instrumentet att en partikel har landat på ringen (Cambustion Ltd., 2015). Ringarna tillåter att mätning av alla partikelstorlekar mäts samtidigt, vilket ger möjlighet att mäta koncentration och storleksfördelning kontinuerligt under experimentet. Metoden är dock fortfarande begränsad till partikelstorlekar under 1000 nm för att inte riskera att partiklarna får en multipel laddning av jonerna, vilket är varför större partiklar än så filtreras bort.

2.1.2 Optiska mätmetoder

En annan typ av metod för att mäta partikelstorlekar är optiska metoder. Dessa grundar sig på Mie-teori som beskriver hur ljus interagerar med små sfäriska partiklar. När ljus träffar en partikel kommer en del av ljuset absorberas, en del passerar rakt fram och en del skickas ut i en vinkel i förhållande till den ursprungliga riktningen. Mie-teori beskriver hur stor denna vinkel kommer att vara för olika storlekar på partiklar och olika våglängder på ljuset. Vinkeln kommer också bero på materialegenskaper som beskrivs av ett komplext tal kallat ett "refractive index" (Bohren & Huffman, 1998). Även om sotpartiklar inte alltid är sfäriska har metoden visat sig fungera med små felmarginaler även för dessa (Wilkens Flecknoe-Brown & van Hees, 2015).

Denna teori är grunden för Optical Particle Counters (OPC). Två olika typer av OPC presenteras nedan. Den första metoden grundar sig på att låta ljus av en viss våglängd lysa igenom rök. Fotodetektorer är sedan uppsatta runt instrumentet vilka mäter upp vinkeln ljuset reflekteras i. Genom beräkning med Mie-teori och ett refractive index taget från tidigare mätningar motsvarar sedan en viss vinkel en viss partikelstorlek (Cbannel & Hanna, 2013).

Den andra optiska metoden använder i stället det ljus som fortsätter genom röken. Cashdollar, Lee och Singer presenterade en metod där tre olika lasrar med olika våglängd används. Då våglängd är en av variablerna för hur mycket ljus absorberas eller reflekteras enligt Mie-teorin kan tre olika teoretiska värden beräknas. Genom att jämföra dessa teoretiska värden med mätresultaten kan den partikelstorlek som bäst passar in uppskattas (Cashdollar, Lee, & Singer, 1979).

Båda dessa presenterade optiska mätmetoder kräver dock uppskattningar av materialegenskaperna som samlas i refractive index. Detta kan variera kraftigt, de största och minsta värdena för förbränning av kolväten har uppmätts till mellan 1.5 och 1.95 för realdelen och mellan 0.15 och 0.6 för imaginärdelen (Cashdollar, Lee, & Singer, 1979). För att variera detta vidareutvecklade Wilkens Flecknoe-Brown och van Hees mätningarna med laser genom att utföra beräkningar med datorkraft. En matlabkod användes för att iterera mellan alla möjliga refractive index och tog fram teoretiska intensitetskurvor för de olika våglängderna för varje index. Varje kurva testades sedan mot de experimentella resultaten uppmätta av Cashdollar, Lee och Singer, och den kombination av partikelstorlek och index som låg närmast de uppmätta värdena presenterades som den troligaste verkliga kombinationen och jämfördes med resultatet i den ursprungliga rapporten. Detta ökade hastigheten i beräkningarna och tillät större noggrannhet då många fler möjliga partikelstorlekar kunde provas (Wilkens Flecknoe-Brown & van Hees, 2015).

I sin rapport beskriver Wilkens och van Hees förutsättningarna för att använda denna mätmetod. Desto fler lasrar som används med så spridda våglängder som möjligt desto mer olika kan de beräknade teoretiska kurvorna bli, och därmed ökar säkerheten i mätningarna. Det är också viktigt att mätningarna sker så nära varandra som möjligt för att undvika att det uppstår en skillnad i rökkoncentration vid de olika punkter där mätningen sker. En ökad koncentration innebär att intensiteten för lasern som skickas igenom röken minskar, och om koncentrationen skiljer sig åt överskattas därmed utslaget av en av lasrarna (Wilkens Flecknoe-Brown & van Hees, 2015).

2.1.3 Val av mätmetod

I dessa experiment används en fast particulate spectrometer kallad DMS500 (Cambustion Ltd., 2015) tillsammans med optisk mätning i form av tre lasrar. En fast particulate spectrometer är nödvändig för att mäta under de kortare förbränningstider som förväntas under småskaliga experiment för att få fram variationerna som kan ske under de olika stadierna av förbränningen. Begränsningen att den bara kan mäta partiklar under 1000 nm bör inte innebära några stora felkällor då tidigare experiment visat att de flesta partiklar vid denna typ av förbränning är mindre än så (se nästa avsnitt, källa (Helsper, Fissan, Muggli, & Scheidweiler, 1980)). Mätningarna med DMS500 kan sedan jämföras med mätningarna från de tre lasrarna i enlighet med rapportens mål och syfte.

DMS500 mäter en ekvivalent diameter vilket antar en cylindrisk partikel med samma vikt/laddningsförhållande som den faktiska partikeln. Det är detta som framöver i rapporten kommer förkortas till enbart diameter.

2.2 Tidigare forskning kring partikelstorlekar

I ett experiment för att undersöka partikelstorleken vid standardförbränningar som används vid test av brandvarnare mätte Helsper, Fissan, Muggli & Scheidweiler förbränningen av polyuretan, heptan och flammmande och glödande trä. Experimenten gjordes i ett brandrum med dimensionerna 6x10x4 meter och proverna låg mellan 0.8 och 2.5 kg i vikt. Mätningarna gjordes med en EAA för partiklar mellan 10 och 1000 nm och en OPC för partiklar mellan 1000 och 10000 nm. På grund av den långa tiden för att få fram en mätning fick flera experiment göras där prover togs vid olika tidpunkter för att få en tidsupplösning av partikelstorleken.

Resultatet visade på en bimodal fördelning där en topp av storleksfördelningen låg på runt 20 nm i diameter och den andra på mellan 100 och 150 nm för alla ämnen. Andelen partiklar i den första toppen varierade mellan 28 och 52 % beroende på ämne. Fördelningen av partiklar i de olika storlekarna varierade också med tiden, där t.ex det glödande träet började med en mindre del små partiklar som sedan ökade medan det flammmande träet gjorde tvärtom. Över 99 % av partiklarna var under 1000 nm i storlek och mättes därför med EAA, och OPC användes därmed bara för att bekräfta att större partiklar inte var en viktig del av den totala mängden (Helsper, Fissan, Muggli, & Scheidweiler, 1980).

I ett annat experiment mätte Xie, Yuan, Song & Zhang storleksfördelningen av förbränning av samma ämnen, men använde en SMPS (scanning mobility particle sizer) spektrometer. Denna metod gjorde att partikelstorleksfördelningen kunde läsas ut var 60:e sekund, vilket gav en bättre bild av utvecklingen av partikelstorleken. Experimenten gjordes på samma vis i ett stort rum, i detta fall 10x7x4 m.

Resultatet visade att vid varje tidpunkt var partikelfördelningen väl beskriven av en lognormal fördelning. Denna fördelning förändrade sig dock över tid för vissa ämnen, där den flammmande träförbränningen minskade i storlek, den glödande förbränningen och heptanet ökade i storlek och polyuretanet avgav en konstant partikelstorlek. Polyuretanet hade en partikelstorlek på runt 80 nm, medan resten av experimenten låg mellan 120 och 225 nm. Ingen bimodal fördelning uppmättes för något ämne i detta experiment (Xie, Yuan, Song, & Zhang, 2007).

Jaehak Goo undersökte hur partiklarna förändrades vid de olika faserna av en brand definierade i ISO/TS 19700 (pyrolys, välventilerad, underventilerad, och underventilerad efter övertändning). De olika faserna simulerades genom att variera temperatur och tillgänglig luft under de olika försöken. Ett transmission electron microscope (TEM) användes för att studera formen och storleken på partiklarna efter de olika stadierna vid förbränning av trä och polypropylen. I båda fallen fanns det att sammansättningen och storleken av partiklarna förändrades mellan de olika stadierna. Träpartiklarna vid pyrolys var sfäriska, och i de andra fallen olika grader av koagulerade med varandra medan polypropylen var mer koagulerade redan under pyrolysstadiet. Ju varmare förbränningen hade varit desto mer irreguljära former antog partiklarna i båda fallen (Goo, 2015).

Perović undersökte partikelstorleken av brinnande oljor och elkablar i ett projekt för CERN. Detta gjordes då partiklar i de miljöerna skulle kunna vara radioaktiva vid brand, vilket ställer höga krav på filterfunktioner och likande, där partikelstorleken kan vara avgörande. Han använde en DMS500 för att mäta partikelstorleken och använde också en 630 nm laser för att undersöka den totala sotproduktionen. Resultaten visade en dominerande partikelstorlek runt 250 nm för oljan men en bimodal fördelning för elkablarna, med maximum runt 30 och 250 nm. Perović noterade också att lasern han använde för att mäta sotproduktionen inte gav utslag när partiklarna i soten var mindre än ca 100 nm i diameter (Perović, 2018).

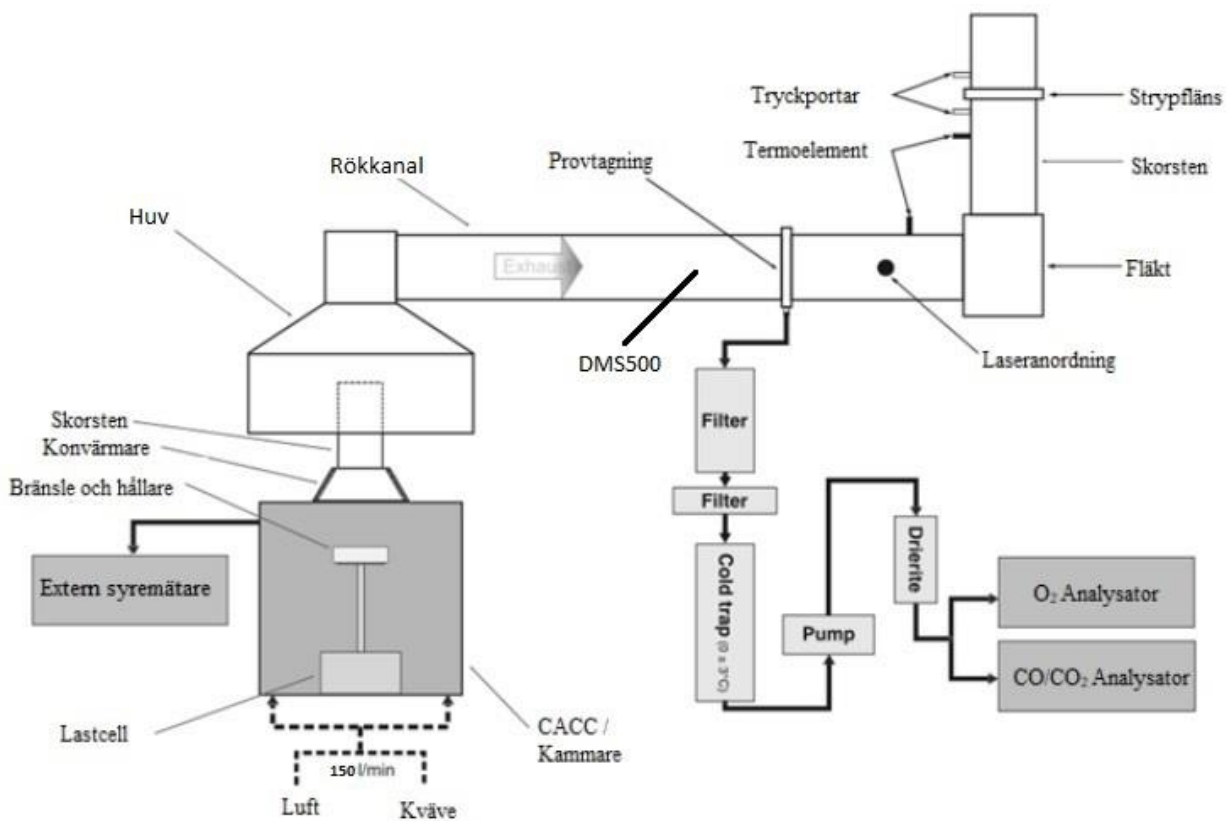
2.3 Konkallorimeter

I dessa experiment användes en konkallorimeter som grunduppställning som lasrar och DMS500 sedan kopplades in på. En konkallorimeter är en uppställning utformad för att mäta olika restprodukter efter en förbränning. Här presenteras först en överblick över uppställningen av en konkallorimeter och dess utveckling. Sedan redovisas en del teori som behövs för att kunna utföra beräkningar av effektutvecklingen med konkallorimeterns hjälp.

2.3.1 Konkallorimeterns uppställning

De olika delarna av en konkallorimeter kan ses i Figur 1. I arbetet med konkallorimetern användes två olika standarder, ISO 5660-1 och ISO 5660-5 (SSI, 2019) (SSI, 2020). Dessa standarder hanterar just arbete med konkallorimeter, den första allmänt och den andra specifikt för arbete i reducerade syremiljöer. Standarderna ger bland annat instruktioner om hur tester ska gå till, hur beräkning av effektutveckling ska göras, vad som ska kalibreras och hur noggranna instrumenten ska vara. Detta är till för att sätta en gemensam grund för hur arbete med konkallorimetern ska utföras.

Konkallorimetern mäter syre, koldioxid och kolmonoxid från förbränningen och genom en kalibrering med förbränning av ett känt ämne (metan) kan effektutvecklingen beräknas. Detta görs enligt standarden ISO 5660-1 (SSI, 2019).



Figur 1: Uppställning av konkallorimetern. Bild tagen från (Nilsson & Hersner, 2021), ursprungligen modifierad från (Werrel, Deubel, Krüger, Hofmann, & Krause, 2014).

En konkallorimeter kan vara antingen öppen mot omgivande luft eller ha en kontrollerad atmosfär (Werrel, Deubel, Krüger, Hofmann, & Krause, 2014). I en öppen konkallorimeter sker förbränningen direkt under huv. Detta är praktiskt då det kräver en mindre komplicerad uppställning, men innebär att syrehalten under förbränningen inte kan kontrolleras. Därför utvecklades en Controlled-Atmosphere Cone Calorimeter (CACC) (Leonard, Bowditch, & Dowling, 2000). I denna version sker förbränningen i en stängd kammare där syrenivån kontrolleras med hjälp av ett fast inflöde av kväve och syre som ger en kontrollerad syrehalt. En CACC kan konstrueras på två sätt, med ett helt stängt utlopp där ingen luft från omgivningen kommer in, eller där förbränningsprodukterna avges från den kontrollerade kammaren ut i huv. Den senare varianten är den som används i detta experiment och kan ses i Figur 1. Syrehalten i kammaren kontrolleras i två steg, först med en

syremätare i inflödet till kammaren och sedan en till syremätare som mäter syrehalten inuti. Denna andra syremätare kontrollerar att syrekonzentrationen är korrekt innan provet startar.

Inne i kammaren värms provet med en konvärmare och antänds med en gnisttändare. Konvärmaren ger en bestämd strålning mot provet och kalibreras varje dag. När provkroppen sätts in i kammaren måste denna öppnas, vilket leder till att den omgivande luften blandas in. Detta ökar syrehalten i kammaren. En strålskärm skyddar provet mot uppvärmning under tiden mellan att provet sätts in i kammaren och att den önskade syrehalten har återställt sig.

Under förbränningen är provhållaren placerad på en våg. Denna mäter kontinuerligt massförlusten av provet. Förbränningsprodukterna leds upp genom en skorsten in i en huv. Flödet genom denna sätts till ett betydligt högre värde än flödet genom kammaren för att ta hänsyn till expansionen av gas som sker vid uppvärmning i kammaren. Detta betyder att en del omgivande luft dras med in i huven. I rökkanalen tas sen prover på röken. Förutom de värden som behövs för att beräkna effektutvecklingen (tryck, temperatur, flöde, syre, koldioxid och kolmonoxid) kopplas här även andra mätapparaterna in. I detta experiment kopplades DMS500 och lasrar in, vilka beskrivs längre ner.

2.3.2 Beräkning av effektutveckling

Vid användning av konkalorimetern finns det i princip två olika sätt att beräkna effektutvecklingen. Antingen kan vågen användas för att ta reda på hur mycket av provet som förbränns under varje tidsperiod. Genom att kombinera detta med tabellvärden för förbränningsenergin av olika ämnen kan en effektutveckling tas fram. Alternativet är att undersöka hur mycket syre som har förbrukats under förbränningen. Energin per förbrukat syre är ca $13.1 \cdot 10^3$ kJ/kg (SSI, 2019), vilket kan användas för att få fram en total effektutveckling. Denna siffra är dock beräknad efter att allt syre förbränns helt till koldioxid. För att få ett bättre värde kan man ta hänsyn till den ofullständiga förbränningen till kolmonoxid. Korrigering kan också göras för luftfuktigheten och inflödet av luft från omgivningen runt skorstenen, även om den sista punkten redan är inbakad i kalibreringsfaktorn. Totalt ger detta en ekvation för att beräkna syrehalten vid en syrehalt runt 20.95 % enligt ISO 5660-1 (SSI, 2019):

$$\dot{q} = 1.10 * E * X_{O_2}^a \left[\frac{\Phi - \left(\frac{E_{CO} - E}{2E} \right) (1 - \Phi) X_{CO} / X_{O_2}}{(1 - \Phi) + 1.105\Phi} \right] \dot{m}_e \quad \text{ekv. 1}$$

Där \dot{q} är effektutvecklingen, E energin per förbrukat mängd syre, $X_{O_2}^a$ är omgivande lufts molfraktion syre, Φ en korrigeringsfaktor för det förbrukade syret, X markerar uppmätta koncentrationer, \dot{m}_e är massflödet och E_{CO} är energin per förbrukat mängd syre vid förbränning till kolmonoxid.

Ekvation 1 används vid de tester som görs vid omgivande lufts syrehalt (20.95 %), men den kan inte användas när syrenivåerna sänks. (Werrel, Deubel, Krüger, Hofmann, & Krause, 2014) beskriver problemet i sin artikel. När förbränningen startar i kammaren värms den omgivande luften upp och expanderar därmed. Eftersom allt som lämnar kammaren åker upp i kalorimeterns huv, men huven har ett konstant volymflöde, betyder detta att mindre luft från omgivningen dras in i huven. Eftersom luften från kammaren har lägre syrehalt (utöver den skillnad som sker när syret förbränns) gör detta att syrehalten i kalorimetern minskar. När syrehalten minskar tolkar kalorimetern det som att förbränning sker, och därmed överskattas effektutvecklingen. (Werrel, Deubel, Krüger, Hofmann, & Krause, 2014) beräknade det möjliga felet till upp till 30 %.

För att hantera detta presenterar (Werrel, Deubel, Krüger, Hofmann, & Krause, 2014) en alternativ formel för att beräkna effektutvecklingen. Denna bygger på två "baselines" – mätningar innan experimentet startar – och eliminerar problemet med *ekv. 1* genom att göra ekvationen oberoende av den varierande utspädningen i huven:

$$\dot{q} = 1.10 * E * \left(X_{O_2}^{A^0} \gamma - X_{O_2}^{A^S} (\gamma - 1) \right) * C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \left[\frac{\Phi - 0.172(1 - \Phi) X_{CO}^A / X_{O_2}^A}{(1 - \Phi) + \Phi(1 + 0.5(X_{O_2}^{A^0} \gamma - X_{O_2}^{A^S} (\gamma - 1)))} \right] (1 - X_{H_2O}^S \bar{\gamma}) \quad \text{ekv. 2}$$

I *ekv. 2* står olika index för antingen en av de båda baselines eller data tagen under testet. Denna teknik är också antagen som standard, och står som metod för att beräkna effektutveckling vid konkalorimätningar i reducerad syremiljö i standarden ISO 5660-5 (SSI, 2020). Därför används den för att beräkna effektutvecklingen under de experiment som görs med reducerad syrehalt.

3 Genomförande

3.1 Val av material, testförutsättningar och begränsningar

Tre olika material valdes för att undersöka partikelstorleksfördelningen vid reducerad syrehalt. Dessa var polyeten (oexpanderad plast), polystyren (expanderad plast) och kartong. Dessa material valdes för att de är vanliga material vid förvaring och räknas in i standardiserade material av klass 3 (Zhou, Xin, & Dorofeev, 2019). De är material som FM Global använder i storskaliga tester av sprinklers (FM Global, 2020). Fler än tre material valdes inte på grund av tidsbegränsningar. Att materialen är vanliga att använda vid olika typer av förbränningstester gör resultaten av den här rapporten lättare att jämföra med tidigare och framtida forskning.

Varje material testades vid syrehalter om 21, 19, 17 och 15 %. Den nedre gränsen om 15 % valdes då 15 % är runt gränsen för brännbarhet för de aktuella ämnena (Zhou, Xin, & Dorofeev, 2019). Uppdelningen i 2 % -steg valdes för att kunna jämföra resultat med tidigare rapporter (Nilsson & Hersner, 2021) samt på grund av tidsbegränsningar.

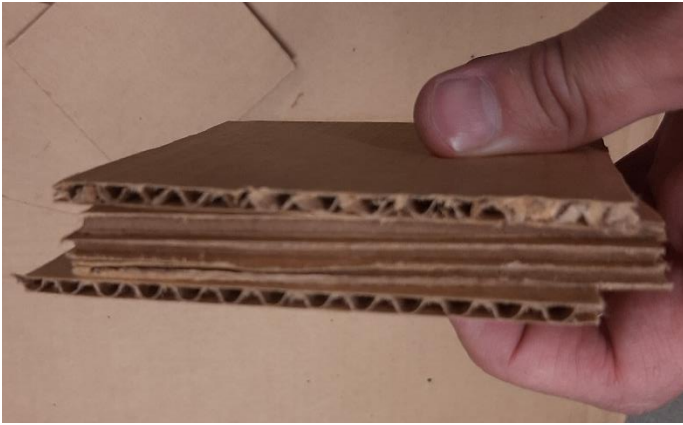
Uppställningen gjordes med konkalkorimetern som presenterades i Figur 1 där DMS500 och lasermätningarna kopplades in vid hoven. De tre lasrarna i rökkanalen satt ungefär 10 cm från varandra. Våglängderna som användes i detta experiment var 735, 650 och 532 nm. Varje laser träffade först en halvgenomskinlig spegel som splittrade den i två stålar. Den ena strålen gick direkt in i en detektor medan den andra först skickades igenom rökkanalen för att sedan träffa en annan detektor. Dessa två värden jämfördes med varandra för att jämföra hur många procent av ljuset som hade absorberats eller reflekterats. Detta gjordes för att minimera påverkan av en fluktuerande intensitet hos lasrarna.

Försöken utfördes initialt med en infallande värmestrålning mot proverna på 30 kW/m². Detta visade sig dock vara för högt, då flammor observerades ovanför skorstenen vid experiment med polyeten där syrehalten inte är kontrollerad. Den infallande strålningen sänktes därför till 20 kW/m². Detta gjordes även för experiment med de andra ämnena för att de olika experimenten skulle vara jämförbara. Ingen flammor observerades utanför skorstenen vid denna strålning.

Varje grundförsök upprepades två gånger. Om antändning inte skedde vid en viss procentsats ökades syret med 1 % för att undersöka var gränsen för antändning gick. Detta extraförsök utfördes dock bara en gång. Ytterligare ett försök utfördes vid 17 % syre, 30 kW/m² infallande strålning för kartong för att undersöka skillnaden mellan glödande och flammande förbränning vid samma syrehalt. Ett avsteg gjordes därmed här från standarden presenterad i (SSI, 2019), där tre försök ska göras vid varje nivå. Detta skedde återigen på grund av tidsbegränsningar.

De olika proverna som användes vägde runt 75 g/prov för polyeten, runt 7.5 g/prov för polystyren och runt 20 g/prov för kartong. Dessa valdes genom ett antal initiala tester där polystyren och kartong brann under för kort tid för att få meningsfulla resultat. Därför lades flera lager av dessa prover ovanpå varandra för att öka bränntiden. Detta gjordes inte med polyeten, då dessa prover redan var stora nog, se Figur 2 - Figur 4. Detta kan ha skapat oväntade effekter i övergångarna mellan varje skikt under förbränningen.

De samlade måtten för de olika testerna var 10x10x0.8 cm för polyeten och 10x10x2 cm för både kartong och polystyren. Detta motsvarar en densitet på 37.5 kg/m³ för polystyren, 100 kg/m³ för kartong och 940 kg/m³ för polyeten.



Figur 2: Kartongprover staplade på varandra för att ge längre brinntid.



Figur 3: Polystyrenprover staplade på varandra för att ge längre brinntid.



Figur 4: Polyetenprov.

Vid beräkning av effektutvecklingen för de olika materialen kunde som behandlat i teoridelen antingen massförlusten av bränsle eller syreförbrukningen användas. Då det vid flera försök med polyeten rann material ur provkroppen när det vid smältning expanderade skulle massförlusten ha blivit osäker. Dessutom ökar ofullständig förbränning vid de lägre syrehalter som de flesta av proverna utfördes vid, vilket inte heller hanteras av beräkningar med massförlust. Därför beslutades det att bara beräkna effektutvecklingen med hjälp av ekv. 1 och ekv. 2.

3.2 Praktiskt utförande av experiment

Inför varje dag kalibrerades mätinstrumenten i uppställningen. Syre-, koldioxid- och kolmonoxidmätarna som hörde till kalorimetern kalibrerades mot en referensgas med högre halter av koldioxid och kolmonoxid samt mot atmosfärsluft och rent kväve för att kalibrera nollvärde. Konvärmaren kalibrerades med hjälp av en intensitetsmätare och syremätarna kopplade till CACC-kammaren kalibrerades mot kväve och atmosfärsluft. Luftflödet genom konkalorimeterns huv kontrollerades och vattenförsörjningen till kylningen av strålskyddet sattes igång. Avståndet mellan provhållaren och konvärmaren kontrollerades. Om nödvändigt byttes filter i konkalorimetern.

Sedan förbereddes dagens prover. Provhållare rengjordes och lagom stora provbitar mättes upp. Dessa vägdes och slogs sedan in i aluminiumfolie enligt ISO-standard (SSI, 2019). DMS500 sattes igång och började mäta. Vågen under provhållaren kalibrerades samt konfigurerades för provkroppens massa. Den tomma provhållaren tarerades för varje brandprov.

Sedan påbörjades det första experimentet. Dessa följde i princip de standarder som redan presenterat i denna rapport, SS-ISO 5660-1 och SS-ISO 5660-5 (SSI, 2019) (SSI, 2020), förutom ett avsteg som diskuteras efter att proceduren presenterats här;

1. Data samlades in för att få en baseline i 60 sekunder. Tid togs med ett tidtagarur och hela experimentet filmades med tidtagaruret synligt för att kunna matcha antändning i efterhand.
2. Om experimentet sker under 21 % syre stängdes kammaren till CACC och rätt proportioner luft och syre sattes igång (till ett totalt flöde på 150 l/min).
3. När rätt syrehalt uppnåddes togs ännu en grundnivå under 60 sekunder.
4. Strålskärmen sattes för. Dörren till CACC öppnades snabbt och provet sattes in. Dörren stängdes.
5. Om experimentet skedde under 21 % syre väntade man till rätt syrenivå uppnåddes igen.
6. Strålskyddet drogs undan och gnisttändaren aktiverades.
7. När antändning skedde stängdes gnisttändaren av.
8. Provet avslutades om ingen antändning hade skett efter 30 minuter eller ingen förändring i vikt hade noterats under 1 minut.

Avsteget från standarderna som gjordes här är att provet fortsatte även efter 30 minuter om förbränning fortfarande skedde i provet. Detta gjordes för att se slutet på förbränningen.

DMS500 samlade automatiskt in data och mellan prov sattes den på "purge" för att rensa ut rester av partiklar. Det hände att för många partiklar var kvar, vilket krävde rengöring av instrumentet. Resultatet från lasermätarna och annan data (syrenivå, tryck, volymflöde etc) samlades upp av programmet "LSHR" och sparades efter varje experiment.

3.3 Behandling av data från DMS500

Datan från DMS500 samlades in automatiskt och sparades i en excelfil med ett egenbyggt tillägg. Detta gjorde det möjligt att välja specifika tider eller storlekar att ta medelvärden av, samt att få fram grafer över storleksfördelningen enkelt. Via detta kunde varje prov inspekteras för sig, med en antändningstid som togs från den inspelade filmen av experimentet. Därefter hanterades datan på lite olika sätt. De olika ämnena hade olika typer av förbränning, vilka presenteras i resultatdelen nedan. Tider för antändning och släckning antecknades för varje prov och olika grafer över storleksfördelningen skapades.

3.4 Behandling av data från mätningar med laser

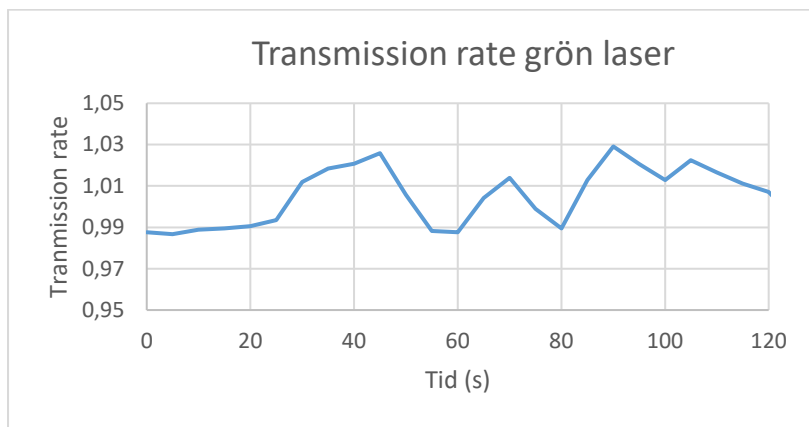
När en laser träffade en av sina två detektorer skapades en spänning som korrelerade mot dess intensitet. För varje laser fanns därmed två serier av data i Volt som motsvarade en laserstråle som skickats rakt igenom röken och en som skickats direkt till en detektor. Varje serie normaliserades mot ett medelvärde av mätvärdena för de första 60 sekunderna i sin egen serie, och därefter delades värdena för lasern som gått igenom röken med den som inte gjort det. Resultatet blev att man fick ut en så kallad "transmission rate", ett mått på hur mycket av ljuset som inte absorberats eller reflekterats av röken.

Dessa värden skulle sedan matchas mot en lämplig teoretisk kurva beräknad med hjälp av mie scattering enligt teoriavsnittet. Dock var matlabkoden för detta bara anpassad för ett medelvärde för en stabil förbränning. Proverna i detta experiment var för små för att uppnå stabilitet, så koden fick skrivas om för att i stället göra en beräkning för varje mätpunkt. Denna kod optimerades sedan i flera omgångar för att beräkningarna skulle bli snabbare, och kontrollerades genom att testa mot data som körts med den ursprungliga koden för att kontrollera att samma svar fortfarande gavs.

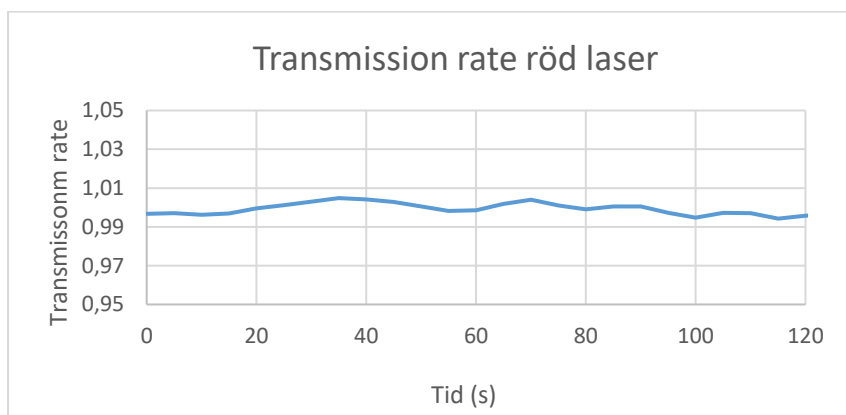
När beräkningarna var tillräckligt snabba skapades en excelmall för att automatiskt göra beräkningarna av transmission values och effektutveckling. Denna mall användes sedan för varje experiment, och matlab kopierade också in sina resultat i samma excelfil. Dessa resultat analyserades sedan och grafer skapades, vilka presenteras i resultatdelen nedan.

3.5 Känslighetsanalys av mätningar från laser

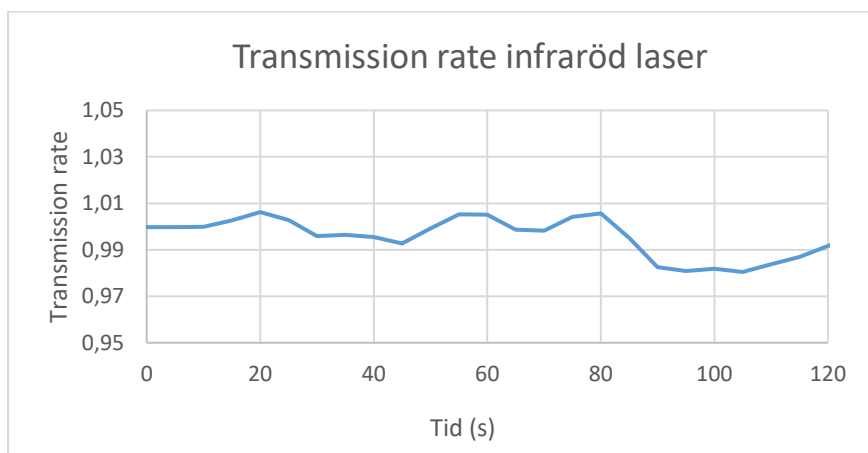
För att undersöka hur känslig lasermätningen var mot variationer i lasern utfördes en enkel känslighetsanalys. Värderna på transmission values togs från en punkt i ett experiment där det fanns en tydlig mätning för alla tre lasrarna. Sedan varierades värdena för den gröna lasern med $\pm 3\%$, värdena för den röda lasern med $\pm 0.5\%$ och värdena för den infraröda lasern med $\pm 1.5\%$. Dessa värden valdes för att de var typiska värden för variationerna som skedde med de olika lasrarna i de olika experimenten, se Figur 5 - Figur 7. Dessa värden varierade så pass kraftigt trots den normalisering som redan är beskriven i stycket ovanför. Variationerna beskrivna nedan skedde innan proverna hade blivit placerade i kalorimetern. Ingen rök fanns därmed i rökkanalen.



Figur 5: Typiska variationer i transmission rate för den gröna lasern de första 120 sekunderna (tagna från första försöket polyeten, 17 % syre).



Figur 6: Typiska variationer i transmission rate för den röda lasern de första 120 sekunderna (tagna från första försöket, polyeten, 17 % syre).



Figur 7: Typiska variationer i transmission rate för den infraröda lasern de första 120 sekunderna (tagna från första försöket, polyeten, 17 % syre).

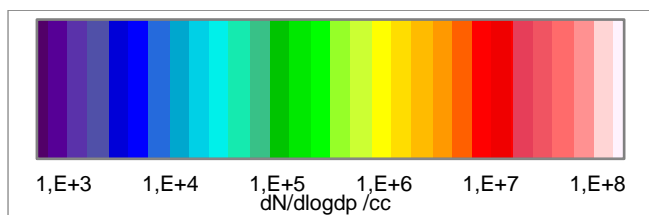
4 Resultat DMS500

Nedan följer resultaten av mätningarna med DMS500. Först förklaras figurerna som skapas av mjukvaran som följer med instrumentet. Därefter presenteras resultaten av de olika ämnena i tur och ordning. I varje stycke presenteras enstaka bilder som ger en generell bild av mätresultaten. Resultaten från alla försök ligger i Bilaga 1.

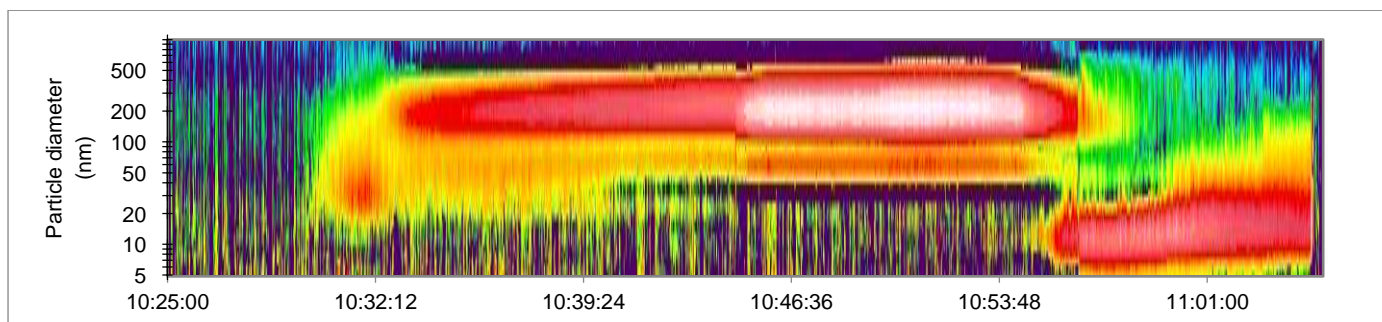
Figurerna från dessa mätningar använder skala som presenteras i Figur 8. $dN/d\log dp/cc$ är ett mått som uppkommer i beräkningarna som mjukvaran till DMS500 använder. Det är konstruerat så att integralen mellan två mätpunkter (som motsvarar de ringar som gör mätningarna enligt kapitel 2.1 ovan) ger den totala koncentrationen av partiklar mellan de två storlekar som använts. "log" uppkommer då de 32 mätpunkterna mäter olika partikelstorlekar logaritmiskt (Cambustion Ltd., 2015). Effekten blir att färger längre högerut på skalan i Figur 8 motsvarar högre koncentrationer av partikelstorlekar. Dessa färger används i alla figurer som visar resultaten från DMS500.

I Figur 9 visas som ett exempel resultatet från den första mätningen vid 21 % syre vid förbränning av polyeten. X-axeln visar tiden på dygnet när experimentet genomfördes och Y-axeln visar partikelstorleken. Färgerna i figuren motsvarar då koncentrationen av en viss partikelstorlek vid en viss tidpunkt. I Figur 9 kan man till exempel se att partiklar med en diameter runt 200 nm dominerar under större delen av förbränningen, och att koncentrationen av dem ökar under tiden fram till och förbi antändning. Antändning och släckning går inte att utläsa från figuren, utan har tagits fram genom att filma försöken och anteckna vid vilken tid antändning skedde. Även en mindre koncentration partiklar mellan 50-80 nm kan utläsas. När förbränningen upphör minskar också partikelstorleken dramatiskt.

Den "suddighet" som upphör runt 10:45 och startar igen runt 10:55 sker när utspädningen in till maskinen ändras. Utspädningen ökades när partikelkoncentrationen närmade sig mängder som riskerade att överbelasta instrumentet och minskades igen när koncentrationen blev för låg för att mäta säkert.



Figur 8: Skalan som används för koncentrationen av partiklar vid mätning med DMS500.



Figur 9: 21 % syre, försök 1. Förbränning av polyeten. Antänder runt 10:40, slocknar runt 10:54.

4.1 Polyeten

4.1.1 Allmänna observationer

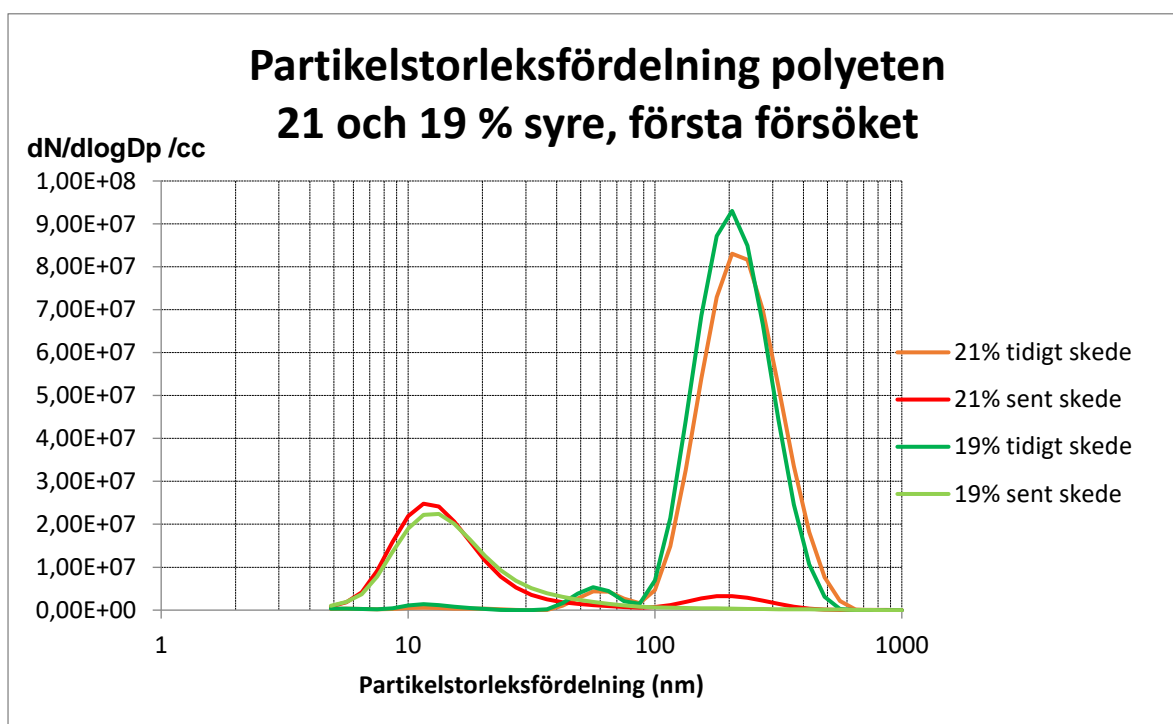
Polyeten smälte och expanderade när det blev uppvärmt, innan det antändes. Vid varje försök med polyeten rann en del av ämnet ut ur provhållaren och föll ner eller stelnade på utsidan av hållaren.

Vid inledande försök med en strålning på 30 kW/m² brann polyeten även utanför skorstenen. Detta skedde inte när strålningen sänktes till 20 kW/m².

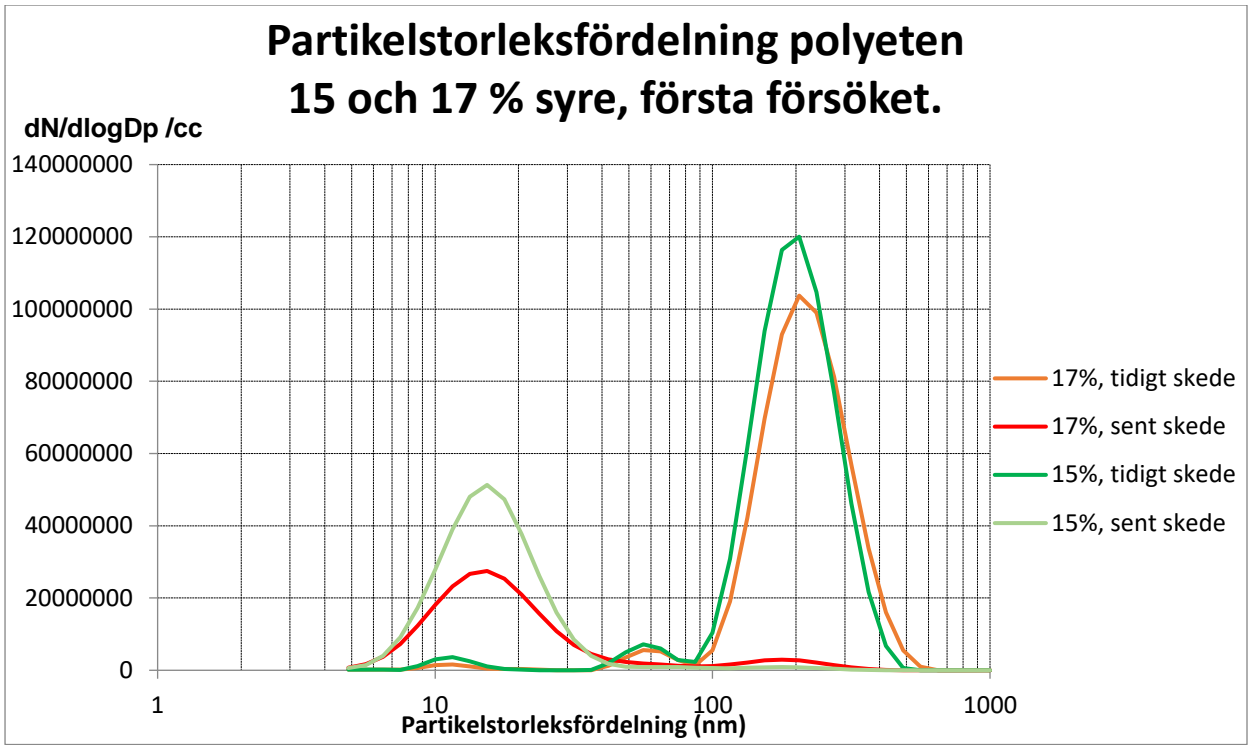
Det sista försöket, 15 % syre i mätserie 2, avbröts för tidigt då mer rök än vid de andra försöken fortfarande steg från provhållaren efter avslutat prov. Resultatet av detta prov kan därmed vara missvisande, men redovisas ändå.

4.1.2 Partikelstorleksfördelning

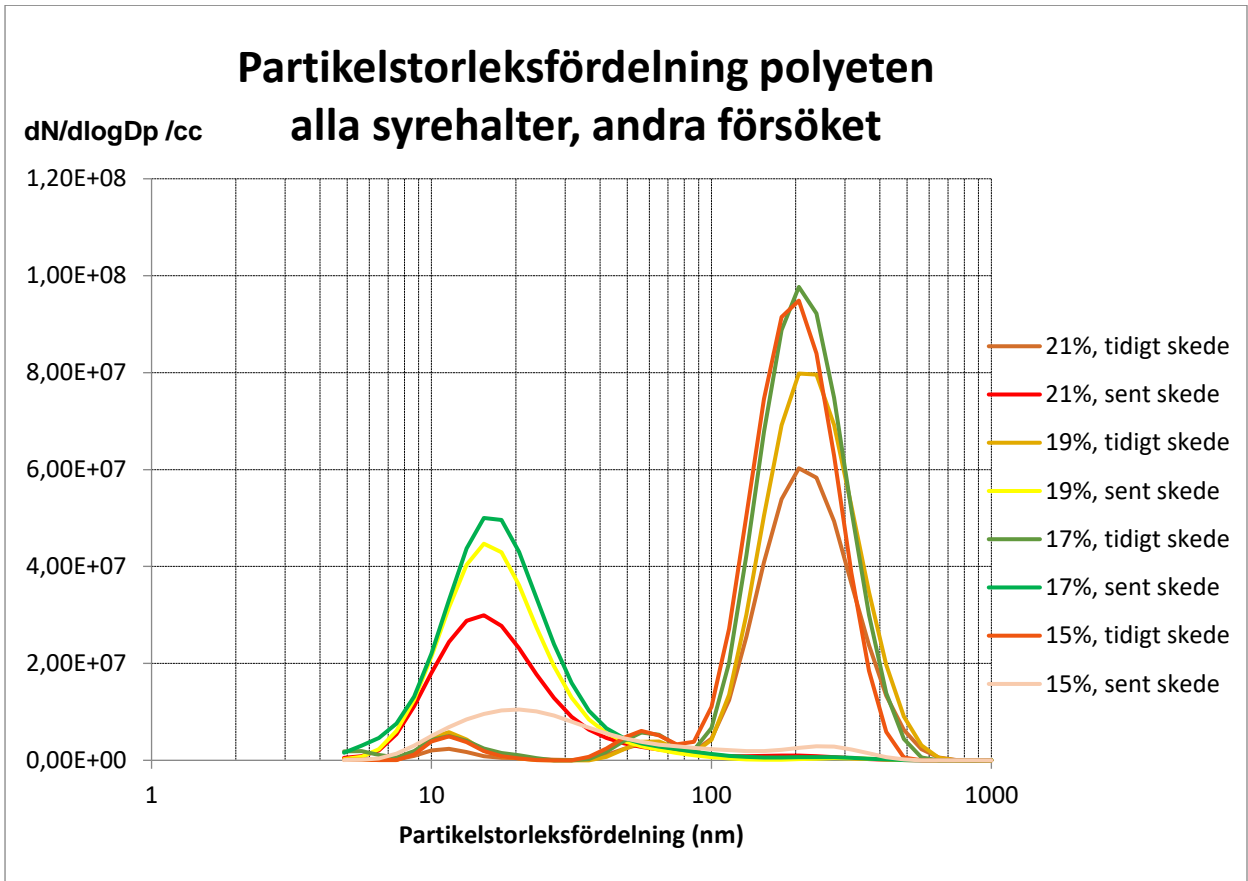
Som sågs i Figur 9 fanns en stor skillnad i partikelstorlek under den större delen av förbränningen jämfört med en senare del. Ett medelvärde under hela försöket hade därför blivit missvisande. En uppdelning för datan från alla försök med polyeten gjordes därför i ett "tidigt" och ett "sent" skede. I det tidiga skedet tas partikelstorlekar från en tidpunkt efter antändning med innan storleken börjar avta. I det sena skedet tas data bara från tidpunkter efter att skiftet mot mindre partiklar har skett. Detta kan ses i Figur 10 - Figur 12 nedan. Resultaten av dessa uppdelning presenteras i samlad form i Tabell 1 och Figur 13. Figurer med data från alla experiment finns i Bilaga 1. Exempel på skillnaden mellan tidig och sen förbränning kan ses i Figur 14.



Figur 10: Skillnaden i partikelstorlek tidig mot sent i förbränningen, polyeten, 21 och 19 %, första försöket.



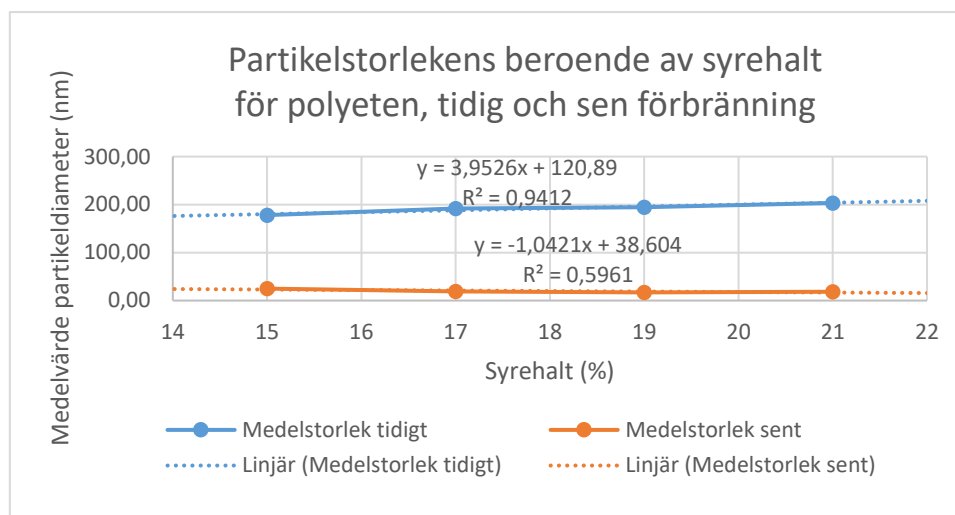
Figur 11: Skillnaden i partikelstorlek tidigt mot sent i förbränningen, polyeten, 17 och 15 %, första försöket.



Figur 12: Skillnaden i partikelstorlek tidigt mot sent i förbränningen, polyeten, alla syrehalter, andra försöket.

Tabell 1: Medelvärde av partikelstorleken under tidig och sen förbränning för polyeten vid olika syrehalter.

Syre (%)	Partikelstorlek tidigt försök 1	Partikelstorlek tidigt försök 2	Medelstorlek tidigt	Partikelstorlek sent försök 1	Partikelstorlek sent försök 2	Medelstorlek sent
21	209.86	197.07	203.46	18.63	18.58	18.61
19	192.85	196.76	194.80	16.15	17.82	16.98
17	201.75	181.81	191.78	19.42	18.34	18.88
15	181.88	174.35	178.12	16.23	33.62	24.92



Figur 13: Partikelstorleken beroende av syrehalt vid förbränning av polyeten enligt DMS500.

4.1.3 Effektutveckling (HRR)

I Tabell 2 presenteras den maximala effektutvecklingen och brinntiden för alla experiment med polyeten. De enskilda kurvorna kan hittas i Bilaga 3.

Tabell 2: Effektutveckling och brinntid för de olika experimenten med polyeten.

Syre	Maximal HRR försök 1	Brinntid försök 1	Maximal HRR försök 2	Brinntid försök 2
21 %	3.5 kW	14 min	3.1 kW	27 min
19 %	2.8 kW	20 min	2.8 kW	23 min
17 %	3 kW	23 min	2.7 kW	35 min
15 %	2.7 kW	32 min	2.4 kW	32 min

4.1.4 Analys Polyeten

DMS500-mätningarna av polyeten visar på flera intressanta saker. En av de tydligaste trenderna i alla grafer är de två olika storlekarna av partiklar som uppkommer, en under ett tidigt skede och en under ett senare skede när själva elden har slocknat eller är på väg att slockna. Under det tidiga skedet av förbränningen är det klart vad som händer – polyetenet smälter, expanderar (då det börjar läcka smält material från provhållaren), börjar pyrolyseras och antänder sedan. Vad som händer i det senare skedet är mer oklart. Provhållarens utformning där en del av materialet ligger skyddat från den inkommande strålningen kan vara en del av förklaringen. Det noterades under flera av försöken att i det avslutande skedena brann materialet mycket lite och bara från under kanterna på hållaren. Detta kan ses i Figur 14 där man ser att under det tidiga skedet brinner ämnet från mitten av provhållaren medan i det senare skedet finns bara små flammor som slickar sig fram från under kanterna på provhållaren. Detta tyder på att polyeten bara finns kvar i kanterna av provhållaren i det senare skedet. Därför skulle partiklarna under det senare skedet kunna vara orsakade av till exempel föroreningar i botten av provhållaren, vilken i så fall skulle vara direkt utsatt av strålningen under den tiden.



Figur 14: Skillnad i var i provhållaren det brinner, tidigt skede vänster mot sent skede höger, polyeten 17 % syre försök 1.

En till observation från DMS500-mätningarna är att partikelstorleken inte ändras vid antändning av polyeten. Redan innan antändning ligger storleksfördelningen likadant som efter, och den enda skillnaden blir att intensiteten av partiklar ökar. Detta kan ses tydlig i Figur 9.

En sista observation från DMS500experimenten med polyeten är att en mindre koncentration av partiklar med en mindre diameter (runt 60 nm) bildas under det tidiga skedet av förbränningen, se Figur 34. Det går också att se i graferna över storleksfördelning, Figur 10, Figur 11 och Figur 12. I Figur 33 kan man också tydligt se att detta sker även innan antändning. Risken att detta skulle vara ett fel i DMS500 bedöms som liten, detta syns i alla mätningar av förbränning av polyeten, tagna vid tre olika tillfällen. Mellan tillfällena gjordes experiment på kartong, där samma linje inte uppkom. Detta verkar därför vara en egenskap polyeten har, med partikelstorlekar i två distinkta storlekar vid förbränning.

Storleksfördelningen över tid som visas i Figur 13 och Tabell 1 visar ett samband mellan syrehalt och partikelstorlek för den tidiga förbränningen på runt 4 nm/procent syre, medan bara ett svagt samband kunde hittas för den senare förbränningen. Dessa siffror är till viss del beroende av under vilka tider "tidig" och "sen" förbränning antas. I siffrorna som presenteras här har uppdelningen gjorts individuellt för varje försök, där målet har varit att hitta en period av stabilitet som inte påverkas av perioden med blandade värden där två typer av förbränning sker samtidigt, som till exempel att undvika tiden runt 10:33 i Figur 37. Detta är en ganska arbiträr uppdelning, men på grund av den stabilitet under flera minuter som förbränningen uppvisar påverkar inte den precisa uppdelningen resultatet i nästan varje fall. Undantaget till detta är det sista försöket som gjordes, 15 % syre försök 2. Här avbröts försöket som tidigare nämnts för tidigt och slutet på den sena perioden, som är den mer stabila delen, mättes inte upp. Därför blev medelvärdet under den perioden mer influerat av övergångsperioden där båda typerna av förbränning sker, vilket också kan ses i det högre värdet på sen förbränning i Tabell 1. Om det värdet hade tagits bort hade förändringen av partikelstorlek vid den senare delen av förbränningen blivit nästan obefintlig, men då två försök redan är få skulle det bli svårt att dra fler slutsatser med ännu färre mätvärden.

Vidare diskussion om partikelstorlekarna görs i den samlade diskussionen i slutet av rapporten.

4.2 Polystyren

4.2.1 Allmänna observationer

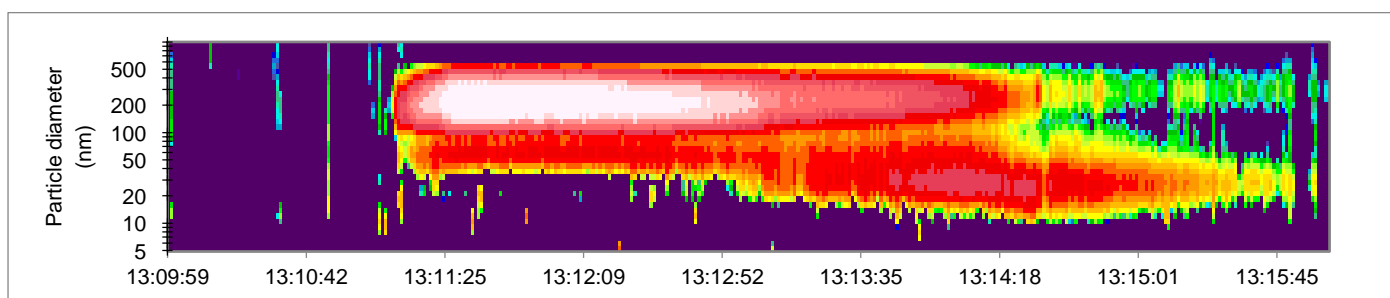
Proverna varierade mycket i hur kraftigt och hur länge de brann.

Provet vid 15 % syre antände inte vid första försöket. Därför lades ett prov vid 16 % syre till. Det andra provet vid 15 % antände dock, och presenteras därför också.

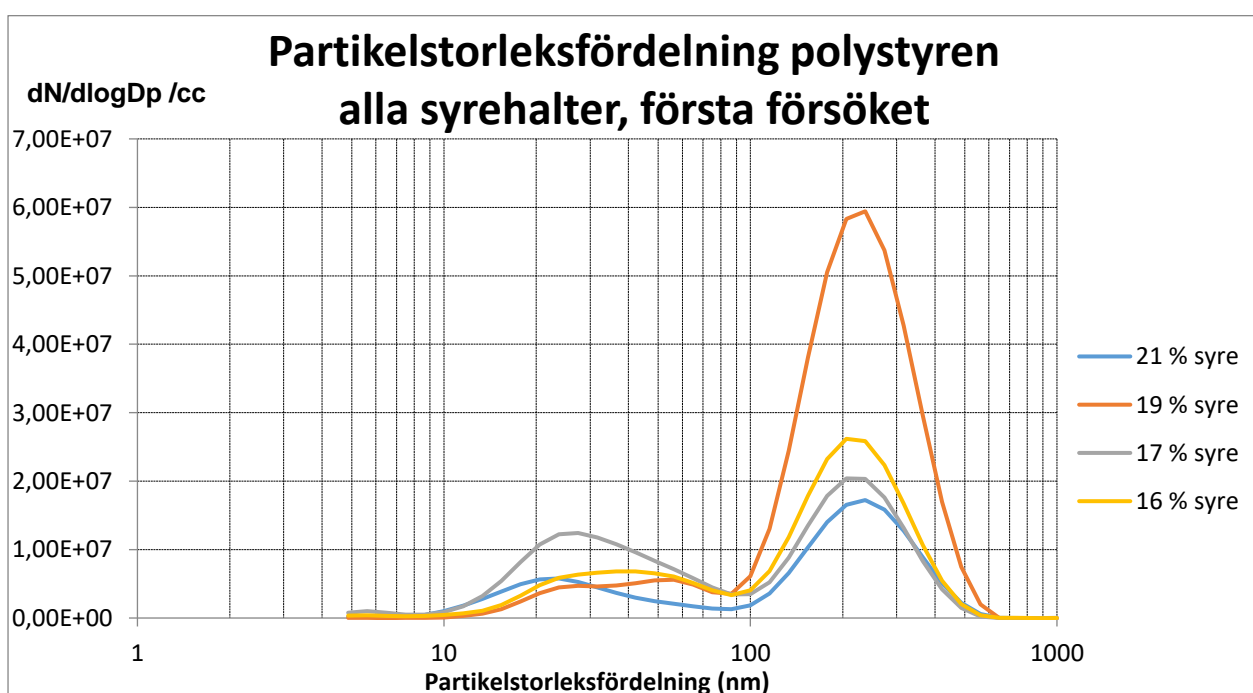
Under ett par försök (första 17 %, första 16 %, andra 15 %) uppkom problem med att stänga luckan till boxen efter att ha fört in provet. Detta ledde till att luckan snabbt fick öppnas igen, vilket försenade tiden tills gnisttändaren kunde föras fram till provet. Proverna kan därför ha blivit mer uppvärmda innan antändning.

4.2.2 Partikelstorleksfördelning

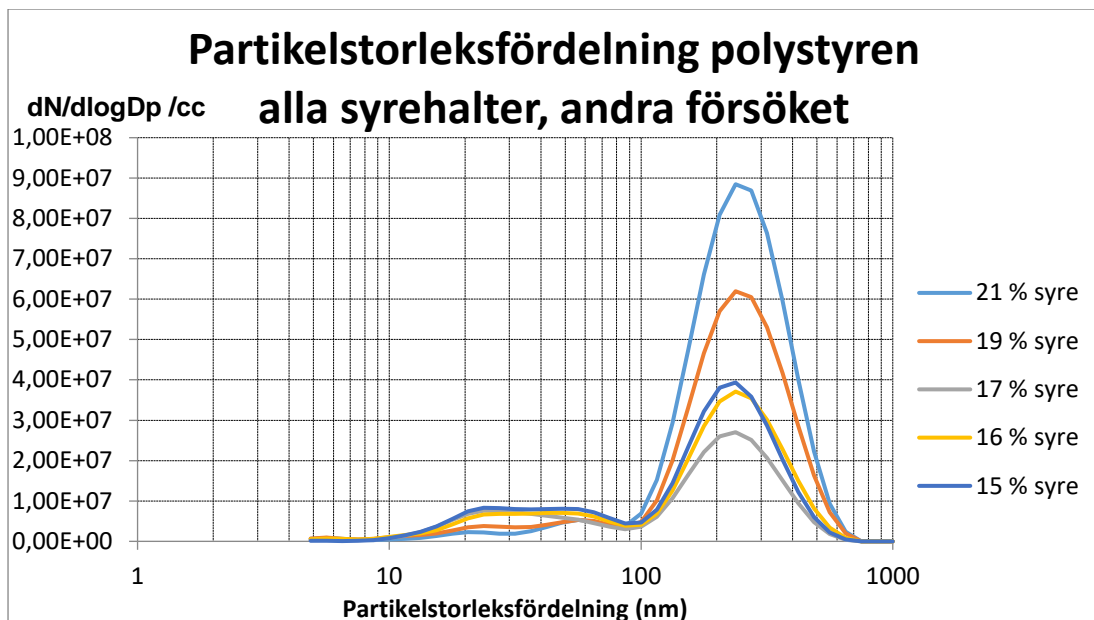
I Figur 15 presenteras resultatet från ett av experimenten, det första försöket vid förbränning av polystyren vid 19 % syre. De andra försöken kan hittas i Bilaga 1 och visade samma allmänna trend, med två olika partikelstorlekar som avges under hela försöket, även om den mindre partikelstorleken tar över mer mot slutet av förbränningen för att till sist vara helt dominerande. Då ingen tidpunkt fanns där enbart den större partikelstorleken kunde analyseras gjordes vid dessa försök en annan uppdelning, den här gången i "stora" och "små" partiklar. För att se var gränsen mellan dessa två koncentrationer går användes Figur 16 och Figur 17 där koncentrationen för hela experimenten presenteras. Gränsen sattes så att små partiklar definieras till <85 nm och stora till >85 nm. Denna uppdelning användes för alla experiment med polystyren. Även genomsnittet för hela försöket beräknades. De beräknade medelstorlekarna på partiklarna presenteras sedan i Figur 18 och Tabell 4.



Figur 15: 19 % syre, försök 1. Förbränning av polystyren. Antänder runt 13:11, slocknar runt 13:15.



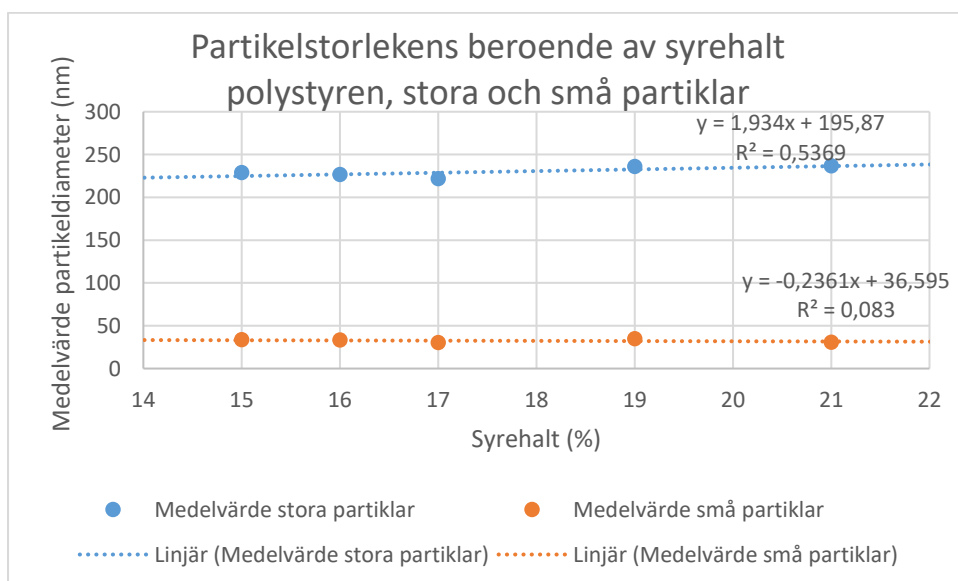
Figur 16: Partikelstorleksfördelningen av polystyren, försök 1, alla syrehalter.



Figur 17: Partikelstorleksfördelningen av polystyren, försök 2, alla syrehalter.

Tabell 3: Medelvärdet av partikelstorlekar (stora > 85 nm, små <85 nm, alla) vid förbränning av polystyren.

Syre (%)	Partikelstorlek stor försök 1	Partikelstorlek stor försök 2	Medelstorlek stor	Partikelstorlek små försök 1	Partikelstorlek små försök 2	Medelstorlek små	Partikelstorlek alla försök 1	Partikelstorlek alla försök 2
21	227.6 nm	245.7 nm	236.7 nm	25.5 nm	35.8 nm	30.6 nm	116.5 nm	218.0 nm
19	225.3 nm	246.5 nm	235.9 nm	37.4 nm	32.1 nm	34.8 nm	182.9 nm	197.7 nm
17	213.6 nm	229.9 nm	221.8 nm	29.6 nm	30.6 nm	30.1 nm	85.9 nm	128.4 nm
16	214.2 nm	238.7 nm	226.5 nm	34.2 nm	32.3 nm	33.2 nm	127.7 nm	149.4 nm
15	-	228.7 nm	228.7 nm	-	33.5 nm	33.5 nm	-	139.3 nm



Figur 18: Partikelstorlekens beroende av syrehalt vid förbränning av polystyren enligt DMS500.

4.2.3 Effektutveckling (HRR)

Här presenteras effektutvecklingen och brinntiden för alla experiment med polystyren i Tabell 4. Man kan se tydliga skillnader även vid samma syrehalt beroende på om materialet brinner kraftigt och snabbt eller mindre och långsamt. Grafer över effektutvecklingen i varje enskilt experiment kan hittas i Bilaga 3.

Tabell 4: Effektutveckling och brinntid för de olika experimenten med polystyren.

Syre	Maximal HRR försök 1	Brinntid försök 1	Maximal HRR försök 2	Brinntid försök 2
21 %	1.3 kW	500 s	2.6 kW	150 s
19 %	2.4 kW	250 s	2.4 kW	140 s
17 %	0.8 kW	450 s	1.6 kW	500 s
16 %	1.5 kW	400 s	1.3 kW	370 s
15 %	(Ingen antändning)	-	1.8 kW	320 s

4.2.4 Analys Polystyren

DMS500mätningarna av polystyren visar upp två distinkt olika partikelstorlekar under hela eller stora delar av brandförloppet, se till exempel Figur 43. Ett medelvärde över hela spektrumet hade därför blivit missvisande. Därför gjordes uppdelningen i små och stora partiklar enligt det minimum som kunde hittas i Figur 16 och Figur 17, 85 nm. Denna uppdelning ger en möjlighet att följa de olika typerna av partiklar och se hur de förändras över tid. En del av de små partiklarna verkar tillta i slutet på förbränningen, medan en del verkar finnas med från start, se till exempel Figur 48. Det är möjligt att detta kan kopplas till den likande uppdelning som sker vid förbränning av polyeten. Jämförande mellan olika ämnen sker i den gemensamma diskussionen efter att alla resultat har presenterats.

Partikelstorlekens beroende av syrehalten som presenteras i Figur 18 visar ett visst beroende om runt 2 nm/procent syre för de stora partiklarna, medan de små partiklarna i princip inte förändras med olika syrenivåer. Värt att notera är också skillnaden i storlek mellan de första och andra försöken som kan ses i Tabell 3. Värdena under det andra försöket är alla runt 20 nm större än under det första försöket. Vad detta beror på är osäkert, men eftersom det enda värdet på 15 % som finns och används som medelvärde kommer från det andra försöket kan detta värde vara överskattat. Om mätningen på 15 % inte räknas med fås ett beroende nära 3 nm/procent syre med ett R^2 -värde på 0.71.

Vilken effektutveckling som avges verkar vara kopplat till vilken av partikelstorlekarna som dominerar. Detta kan ses i de två sista kolumnerna i Tabell 3, där de tre experiment med hög effekt och kort tid (andra vid 21 % syre och andra vid 21 %) har en markant högre medelstorlek på partiklarna än i övriga experiment. Detta tyder på att förbränningsprocessen som ger de större partiklarna dominerar vid högre effektutveckling. Vilken process detta är och hur den skiljer sig från processen som ger mindre partiklar skulle kräva någon form av direkt studie av de olika partiklarna.

4.3 Kartong

4.3.1 Allmänna observationer

Kartongen brann i flera fall långsamt med bara glöd. Det var svårt att avgöra när förbränningen helt hade avstannat, då kartongen en bit ner i provet fortfarande kunde visa upp tecken på glöd även efter att ingen skillnad på vikt hade märkts under flera minuter. Ett asklager bildades också av varje lager kartong som brann, se Figur 19. Under försöket kunde den översta delen av kartongen vikas upp ur provhållaren när den brann, vilket placerade den närmare värmekällan.

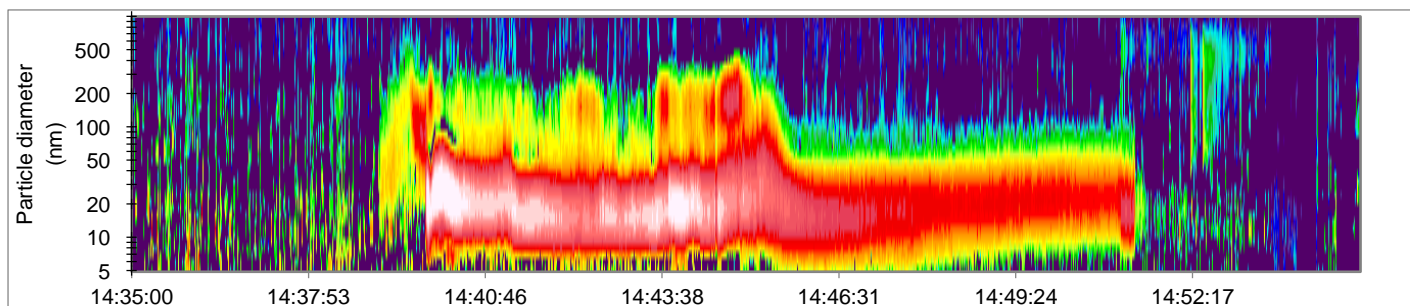
Ett extra försök vid 17 % gjordes vid en högre strålning (30 kW/m^2 i stället för 20 kW/m^2) för att undersöka skillnaden mellan glödande och flammande förbränning.



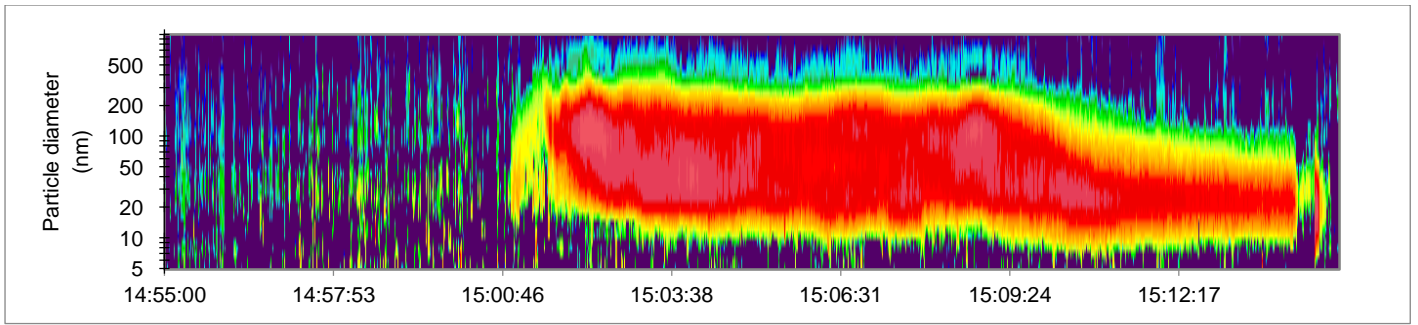
Figur 19: Asklager efter försök med kartong.

4.3.2 Partikelstorleksfördelning

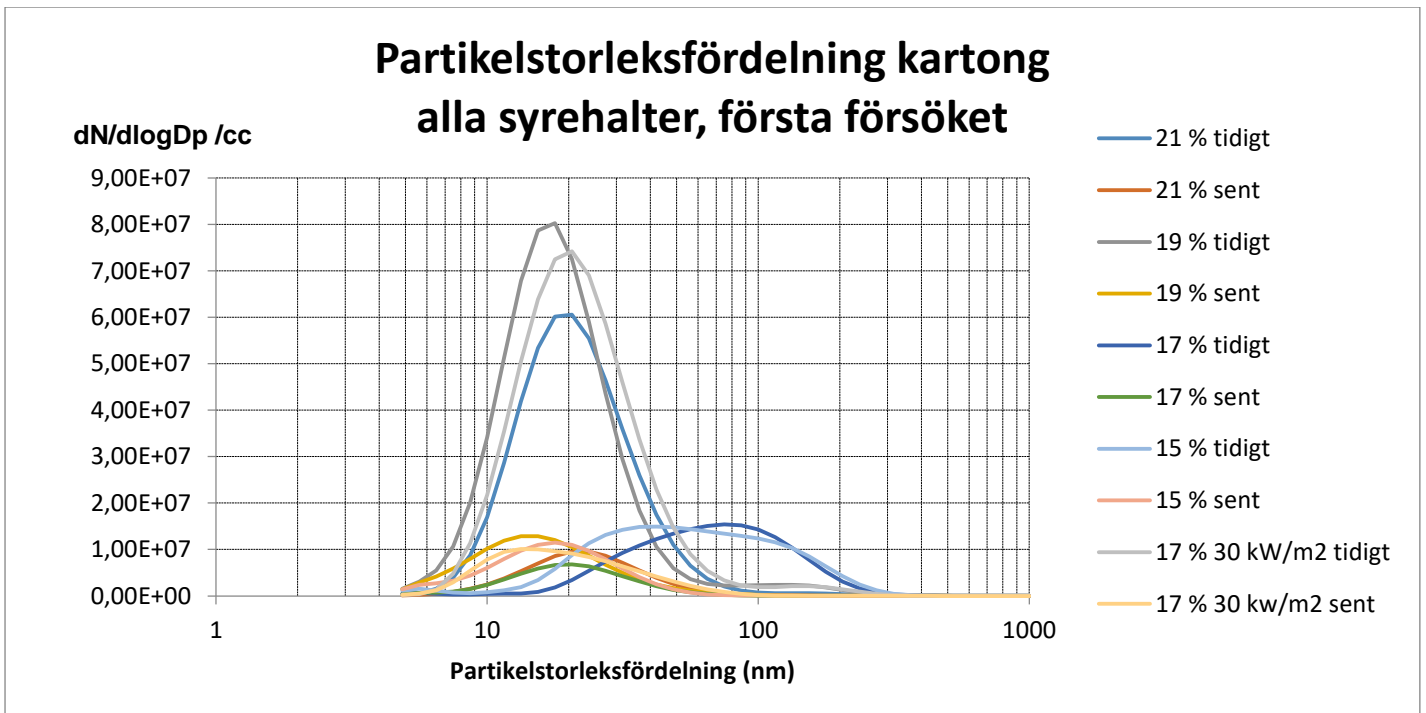
I Figur 20 och Figur 21 är två exempel på typiska resultat vid förbränning av kartong. Ett brett spektrum av partikelstorlekar med bara en topp. Vid vissa experiment började partikelstorleken på ett större värde för att sedan minska, och i andra fall var den mera konstant. En uppdelning gjordes därför här i ett "tidigt" och ett "sent" skede, likt det som gjordes för polyeten. Det tidiga skedet sattes till tiden snart efter antändning och ca 2 minuter framåt, och det sena till ca 2 minuter innan experimentet avbröts och framåt. På detta sett kunde den skillnad i partikelstorlek tidigt och sent som kunde ses i vissa resultat analyseras. Genomsnittstorlekarna för partiklarna med dessa uppdelningar kan ses kvalitativt i Figur 22 och Figur 23 och i mer detalj i Figur 24 och Tabell 5.



Figur 20: 21 % syre, försök 2. Förbränning av kartong. Antänder runt 14:39, slocknar runt 14:51.

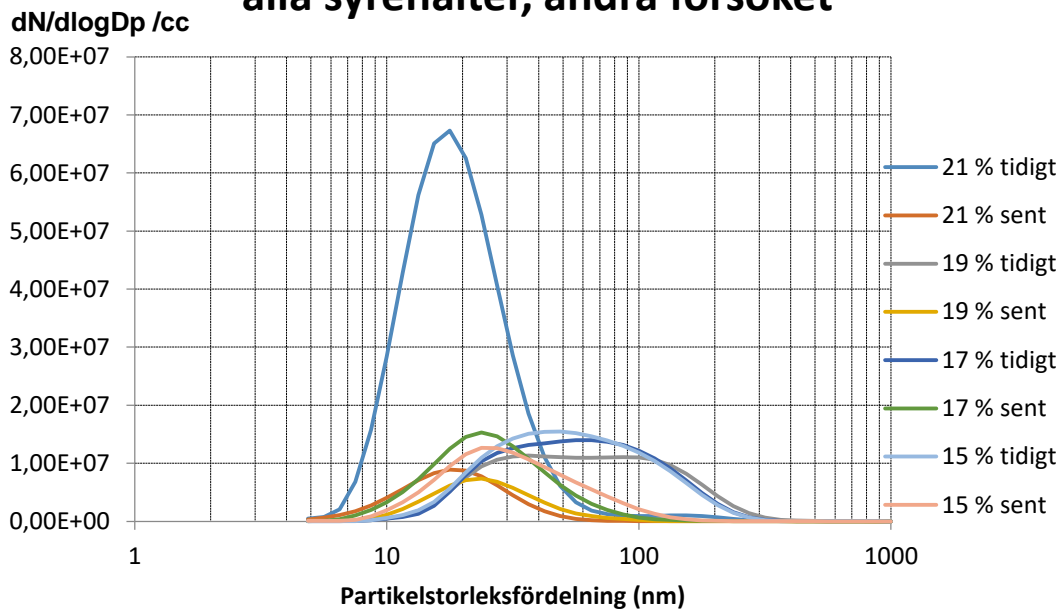


Figur 21: 19 % syre, försök 2. Förbränning av kartong. Antänder runt 15:01, slocknar runt 15:13.



Figur 22: Skillnad i partikelstorlek tidigt mot sent i förbränningen, kartong försök 1, alla syrehalter.

Partikelstorleksfördelning kartong alla syrehalter, andra försöket

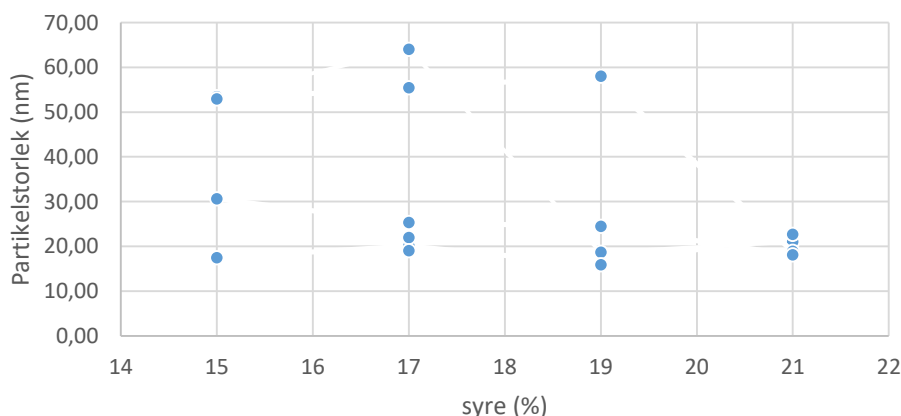


Figur 23: Skillnad i partikelstorlek tidigt mot sent i förbränningen, kartong försök 2, alla syrehalter.

Tabell 5: Fördelningen av partikelstorlekar vid alla experiment med kartong.

Syre (%), effekt om inte 20 kW/m ²	Partikelstorlek tidigt försök 1	Partikelstorlek sent försök 1	Partikelstorlek tidigt försök 2	Partikelstorlek sent försök 2
21	21.0 nm	22.6 nm	18.8 nm	18.0 nm
19	18.6 nm	15.9 nm	58.0 nm	24.5 nm
17, 30 kW/m ²	22.0 nm	19.0 nm	-	-
17	64.0 nm	20.1 nm	55.4 nm	25.3 nm
15	53.42 nm	17.43 nm	52.9 nm	30.1 nm

Fördelning av partikelstorlek kartong, alla försök, tidigt och sent



Figur 24: Fördelningen av partikelstorlekar vid alla experiment med kartong. Två olika typer av partiklar skapas, runt 20 nm och runt 50 nm beroende på om glödande eller flammande förbränning sker.

4.3.3 Effektutveckling (HRR)

Här presenteras effektutvecklingen och brinntiden för alla experiment med kartong i Tabell 6. Man ser en tydlig skillnad på de experiment när kartong brann med en flammande låga (21 %, första med 19 % samt 17 % 30 kW/m²) och resten när endast glödbrand skedde. De flammande bränderna har en kortare brinntid och betydligt högre effekt än glödbränderna.

Tabell 6: Effektutveckling och brinntid för de olika experimenten med kartong.

Syre	Maximal HRR försök 1	Brinntid försök 1	Maximal HRR försök 2	Brinntid försök 2
21 %	0.7 kW	550 s	1 kW	500 s
19 %	1.6 kW	400 s	0.25 kW	750 s
17 %	0.3 kW	650 s	0.25 kW	650 s
17 %, 30 kW/m ²	1.3 kW	300 s	-	-
15 %	0.4 kW	600 s	0.3 kW	600 s

4.3.4 Analys Kartong

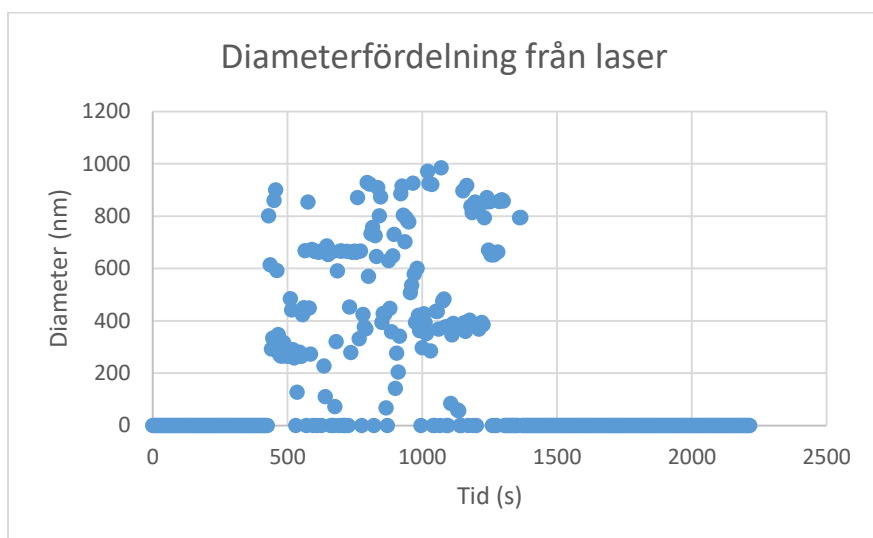
Den tydligaste slutsatsen som kan dras av DMS500data är att den viktigaste faktorn för partikelstorleken är om förbränningen sker flammande (i luft) eller glödande (som ytfenomen). Detta ses tydligt om man jämför Tabell 5 och Tabell 6, där varje försök med en förhållandevis hög effektutveckling (i detta fall >1 kW) har en partikelstorlek som är betydligt lägre än de med lägre effektutveckling. Detta motsvaras av flammande respektive glödande förbränning, vilket bekräftas av observationer av försöken. Skillnaden är markant – runt 60 nm för glödande förbränning mot runt 20 nm för flammande. En intressant effekt är dock att i de senare skedena av förbränning så övergår alla försök till att avge partiklar i storleksordningen 20 nm. Detta kan ses till exempel i Figur 58 och samlat i Figur 22 och Figur 23, där man kan se att det finns en klar skillnad i storleken på partiklar tidigt och sent i förbränningen bara i de fall där det skedde glödande förbränning.

Inga medelvärden presenteras i Tabell 6 för kartong. Anledningen är att skillnaderna mellan glödande och flammande förbränning är så stor att den helt slår ut eventuella övriga förändringar. Sänkt syrehalt är anledningen till att en del av kartongen inte flammade upp, men det är också möjligt att det finns ett ytterligare samband. Om fler mätpunkter med bara flammande eller glödande förbränning hade tagits hade dessa punkter kunnat jämföras för att se om det finns något samband där. Mätpunkterna i denna rapport är för få för det, men en senare undersökning skulle kunna genomföras.

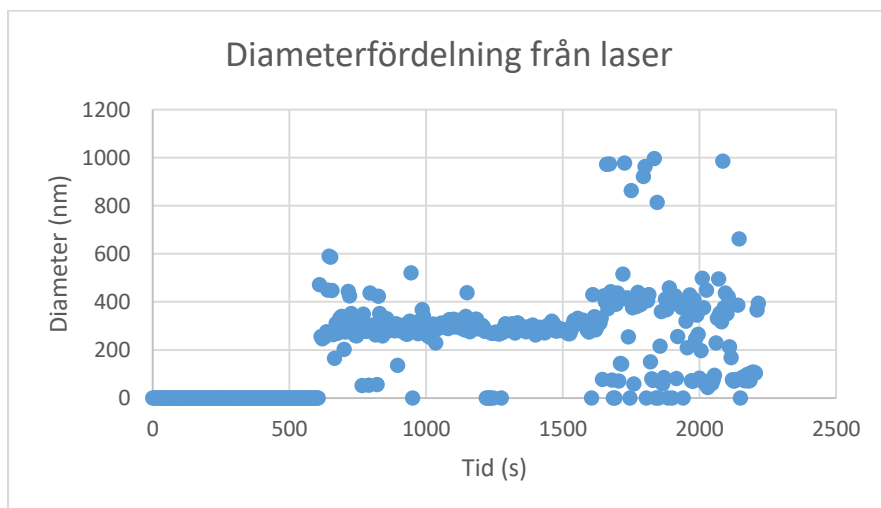
5 Resultat mätningar med laser

Här presenteras resultaten av mätningarna med lasrar med de tre olika våglängder som användes i experimenten i denna rapport. Ingen data samlades in om intensitetsskillnaden för någon av lasrarna var under en procent eller om den beräknade partikelstorleken var större än 1000 nm (visas som nollor i figurerna). Detta för att resultaten skulle vara pålitliga och jämförbara med resultaten från DMS500.

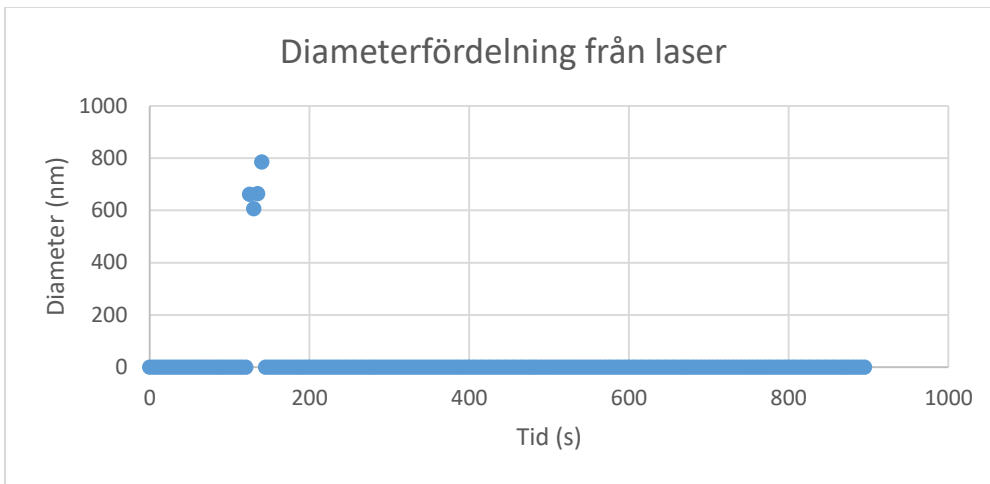
Ett urval av resultaten av lasermätningarna visas i Figur 25 - Figur 27. Som kan ses är spridningen på resultaten alldeles för stor för att ge ett svar om partikelstorleksfördelningen under experimenten. Några möjliga anledningar till detta och andra slutsatser som kan dras av lasermätningarna diskuteras nedan.



Figur 25: 21 % syre, försök 2. Förbränning av polyeten. Antänder runt 550 s.



Figur 26: 19 % syre, försök 2. Förbränning av polyeten. Antänder runt 1210 s.

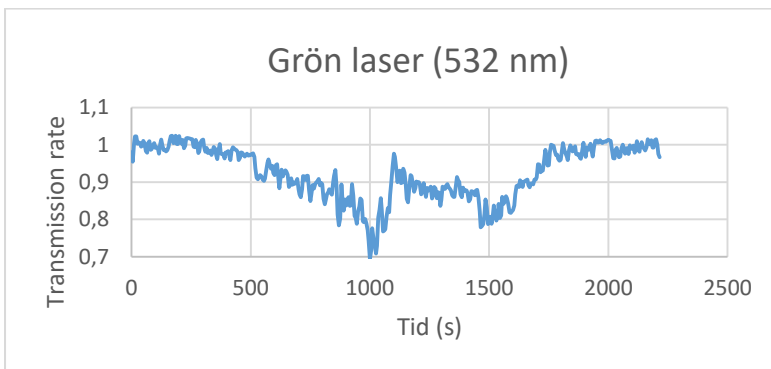


Figur 27: 21 % syre, försök 1. Förbränning av kartong. Antänder runt 150 s.

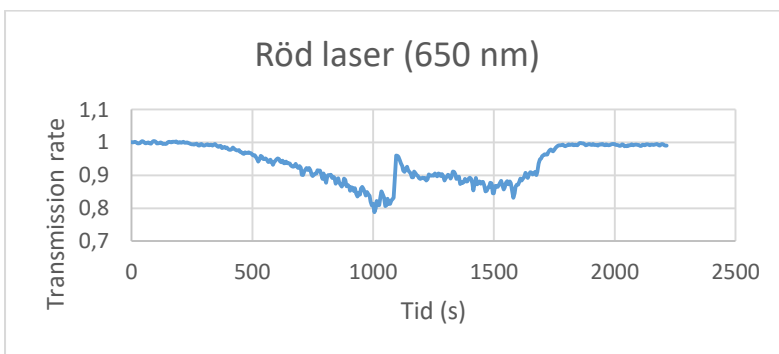
5.1 Analys mätningar med laser

Lasermätningarna är svåra att tolka då det inte finns några klara medelvärden i de flesta av dem. Några av graferna, till exempel Figur 26, verkar visa upp en viss linje i närheten av värdena beräknade av DMS500. Men även här finns det många värden som är betydligt högre än de beräknade, och även den mest samlade linjen i Figur 26 ger ett medelvärde på 275 nm, betydligt högre än de 197 nm beräknade av DMS500. Det finns heller ingen logik i att värdena skiftar så mycket som de gör med en metod som ska ge ett medelvärde av partikelstorlekarna. Den totala effektutvecklingen av experimenten verkar inte heller ha påverkat vilka grafer som blev mer samlade än andra, vilket kan ses om man jämför t.ex Tabell 2 med diverse grafer.

Värdena i transmission rate varierade med flera procent under mätningarna. Exempel på detta visas i Figur 28 och Figur 29. Detta skedde efter databehandlingen som skulle ha hanterat variationer i lasermätningarna som beskrivet i metodkapitlet.



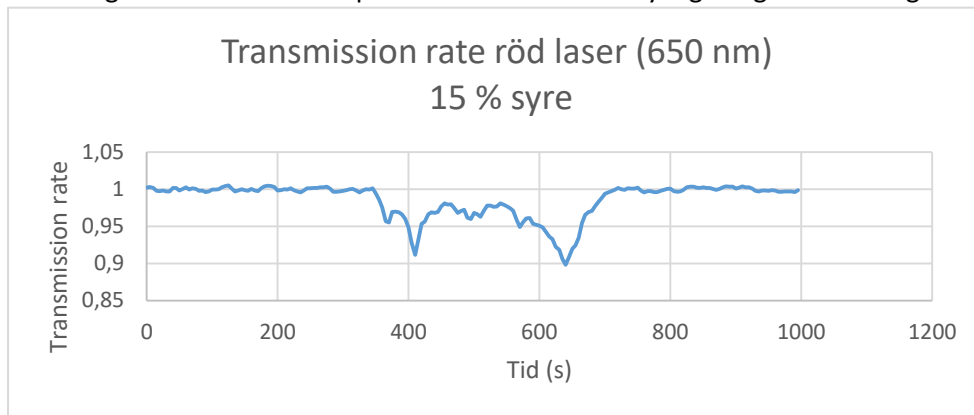
Figur 28: Transmission rate av den gröna lasern, polyeten, 21 % syre, försök 1.



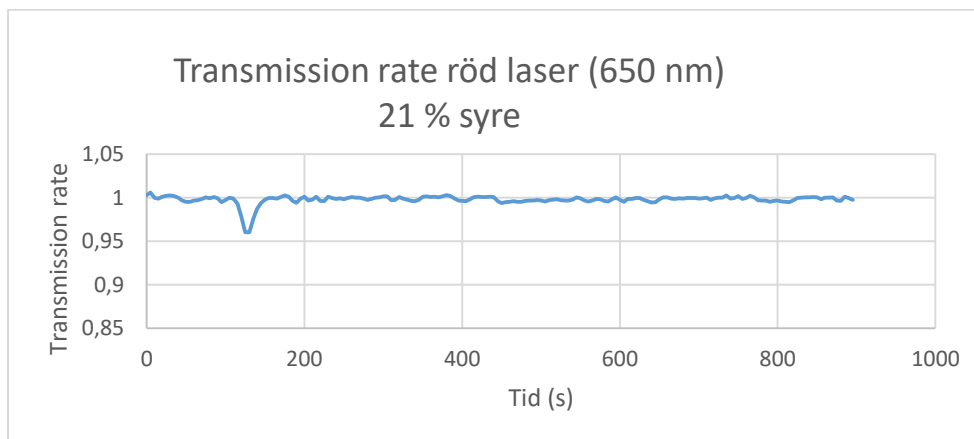
Figur 29: Transmission rate av den röda lasern, polyeten, 21 % syre, försök 1.

Värt att notera i Figur 28 och Figur 29 är den tydliga ökning av transmission rate som sker runt 1100 sekunder, vid antändning av provet. Detta skedde för samtliga lasrar vid alla prov av polyeten, och visar en tydlig förändring inne i röret efter antändning då röken absorberar upp mindre av ljuset. Detta står i kontrast till resultatet från DMS500, som bara visade en ökad koncentration av lika stora partiklar innan som efter antändning.

Mätningarna med laser av kartong gav också en del intressanta resultat. De experiment som fick minst antal godkända mätpunkter (med en transmission rate < 0.99 för alla lasrar, se t.ex Figur 27) var de som brann flammmande. Detta trots att de enligt Tabell 6 hade högst effektutveckling och enligt DMS500data från Figur 50 - Figur 58 också hade högst koncentration av partiklar. Detta kan ses tydligt i Figur 30 och Figur 31.



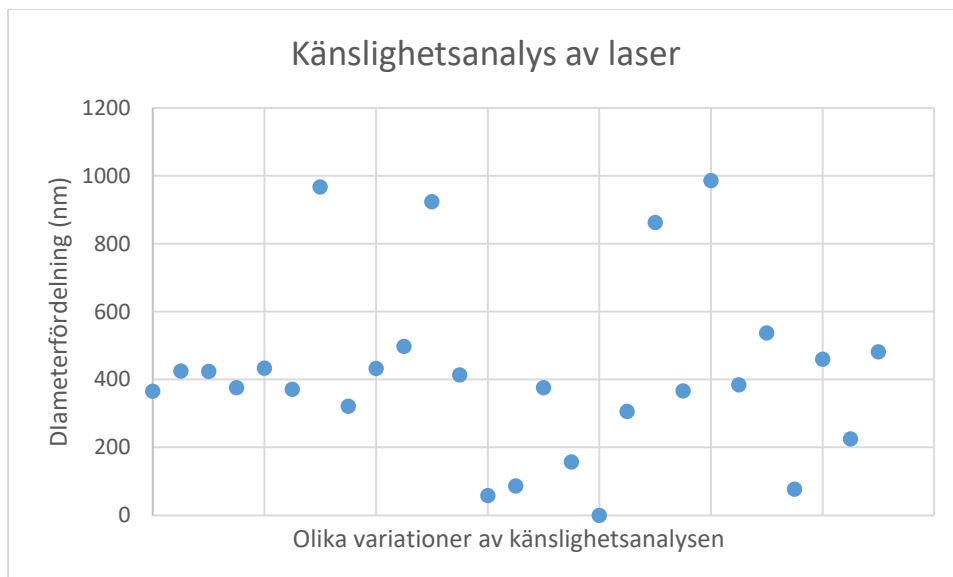
Figur 30: Transmission rate för den röda lasern (650 nm) vid försök 1 15 % syre förbränning av kartong.



Figur 31: Transmission rate för den röda lasern (650 nm) vid försök 1 21 % syre förbränning av kartong.

5.2 Känslighetsanalys av lasermätning

Här presenteras en beskrivning av resultatet av den känslighetsanalys som gjordes av lasermätningarna som presenterats i metodkapitlet. I Figur 32 presenteras resultatet när den gröna lasern varierades med $\pm 3\%$, den röda lasern med $\pm 0.5\%$ och den infraröda lasern med $\pm 1.5\%$, samt alla variationer av dessa värden. Diametern enligt det ursprungliga värdet var 365 nm, medan medelvärdet av alla punkter hamnade på 421 nm. Detta är utan att ta hänsyn till den punkt som nollats för att värdet blivit över 1000, vilket betyder att medelvärdet utan att göra en sådan utrensning skulle vara ännu högre.



Figur 32: Känslighetsanalys av lasermätningarna. Den första punkten är de ursprungliga värdena, resten är någon variation som beskrivits ovan.

6 Diskussion

6.1 Partikelstorlek

Experimenten med DMS500 visade att partikelstorleken vid förbränning av polyeten och polystyren påverkas av syrehalten i luften, dock bara med enstaka procent. Eftersom den nedre brännbarhetsgränsen för dessa ämnen ligger runt de 15 % syre som experimenten gick ned till (Zhou, Xin, & Dorofeev, 2019) är det antagligen sällan förändringen i den första fasen av förbränningen kommer vara aktuell att ta hänsyn till.

En mer tydlig skillnad i partikelstorlek skedde vid övergången mellan olika typer av förbränning. Skillnaden i partikelstorlek för kartong mellan glödande och flammade förbränning är stor, runt 2-3 gånger större partiklar. Detsamma gäller förbränningen av plaster i det senare skedet, där partikelstorleken går från 200-300 nm ned till 20-30 nm. Detta har tidigare setts i vissa experiment (Helsper, Fissan, Muggli, & Scheidweiler, 1980) men inte i andra (Xie, Yuan, Song, & Zhang, 2007). Även vid glödande förbränning av kartong går den senare förbränningen ned till runt 25 nm (se Tabell 5). Att alla dessa värden ligger inom 10 nm från varandra trots olika ämnen kan tyda på antingen någon form av liknande partiklar som bildas vid långsam förbränning, någon typ av gemensam felkälla i uppställningen (som föroreningar av provkroppen som avdunstar när ämnet som provas börjar ta slut), eller ren slump. Experiment som undersöker den kemiska sammansättningen av dessa partiklar skulle behövas för att få svar på om det finns något samband mellan dem. Experimentet av Goo visar att olika förbränningsförutsättningar kan ha stora konsekvenser för vilken typ av partiklar som bildas, vilket skulle kunna vara en förklaring till det som kan ses i dessa resultat (Goo, 2015).

Att partiklarna inte ändrade storlek vid antändning var oväntat. Resultatdelen vid förbränning av framförallt polyeten visar detta tydligt, då det ämnet tog längst tid på sig att antända och hade en lång period där bara pyrolysgaser avgavs. Samtidigt visar data från lasrarna att transmission rate ökar markant precis vid antändning (se resultatdelen för lasermätningarna och Figur 28 - Figur 29), och detta gäller för alla ämnen. En förändring sker alltså i partiklarna vid antändning som gör att de släpper igenom mer ljus, men förändringen verkar inte vara en storleksförändring. Transmission rate fortsätter nedåt efter ökningen vid antändning, vilket stämmer bra överens med koncentrationsökningen som samtidigt syns i DMS500. Vad som händer med partiklarna vid antändning går dock inte att säga från dessa resultat.

Partiklarna med mindre storlekar som avgavs av både polystyren och polyeten kan också vara överdrivna av småskaligheten i dessa experiment. Något steady-state uppnås aldrig under dessa prover, vilket kan ses i effektutvecklingskurvorna i Bilaga 3. Man kan också se i resultatdelarna för de båda ämnena att vid högre effektutveckling tar de större partiklarna över mer och mer. De tidigare experimenten i större skalor har gett olika resultat i denna fråga. Experimenten av Helsper, Fissan, Muggli och Scheidweiler visade en bimodal fördelning med en topp precis runt 25 nm, vilket är mycket likt de värden som uppmätts i detta experiment (Helsper, Fissan, Muggli, & Scheidweiler, 1980). Men i experimenten av Xie, Yuan, Song och Zhang syns denna topp inte längre. Detta trots att experimenten var mycket lika varandra, med samma ämnen och storskalighet (Xie, Yuan, Song, & Zhang, 2007). Fler storskaliga tester skulle behövas för att svara på om dessa mindre partiklar är en betydande faktor i större bränder eller inte.

6.2 Felkällor DMS500

En betydande osäkerhet vid dessa experiment har varit antalet prover som tagits vid varje syrehalt. Valet att göra två prover i stället för fler för varje nivå var en nödvändig begränsning på grund av tidsbrist, men det skapar en stor osäkerhet i medelvärden som beräknas. Detta blir särskilt uttalat vid de prover som betedde sig olika under de två proven. Exempel här är polystyren 15 % syre som bara antände andra gången, och kartong 19 % syre som glödde en gång och flammade en annan. Det gör också att resultaten blir mer utsatta för handhavandefel, som när ett prov avbryts för tidigt.

Under analysen av data från DMS500 gjordes ett antal uppdelning i tidig och sen förbränning, samt uppdelning i små och stora partiklar för de fall där flera typer av partiklar skapades samtidigt. Dessa uppdelningar var inte alltid självklara att göra då olika stadier av förbränning ibland gick in i varandra utan att ge en tidsperiod där en typ var helt dominerande. Detta kan ha skapat fel som över – eller underskattade vissa värden.

Syremätarna som användes för att kontrollera nivåerna inuti CACC-kammaren tenderade också att förlora sin kalibrering under dagen. Detta kan ha lett till att syrehalterna för experiment under den senare delen av dagen utfördes under något högre syrehalt än planerat. Inga kalibreringsfel över runt 0.2 % uppmättes dock någonsin, och då flödena som motsvarade rätt syrehalt var kända och konstanta bör dessa problem ha upptäckts under inställning av syrehalt innan varje experiment började.

Totalt sett ger dessa fel en osäkerhet i enskilda medelvärden av partikelstorlekar vid varje syrehalt. Dock anses det att trenden med svagt minskande partikelstorlek vid lägre syrehalt är tydlig nog för att felet inte bör kunna ha påverkat den mycket nog för att ändra det övergripande resultatet.

6.3 Lasermätning

Lasermätningarna var inte stabila nog för att kunna dra några slutsatser om partikelstorlek för något av ämnena. Känslighetsanalysen i rapportdelen visar hur mycket resultatet kan variera med de variationer i lasrarna som uppmätts. Den visar också ett mönster som påminner om flera av de uppmätta spridningarna av uträknade partikelstorlekar – ett band i mitten med flera punkter både högre och lägre.

En trolig anledning till de svårtydda resultaten av lasermätningarna är variationer i lasrarnas transmission rates. Särskilt den gröna lasern varierade kraftigt, vilket kan ses om man jämför Figur 28 och Figur 29. Den röda lasern varierar mycket mindre i jämförelse med den gröna, som varierar upp till 3 % även den första tiden då ingen förbränning sker (det vill säga innan provet ens har placerats i kalorimetern). Att de olika lasrarna varierade olika mycket är också en indikation på att variationen berodde på de enskilda lasrarna snarare än ett mer generellt fel.

Det går inte att säga att stabilare lasrar hade varit nog för att få fram bra resultat i dessa mätningar, men känslighetsanalysen visar att instabiliteten i lasrarna är nog för att skapa den här typen av osäkerhet i resultatet. Varför lasrarna varierade så pass mycket i sina transmission values är osäkert. Varje variation i styrkan på lasern bör ha hanterats av beräkningarna så länge båda delarna av den splittrade strålen påverkas lika mycket. Djupare analys av lasrarnas felkällor ligger utanför rapportens avgränsningar, men bör undersökas vid eventuella framtida försök.

En annan möjlig anledning till lasermätningarnas tveksamhet är den mindre koncentrationen av mindre partiklar som bildades samtidigt som de större partiklarna enligt DMS500-mätningarna (se till exempel Figur 10). Teorin bakom lasermätningarna antar en normalfördelad partikelstorleksfördelning, vilket inte är det vi har med en bimodal fördelning av partikelstorleken under experimenten med polyeten och polystyren (Bohren & Huffman, 1998).

Den skillnad i transmission rate vid förbränning av kartong som visas i Figur 30 och Figur 31 visar en begränsning på lasermätningarna. De tyder på att lasermetoden – även om den kan stabiliseras nog för att ge bra resultat för vissa partikelstorlekar – inte skulle klara av att mäta koncentrationer av partiklar mindre än en viss storlek. Detta kan jämföras med Darkos resultat, som visade att en 650 nm laser inte kunde mäta partiklar mindre än runt 100 nm (Perović, 2018). I detta experiment gav lasern utslag på glödande men inte flammande förbränning. I Figur 22 kan man se att vid flammande förbränning finns partiklar upp till cirka 90 nm med, men dessa detekteras alltså inte. Figur 30 kan också jämföras med Figur 54, där man ser resultatet för mätningen med DMS500 för samma experiment. Här kan man se att efter ca 6 minuters förbränning (den tid som lasern ger utslag) minskar storleken på de uppmätta partiklarna ned till under 100 nm. Detta sammanfaller med att lasern slutar detektera partiklar i röret. Detta är ännu ett tecken på att gränsen för detekterbarhet går någonstans runt 100 nm, vilket stämmer överens med Darkos resultat.

Det är dock ändå oklart vid vilka storlekar mätmetoden med laser skulle vara användbar. Kartong hade enligt DMS500-mätningarna ett medelvärde på runt 60 nm vid glödande förbränning, men på grund av dess breda spektrum fanns tillräckligt många partiklar ändå över 100 nm för att kunna detekteras av lasern. Dock finns det i denna fördelning många partiklar också under 100 nm som antagligen inte detekteras, vilket gör att den uppmätta transmission rate antagligen är för låg, vilket skulle kunna ge missvisande resultat. Hur stor del av spektrumet som kan ligga utanför mätbarhetsområdet för lasern för att den ändå skulle ge tillräckligt noggranna resultat får undersökas i ett framtida experiment.

7 Möjliga framtida projekt

Flera olika utvecklingsmöjligheter och öppningar för framtida projekt har identifierats under arbetet med denna rapport. Här presenteras först några projekt för mätningar med DMS500 eller liknande, och sedan möjliga projekt för att undersöka möjligheterna att utveckla lasermätningarna framåt.

Som berörts i avsnitten ovan skulle variationer kunna göras för att kontrollera olika faktorer för partikelstorleksförändring vid lägre syrehalt. Mer storskaliga test hade kunnat undersöka hur viktig den senare förbränningen är, medan mer detaljerade test hade kunnat fokusera på vad skillnaden är mellan de olika förbränningsprodukterna och varför bara de större partiklarna verkar påverkas av lägre syrehalt. Andra typer av ämnen hade också varit intressant att undersöka, med fokus på till exempel brännbara vätskor eller icke-kolbaserade ämnen. Detta hade kunnat ge större insikt i hur allmängiltiga de fenomen som beskrivits i denna rapport är. En jämförande undersökning av den senare förbränningen av olika ämnen hade också varit givande för att undersöka om det finns något samband mellan de små partiklar som syntes vid alla de olika ämnena. Flera av dessa undersökningar skulle kräva tillgång till någon form av analysverktyg för att titta direkt på uppbyggnaden av partiklarna som bildas.

När det kommer till lasermätningarna skulle den utvecklade matlabkoden, se Bilaga 4, kunna användas för att variera antalet lasrar, våglängderna av dem och osäkerheten i transmission values. Genom att testa olika kombinationer skulle en teoretisk grund till hur många och hur noggranna lasrar som behöver användas för att få ett tillräckligt säkert resultat kunna skapas. Denna nya kombination av lasrar skulle sedan kunna testas i experiment liknande de som utförts i denna rapport för att undersöka om mätmetoden fungerar vid tidsberoende intensitet av partiklar.

Det är också möjligt att utföra liknande tester under förbränning som sker vid ett steady-state. Då proverna här varierade för mycket över tid var det inte möjligt att ta något medelvärde, men vid en stabil brand skulle detta vara ett alternativ. Detta skulle då likna experimentet gjort av (Cashdollar, Lee, & Singer, 1979), och skulle framför allt undersöka hur bra optimeringsmetoden med matlab presenterad av (Wilkens Flecknoe-Brown & van Hees, 2015) fungerar.

Till slut skulle begränsningarna för lasrar kunna undersökas noggrannare med utgångspunkt i de observationer som gjordes vid försöken med kartong ovan. Att lasrarna inte mätte upp någon sänkning i transmission value vid den flammande branden med partiklar runt 20 nm skulle kunna undersökas vidare. Frågeställningar som "Var går storleksgränsen för att kunna mäta partiklar med laser?", "Hur hög koncentration behövs vid olika partikelstorlekar?" eller "Beror mätningmöjligheterna bara på partikelstorlek eller också vilka ämnen som förbränns, och i så fall vilka?" skulle kunna vara grund för framtida projekt.

8 Slutsats

Polyeten avgav under tidiga skeden av förbränning partiklar med storlek omkring 200 nm och polystyren partiklar omkring 230 nm. Ett samband mellan syrehalt och partikelstorlek uppmäts för Polyeten (ca 4 nm/procent) och polystyren (ca 2 nm/procent). Vid senare skeden av förbränningen övergår partikelstorleken till mindre partiklar runt 20-30 nm som inte verkar förändras med minskad syrehalt. Kartong uppvisade flammande förbränning till mellan 17 och 19 % syre, och glödande därefter. Flammande förbränning gav en partikelstorlek runt 25 nm och glödande runt 60 nm.

Lasermätningarna gick inte att använda för att bestämma partikelstorlek, antagligen på grund av för stora variationer i lasrarna eller för litet spann på lasrarnas våglängder. En matlabkod har dock tagits fram som kan användas för att undersöka vilka variationer, våglängder eller antal lasrar som skulle behövas för att kunna undersöka tekniken närmare i ett annat projekt. Flera andra förslag till framtida projekt har också tagits fram.

9 Referenser

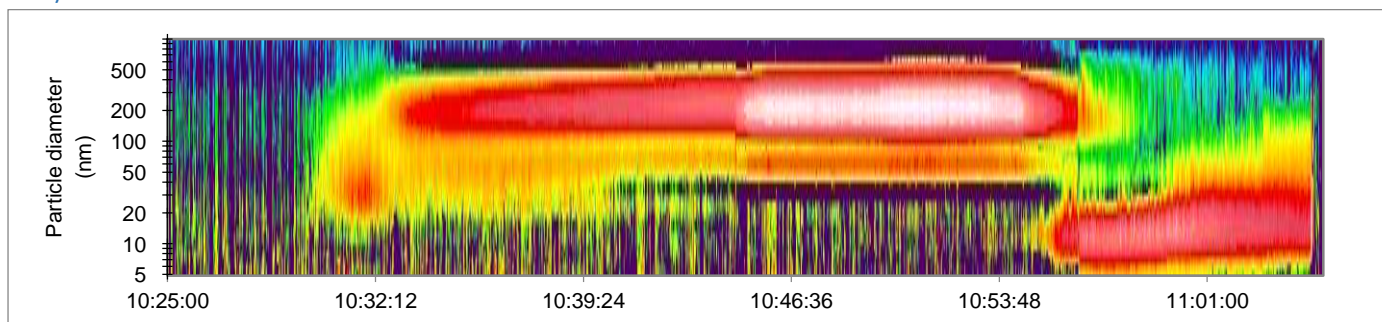
- Bohren, C. F., & Huffman, D. R. (1998). *Absorption and Scattering by a Sphere*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Cambustion Ltd. (2015). *DMS500 Fast Particulate Analyzer User Manual*. Cambridge: Cambustion Ltd.
- Cashdollar, K. L., Lee, C. K., & Singer, J. M. (1979). Three-wavelength light transmission technique to measure smoke particle size and concentration. *Applied Optics Vol. 18, Issue 11*, 1763-1769.
- Cbannel, J. K., & Hanna, R. J. (2013). Experience with Light Scattering Particle Counters. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 386-400.
- Floyd, J., Overholt, K., & Ezeoye, O. (2014). Soot Deposition and Gravitational Settling Modeling and the Impact of Particle Size and Agglomeration. *Fire Safety Science - Proceedings fo the Eleventh International Symposium*, (ss. 376-388).
- FM Global. (2020). *Incidental Storage of Plastics in Non-Storage Areas*. Norwood: Fm Global.
- Goo, J. (2015). Study on the real-time size distribution of smoke particles for each fire stage by using a steady-state tube furnace method. *Fire Safety Journal, Volume 78*, 96-101.
- Gorbunov, B., Priest, N. D., Muir, R. B., Jackson, P. R., & Gnewuch, H. (2009). A Novel Size-Selective Airborne Particle Size Fractionating Instrument for Health Risk Evaluation. *The Annals of Occupational Hygiene*, 53, 225-237.
- He, X., Reponen, T., McKay, R. T., & Grinshpun, S. A. (2013). Effect of Particle Size on the Performance of and N95 Filtering Facepiece Respirator and a Surgical Mask at Various Breathing Conditions. *Aerosol Science and Technology*, 47:11, 1180-1187.
- Helsper, C., Fissan, H., Muggli, A., & Scheidweiler, A. (1980). Particle number distributions of aerosols from test fires. *Journal och Aerosol Science, Volume 11, Issues 5-6*, 439-446.
- Leonard, L., Bowditch, P., & Dowling, V. (2000). Development of a controlled-atmosphere cone calorimeter. *Fire and Materials, Volume 24, Issue 3*, 143-150.
- Liu, B., Pui, D., & Kapadia, A. (1976). Electrical aerosol analyzer: history, principle, and data reduction. *Aerosol measurement workshop*. Gainesville, LF, USA: Minnesota Univ, Dept. of Mechanical Engineering.
- Nilsson, C., & Hersner, M. (2021). *Brandfarliga vätskor i syrereducerade miljöer*. Lund: Brandteknik, Lunds tekniska högskola.
- Nilsson, M., & van Hees, P. (2013). Advantages and challenges with using hypoxic air venting as fire protection. *Fire and Materials*, 38:5, 559-575.
- Perović, D. (2018). *Identification and characterization of design fires to be used in performance-based fire design of CERN facilities*. Lund: Lund University.
- Reavell, K., Hands, T., & Collings, N. (2002). A Fast Response Particulate Spectrometer for Combustion Aerosols. *Journal of Fuels and Lubricants, Vol. 111, Section 4.*, 1338-1344.
- SSI. (2019). *SSI-ISO 5660-1*. Stockholm: Swedish Standard Institute.
- SSI. (2020). *SSI-ISO 5660-5*. Stockholm: Swedish Standard Institute.
- Wang, S. C., & Flagan, R. C. (1990). Scanning Electrical Mobility Spectrometer. *Aerosol Science and Technology, volume 13, issue 2*, 230-240.
- 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, Volume 28, Issue 2*, 204-226.

- Wilkens Flecknoe-Brown, K., & van Hees, P. (2015). Obtaining additional smoke characteristics using multi-wavelength light transmission measurements. *Fire and Materials 2015 - 14th International Conference and Exhibition, Proceedings* (ss. 136-148). San Francisco: Interscience Communications Ltd.
- Xie, Q., Yuan, H., Song, L., & Zhang, Y. (2007). Experimental studies on time-dependent size distributions of smoke particles of standard test fires. *Buildning and Environment, Volume 42, Issue 2*, 640-646.
- Zhou, X., Xin, Y., & Dorofeev, S. (2019). Evaluation of an oxygen reduction system (ORS) in large-scale fire tests. *Fire Safety Journal, Volume 106*, 29-37.

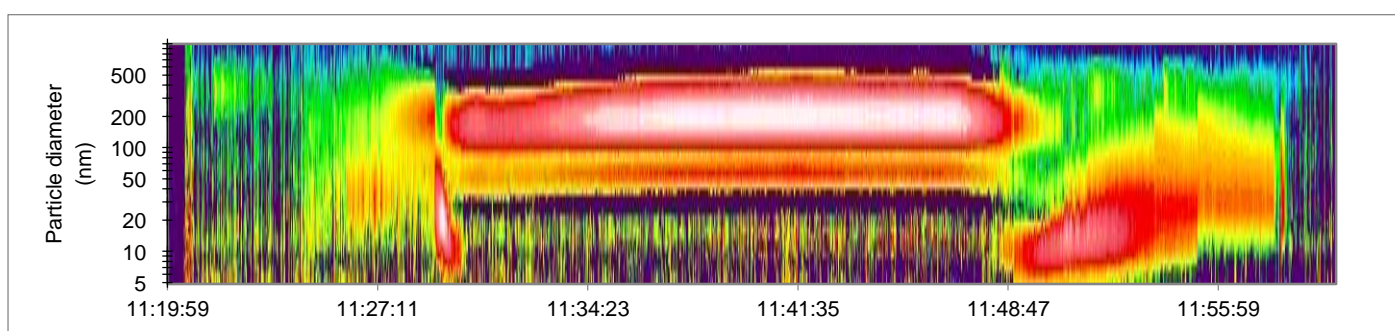
Bilaga 1 – Mätningar av partikelstorlek med DMS500.

I denna bilaga presenteras partikelstorleksmätningarna med DMS500 för alla utförda experiment. Ordningen är polyeten, polystyren, kartong, var och en visar först försök 1 och sedan försök 2. För information om hur figurerna ska tolkas och detaljer om "suddigheten" och annat hänvisas till kapitel 4 i rapporten.

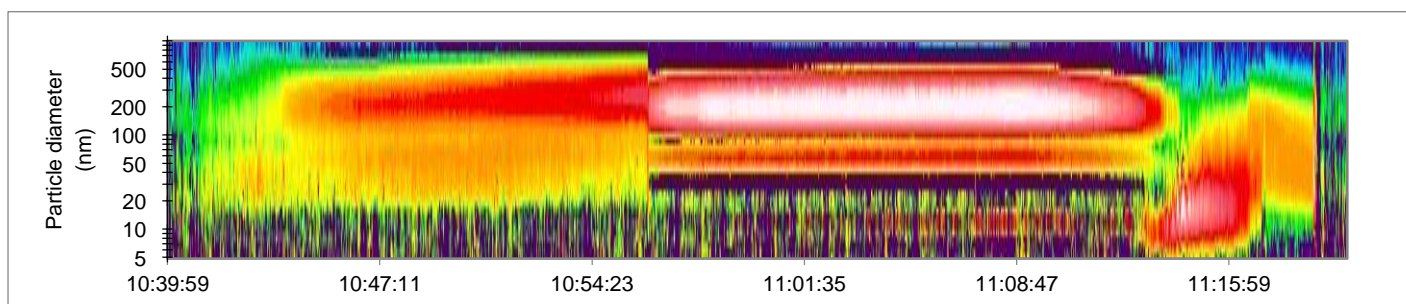
Polyeten



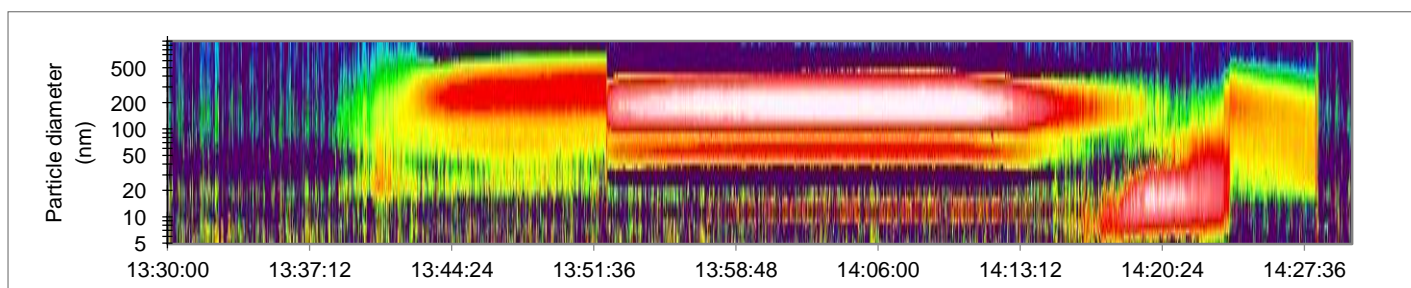
Figur 33: 21 % syre, försök 1. Förbränning av polyeten. Antänder runt 10:40, slocknar runt 10:54.



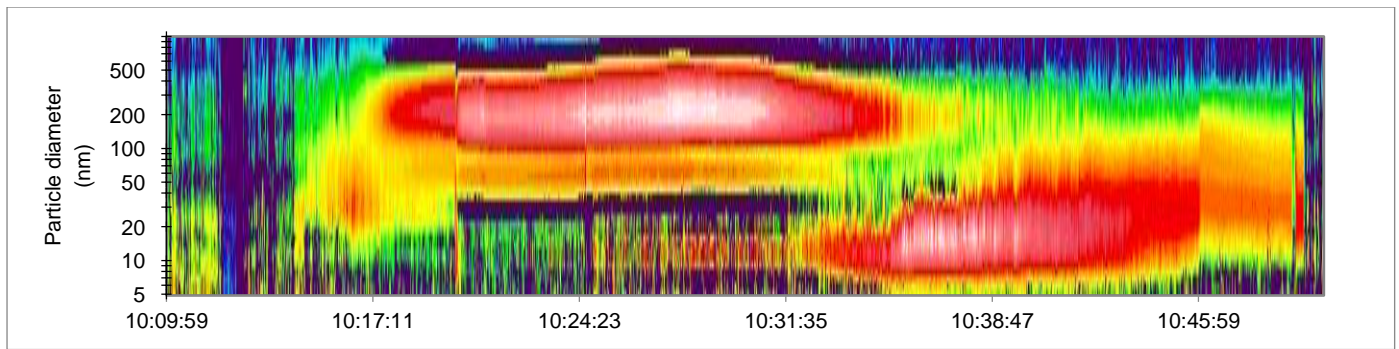
Figur 34: 19 % syre, försök 1. Förbränning av polyeten. Antänder runt 11:30, slocknar runt 11:53.



Figur 35: 17 % syre, försök 1. Förbränning av polyeten. Antänder runt 10:50, slocknar runt 11:10.



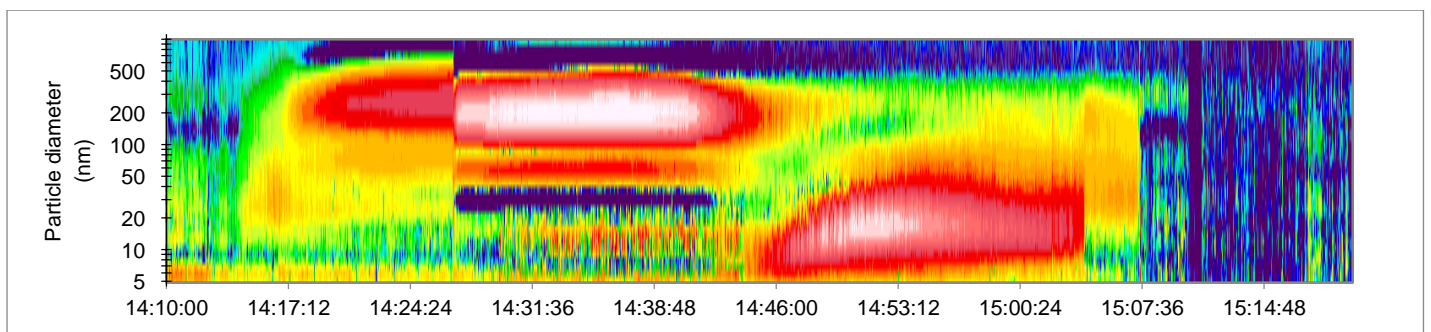
Figur 36: 15 % syre, försök 1. Förbränning av polyeten. antänder runt 13:50, slocknar runt 14:22.



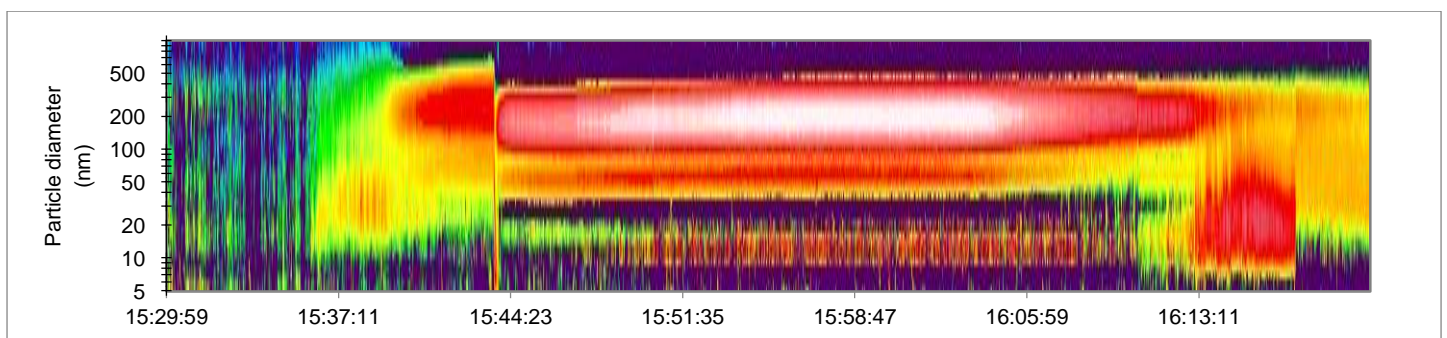
Figur 37: 21 % syre, försök 2. Förbränning av polyeten. Antänder runt 10:18, slocknar runt 10:45.



Figur 38: 19 % syre, försök 2. Förbränning av polyeten. Antänder runt 11:25, slocknar runt 11:48.

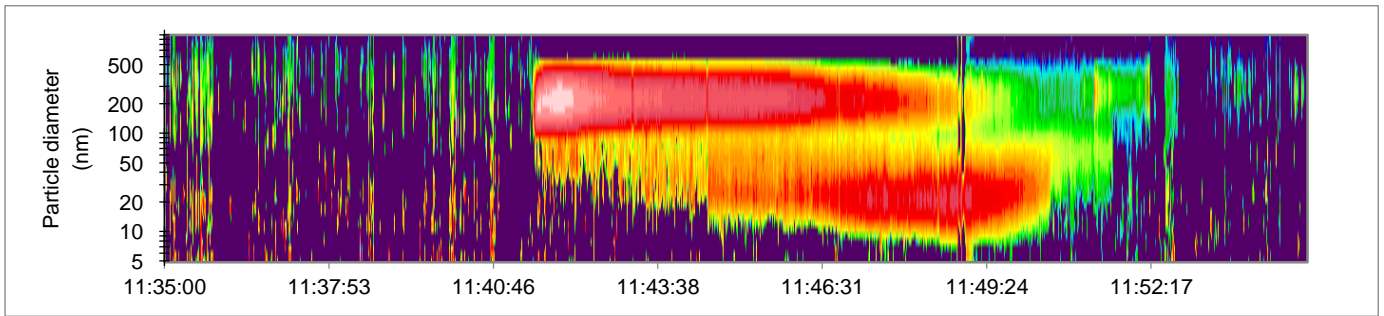


Figur 39: 17 % syre, försök 2. Förbränning av polyeten. Antänder runt 14:30, slocknar runt 15:05.

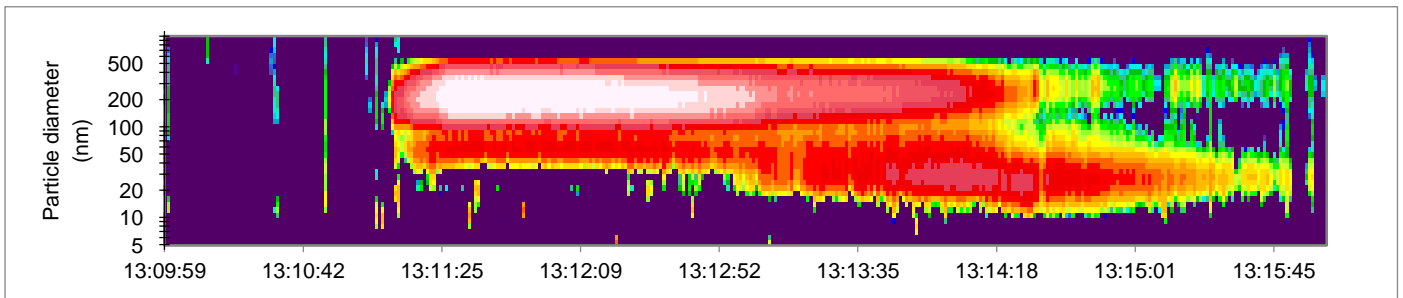


Figur 40: 15 % syre, försök 2. Förbränning av polyeten. Antänder runt 15:45, slocknar runt 16:17.

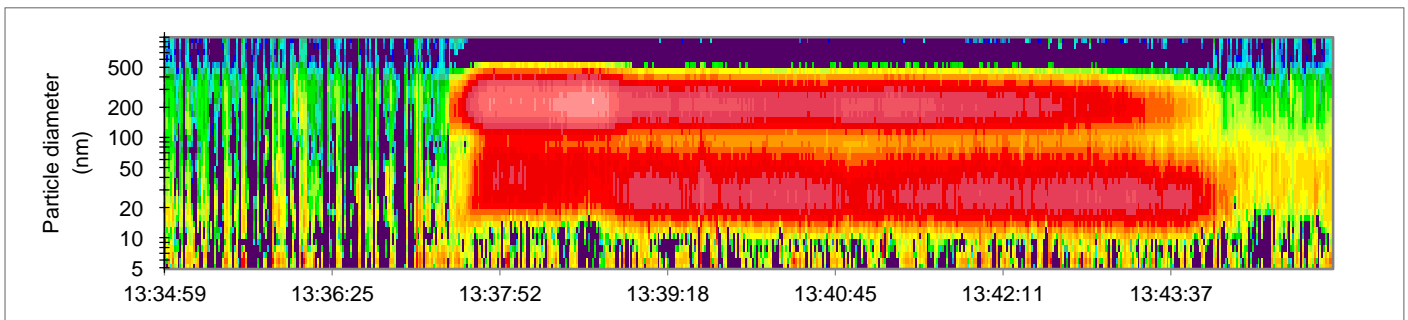
Polystyren



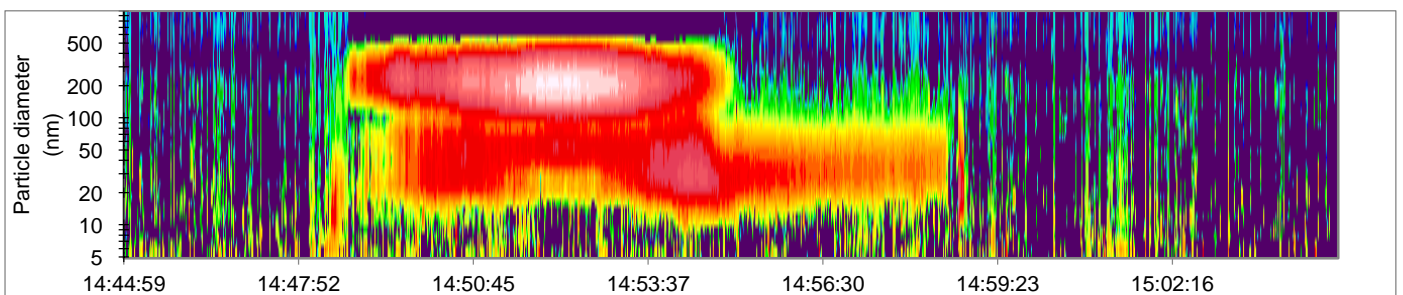
Figur 41: 21 % syre, försök 1. Förbränning av polystyren. Antänder runt 11:41, slocknar runt 11:50.



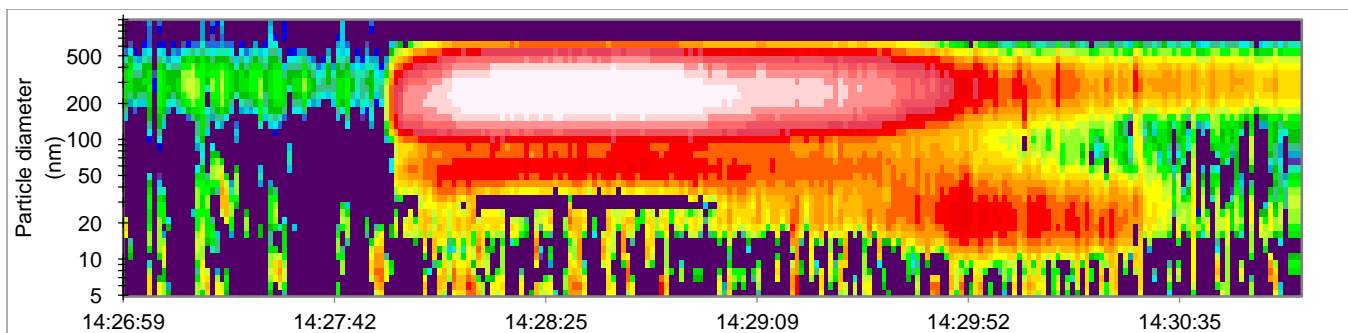
Figur 42: 19 % syre, försök 1. Förbränning av polystyren. Antänder runt 13:11, slocknar runt 13:15.



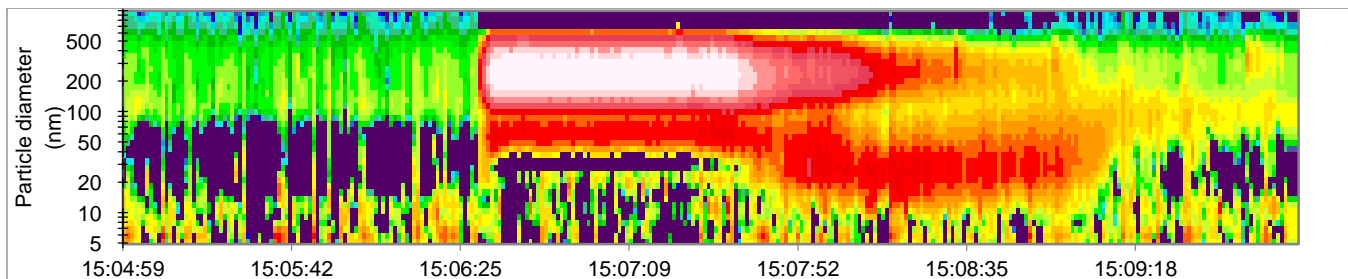
Figur 43: 17 % syre, försök 1. Förbränning av polystyren. Antänder runt 13:37, slocknar runt 13:44.



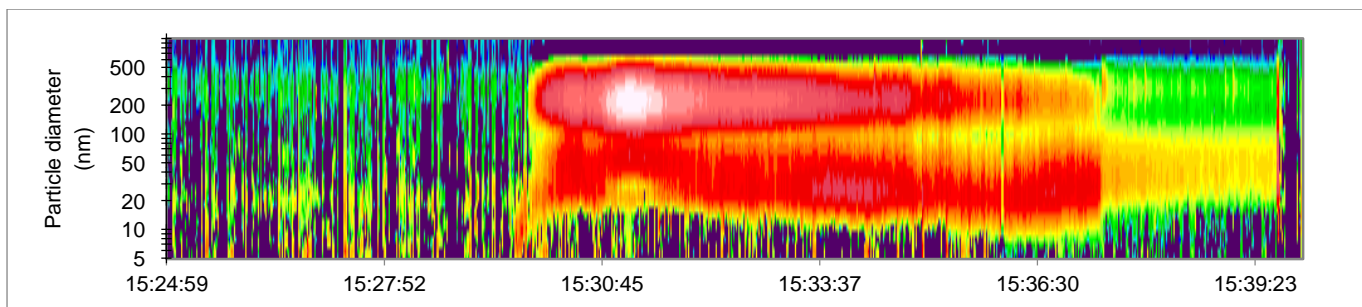
Figur 44: 16 % syre, försök 1. Förbränning av polystyren. Antänder runt 14:49, slocknar runt 14:58.



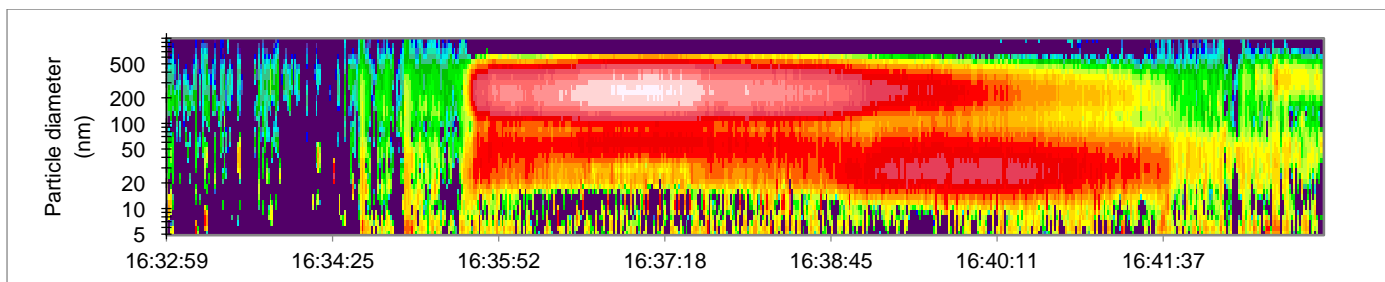
Figur 45: 21 % syre, försök 2. Förbränning av polystyren. Antänder runt 14:28, slocknar runt 14:30.



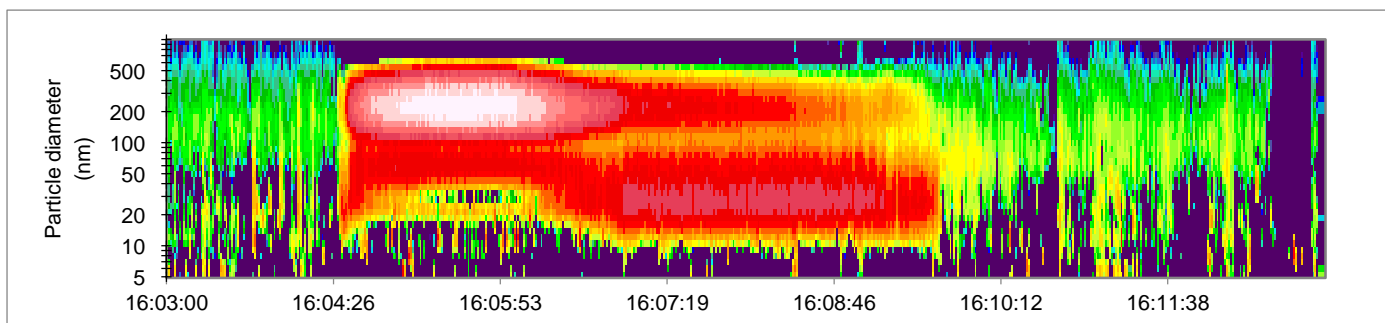
Figur 46: 19 % syre, försök 2. Förbränning av polystyren. Antänder runt 15:06:30, slocknar runt 15:09.



Figur 47: 17 % syre, försök 2. Förbränning av polystyren. Antänder runt 15:30, slocknar runt 15:39.

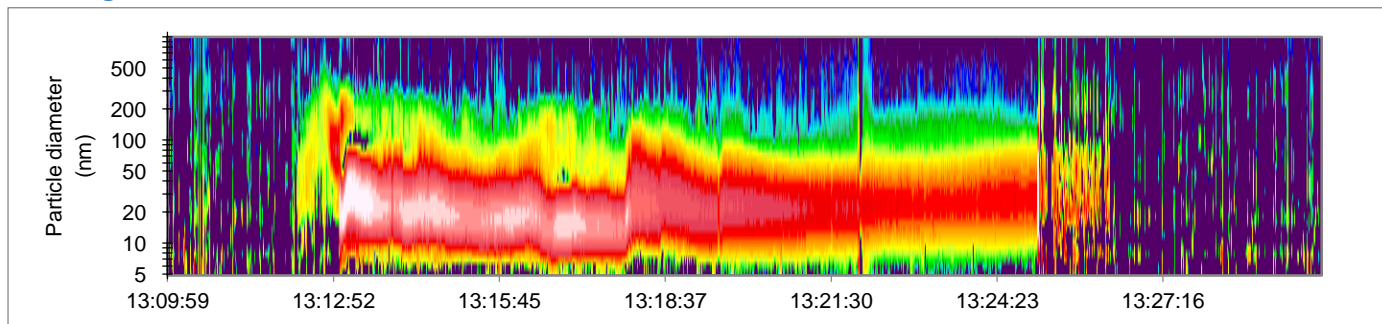


Figur 48: 16 % syre, försök 2. Förbränning av polystyren. Antänder runt 16:35, slocknar runt 16:42.

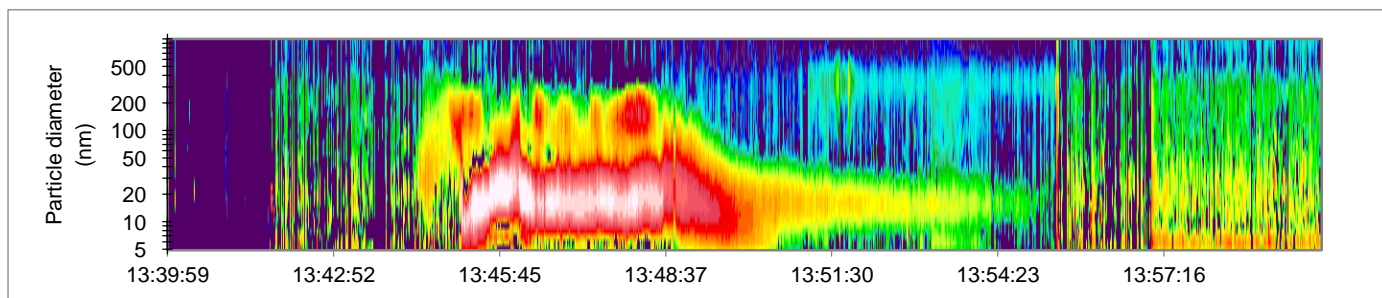


Figur 49: 15 % syre, försök 2. Förbränning av polystyren. Antänder runt 16:04:30, slocknar runt 16:10.

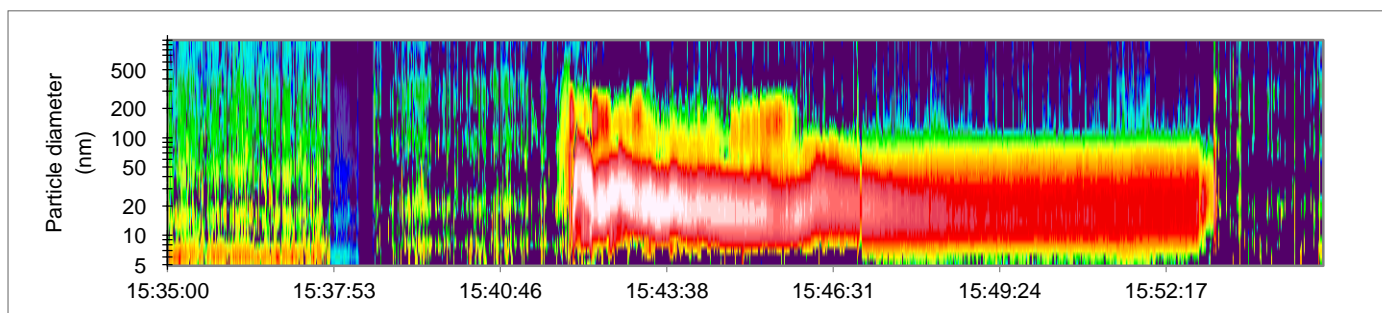
Kartong



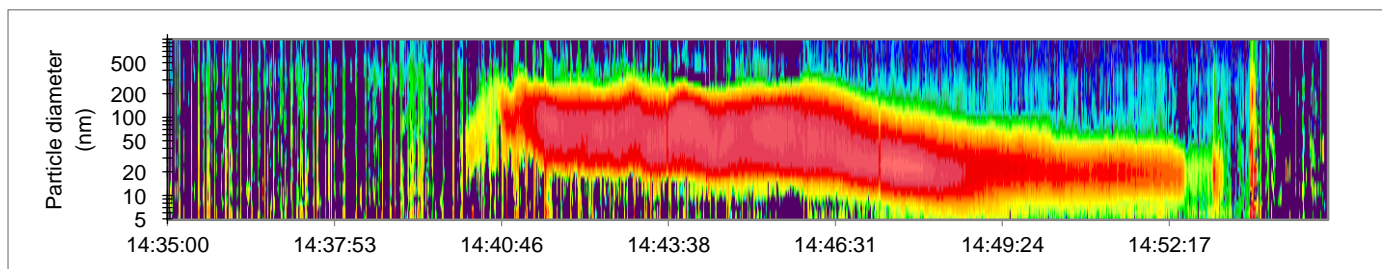
Figur 50: 21 % syre, försök 1. Förbränning av kartong. Antänder runt 13:13, slocknar runt 13:25.



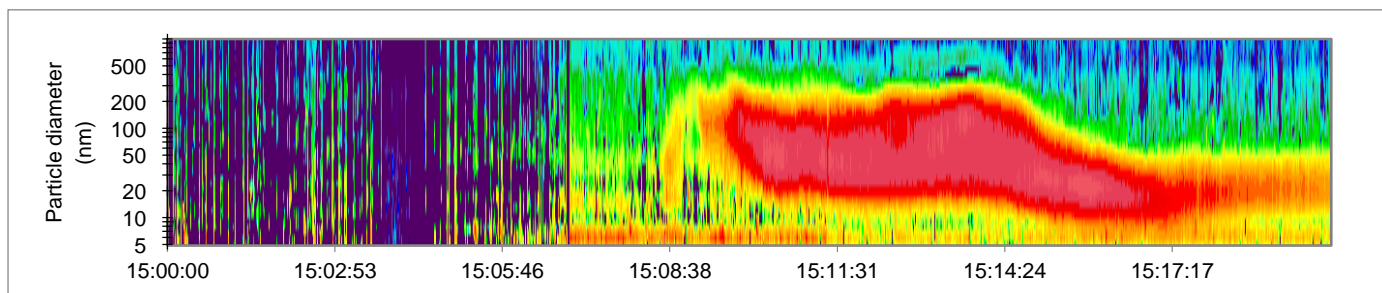
Figur 51: 19 % syre, försök 1. Förbränning av kartong. Antänder runt 13:44, slocknar runt 13:52.



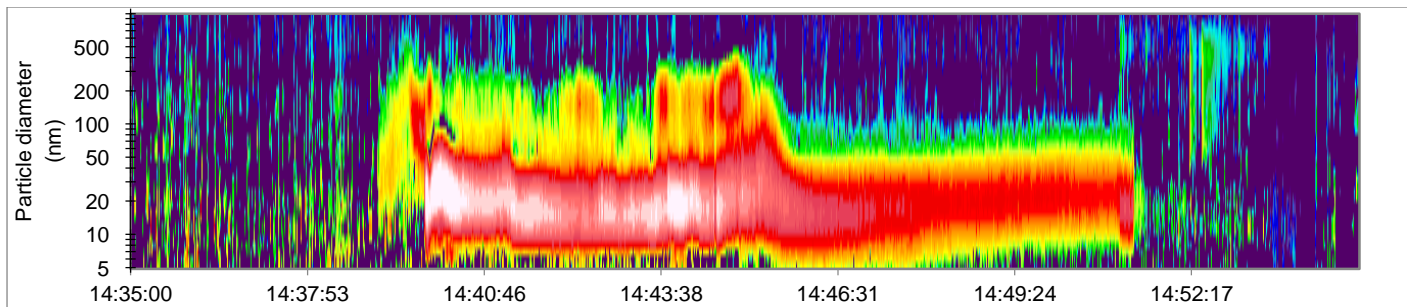
Figur 52: 17 % syre, 30 kW/m². Förbränning av kartong. Antänder runt 15:42, slocknar runt 15:53.



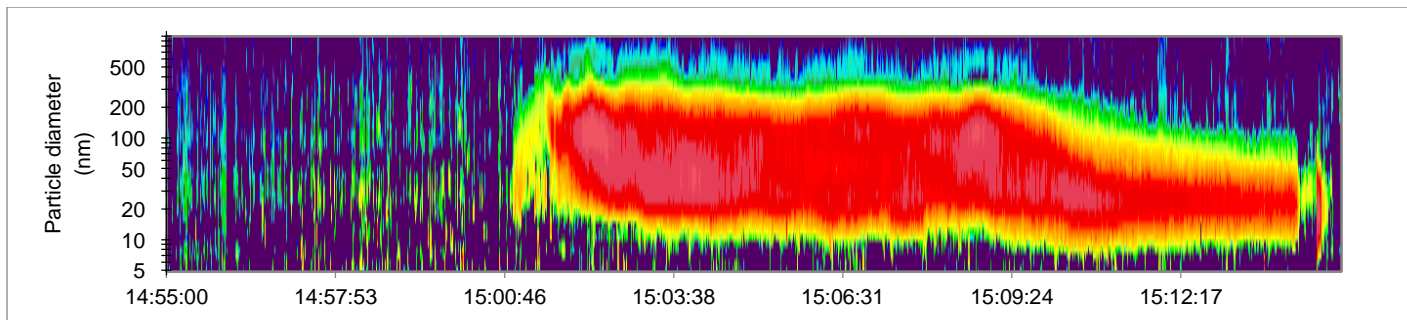
Figur 53: 17 % syre, försök 1. Förbränning av kartong. Antänder runt 14:41, slocknar runt 14:52.



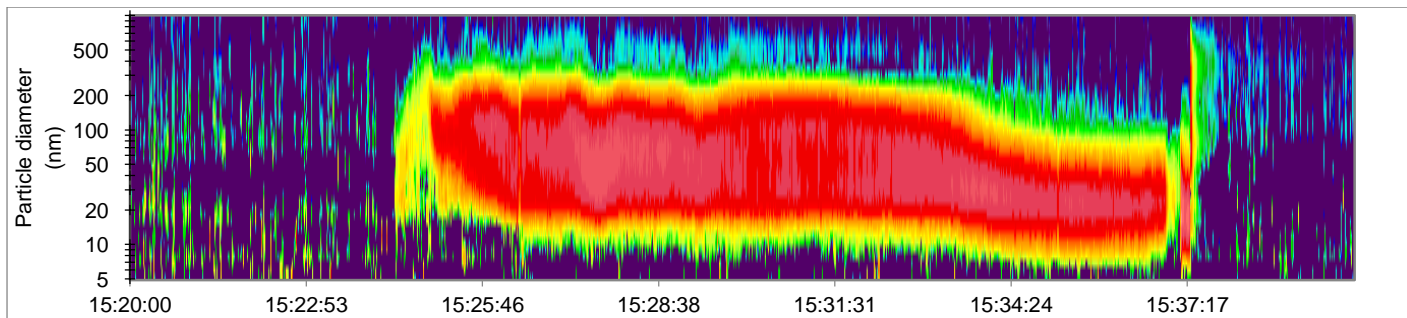
Figur 54: 15 % syre, försök 1. Förbränning av kartong. Antänder runt 15:09, slocknar runt 15:19.



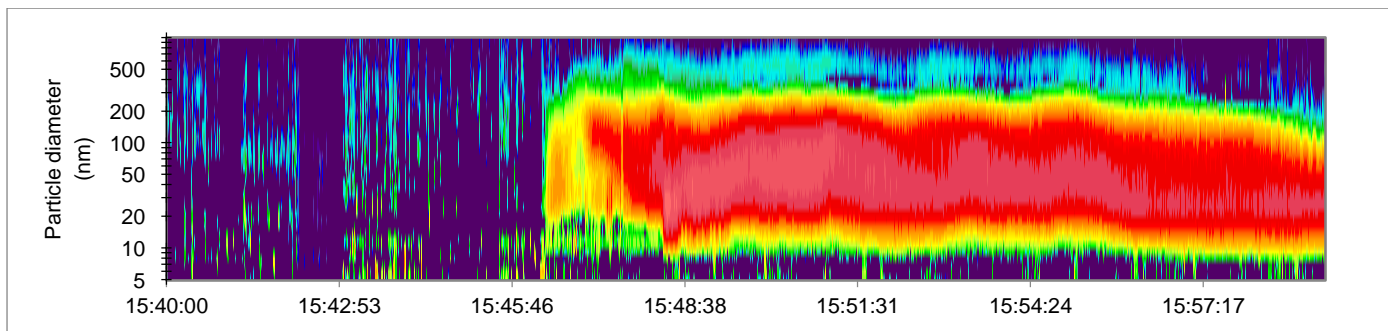
Figur 55: 21 % syre, försök 2. Förbränning av kartong. Antänder runt 14:39, slocknar runt 14:51.



Figur 56: 19 % syre, försök 2. Förbränning av kartong. Antänder runt 15:01, slocknar runt 15:13.



Figur 57: 17 % syre, försök 2. Förbränning av kartong. Antänder runt 15:23, slocknar runt 15:37.

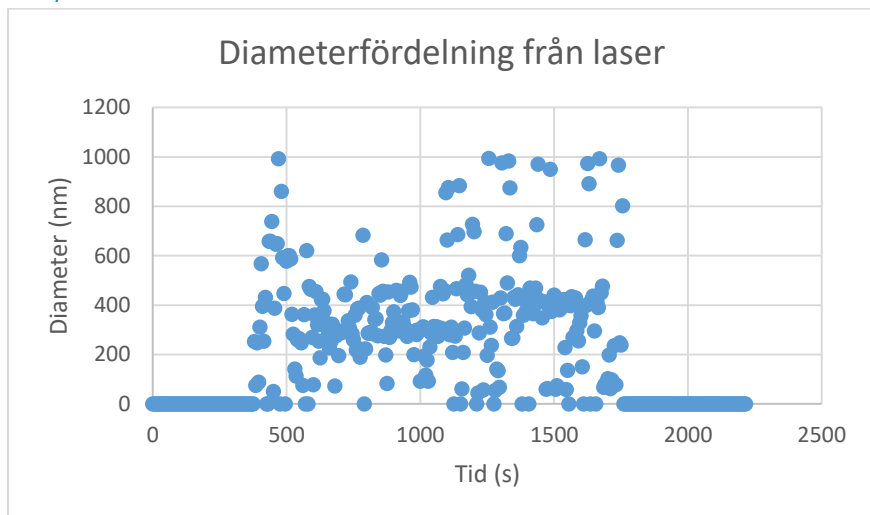


Figur 58: 15 % syre, försök 2. Förbränning av kartong. Antänder runt 15:46, slocknar runt 15:59.

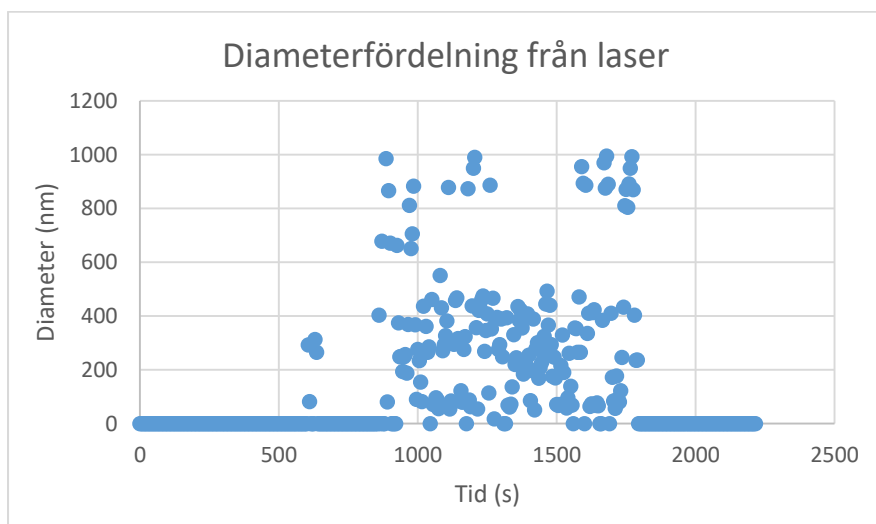
Bilaga 2 – Mätningar med laser med tre olika våglängder.

I denna bilaga presenteras resultaten av lasermätningarna för alla utförda experiment. Ordningen är polyeten, polystyren, kartong, var och en visar först försök 1 och sedan försök 2. Inga slutsatser om partikelstorlekar har kunnat dras av dessa mätningar, men resultaten presenteras ändå här då vissa slutsatsen ändå dras av bilderna i diskussionsavsnitten i rapporten.

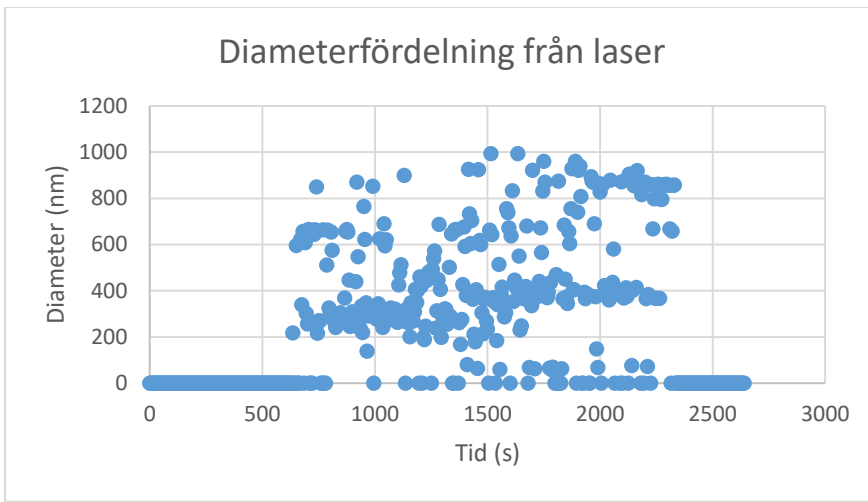
Polyeten



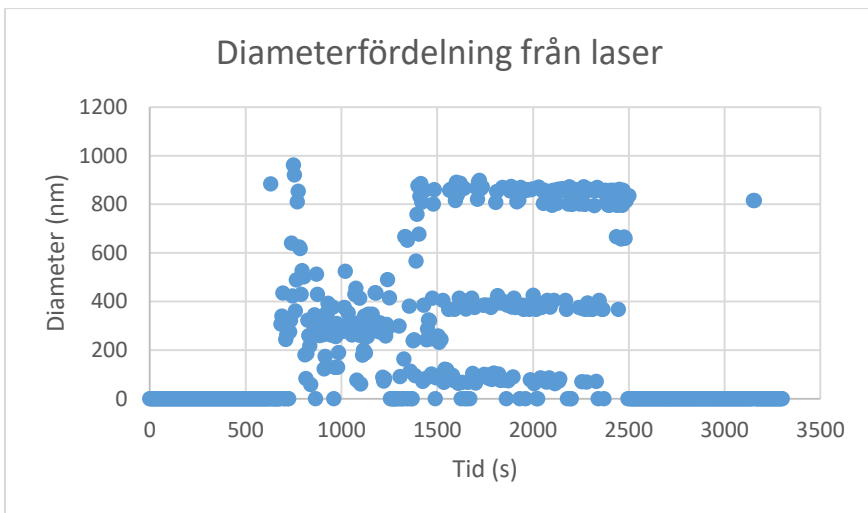
Figur 59: 21 % syre, försök 1. Förbränning av polyeten. Antänder runt 1100 s.



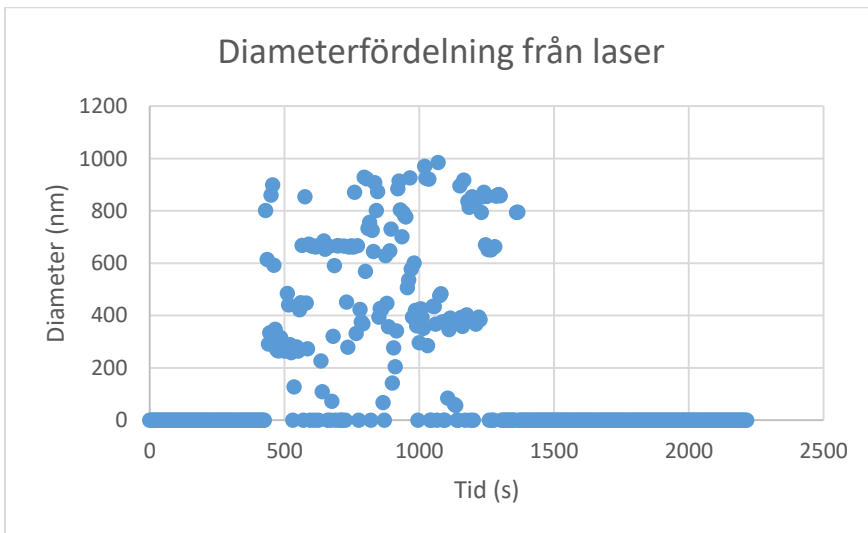
Figur 60: 19 % syre, försök 1. Förbränning av polyeten. Antänder runt 660 s.



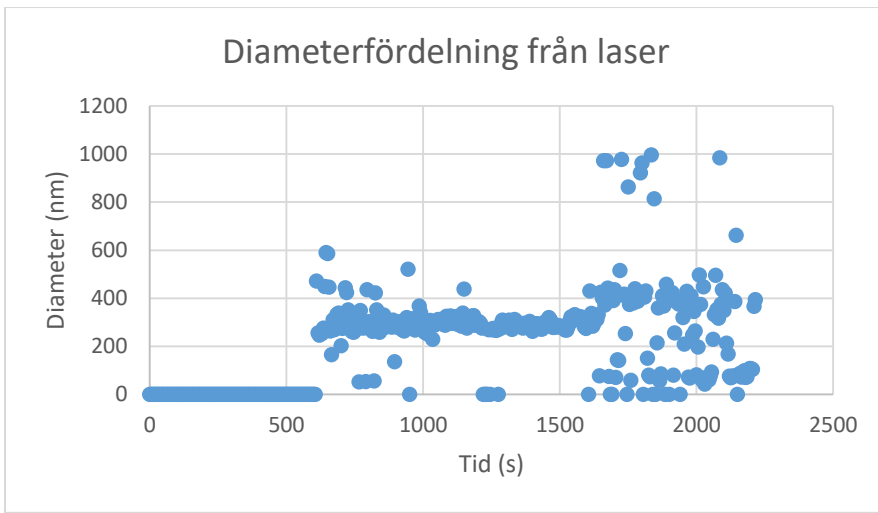
Figur 61: 17 % syre, försök 1. Förbränning av polyeten. Antänder runt 1300 s.



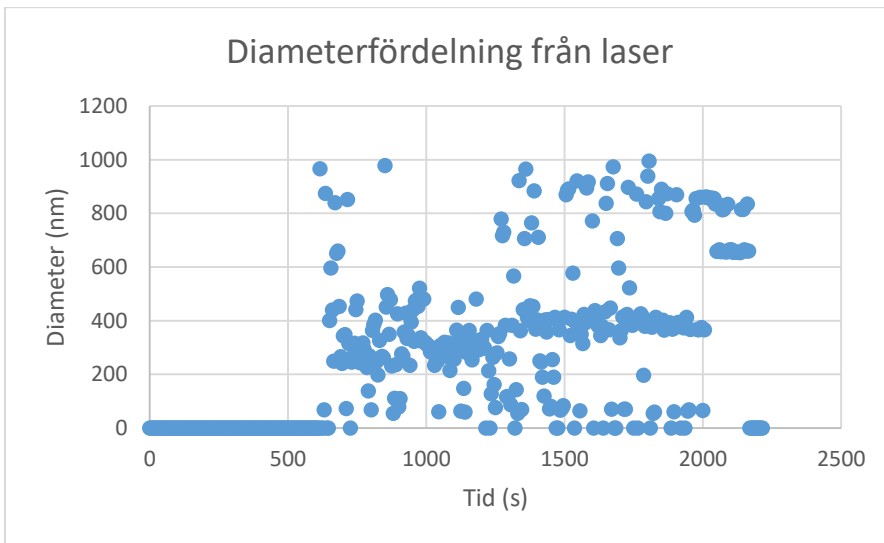
Figur 62: 15 % syre, försök 1. Förbränning av polyeten. Antänder runt 1300 s.



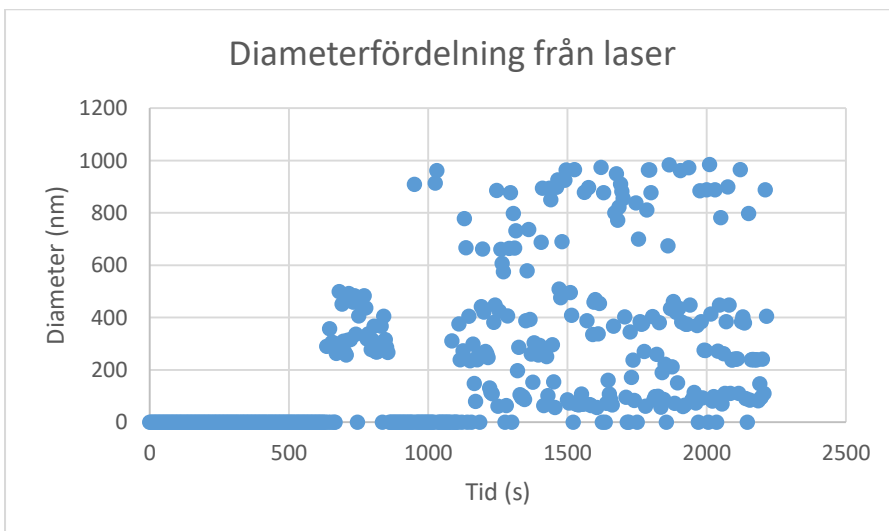
Figur 63: 21 % syre, försök 2. Förbränning av polyeten. Antänder runt 550 s.



Figur 64: 19 % syre, försök 2. Förbränning av polyeten. Antänder runt 1210 s.

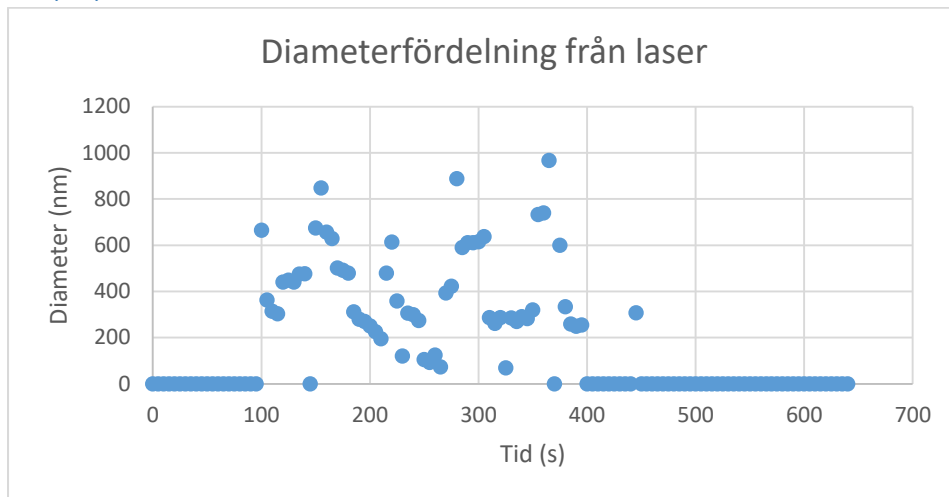


Figur 65: 17 % syre, försök 2. Förbränning av polyeten. Antänder runt 1195 s.

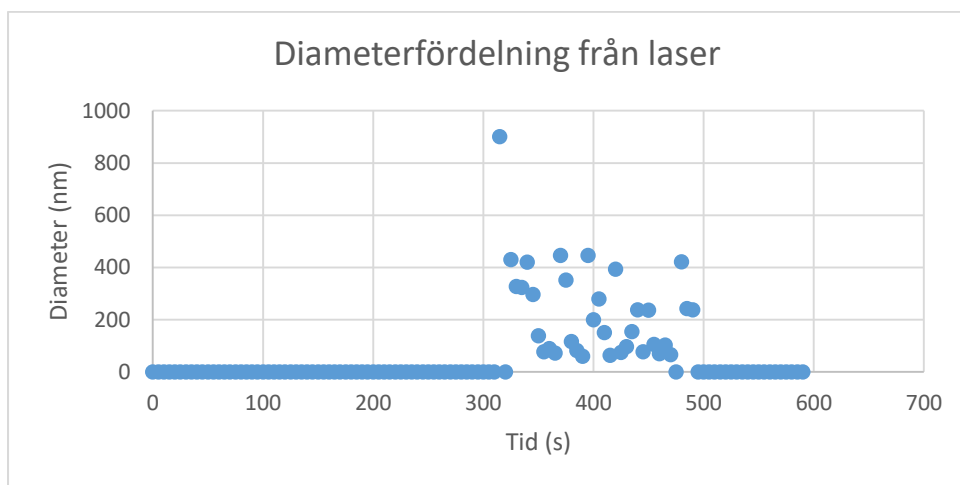


Figur 66: 15 % syre, försök 2. Förbränning av polyeten. Antänder runt 865 s.

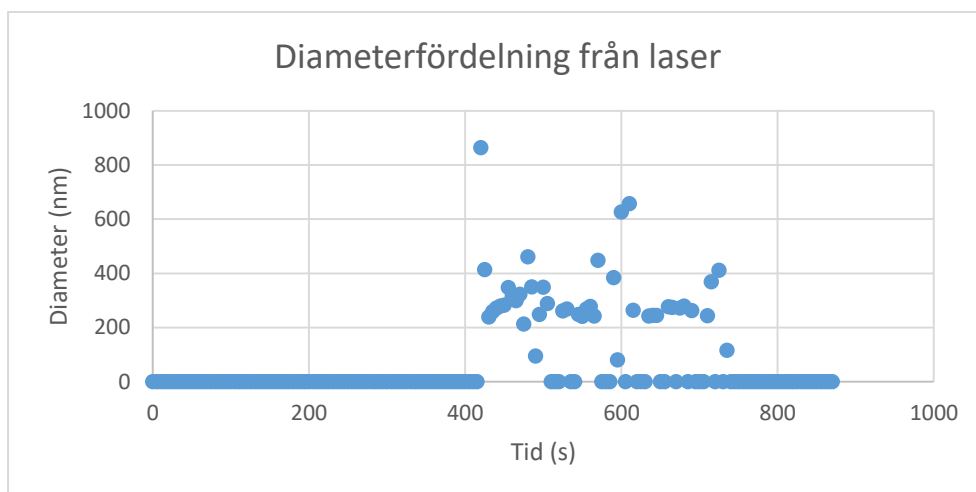
Polystyren



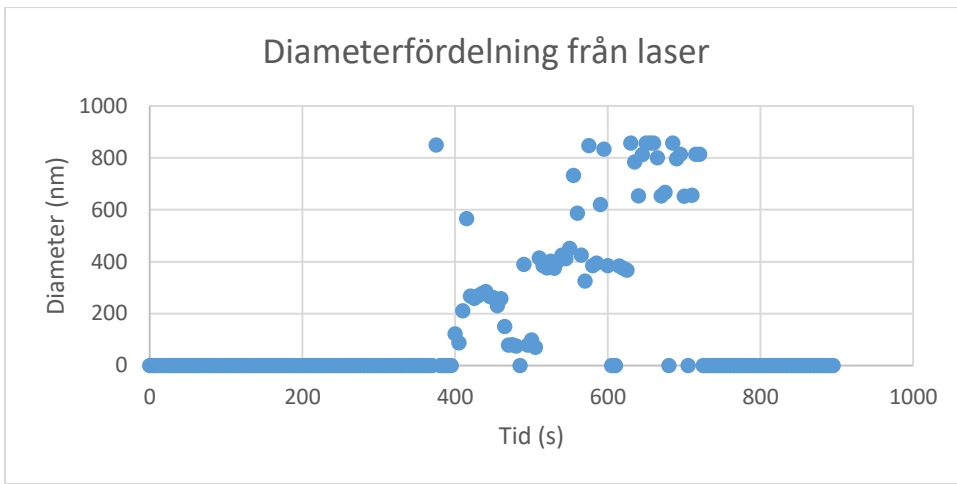
Figur 67: 21 % syre, försök 1. Förbränning av polystyren. Antänder runt 100 s.



Figur 68: 19 % syre, försök 1. Förbränning av polystyren. Antänder runt 300 s.



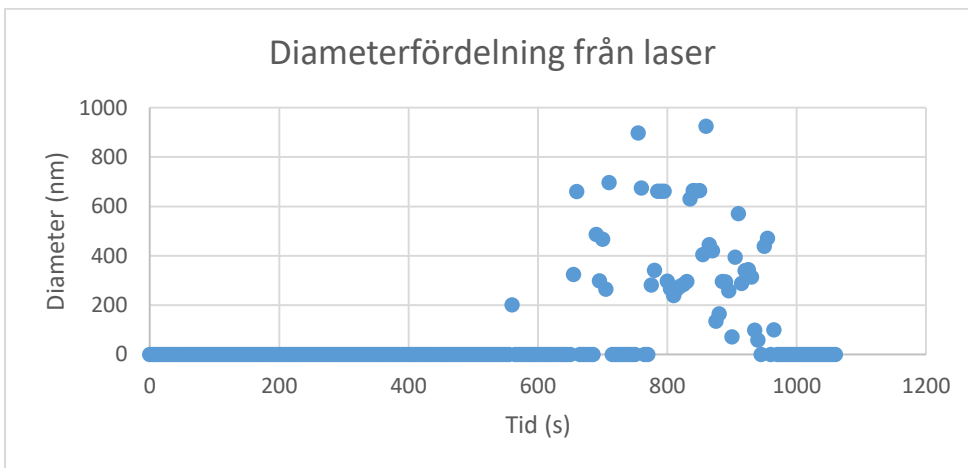
Figur 69: 17 % syre, försök 1. Förbränning av polystyren. Antänder runt 400 s.



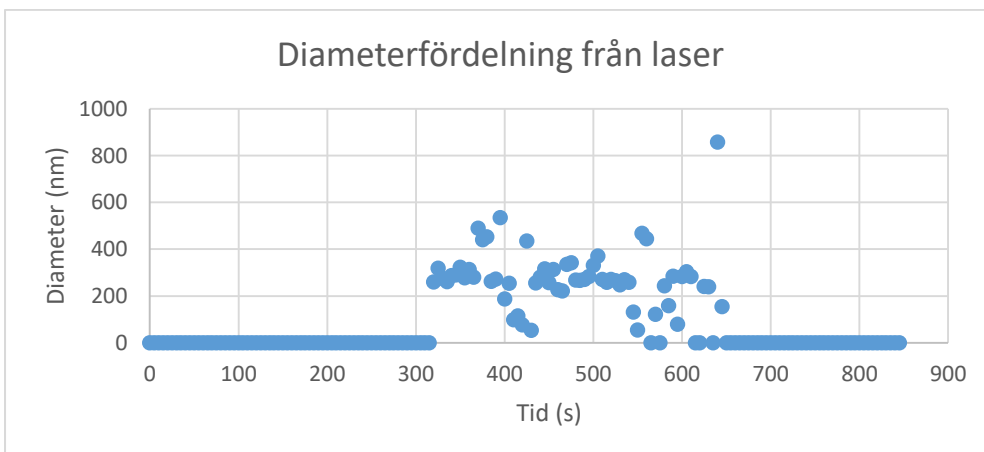
Figur 70: 16 % syre, försök 1. Förbränning av polystyren. Antänder runt 400 s.

Första försöket att antända polystyren vid 15 % syrehalt antände inte, så ingen data gav något resultat.

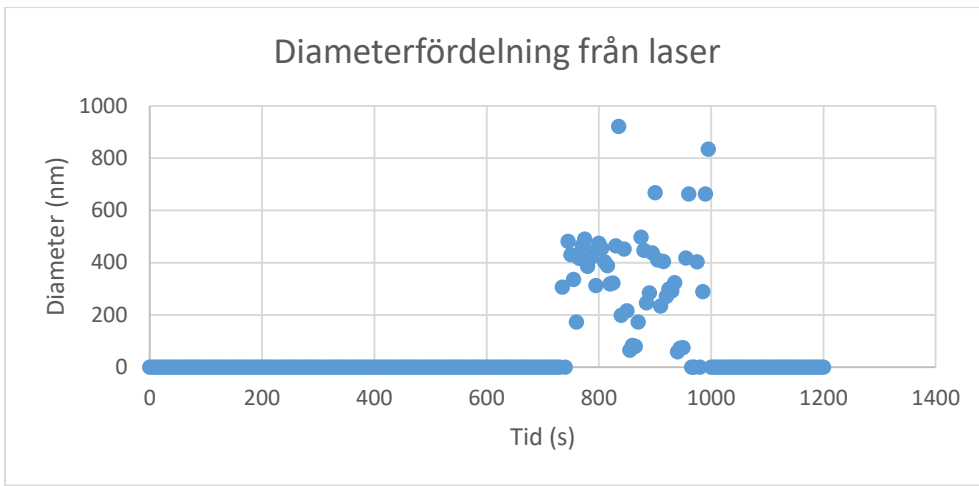
Lasermätningarna för det andra försöket vid 21 % syrehalt visade bara brus, något fel måste ha uppkommit vid just denna. Ingen data kan visas.



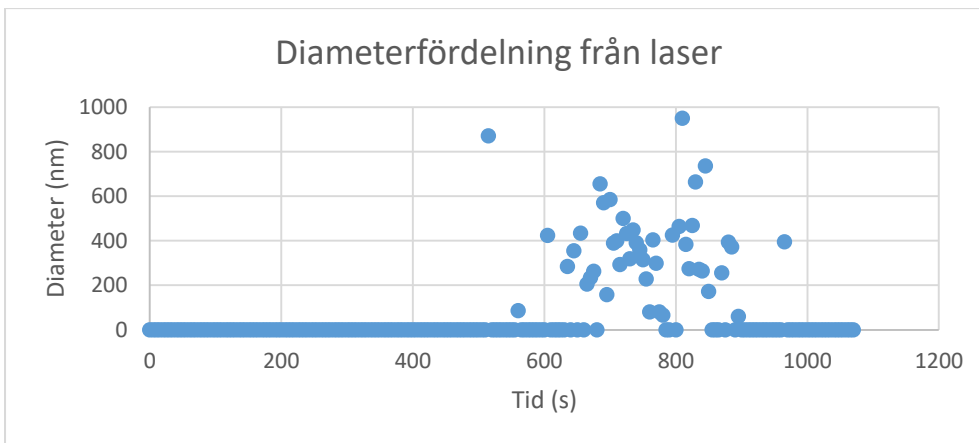
Figur 71: 19 % syre, försök 2. Förbränning av polystyren. Antänder runt 600 s.



Figur 72: 17 % syre, försök 2. Förbränning av polystyren. Antänder runt 300 s.

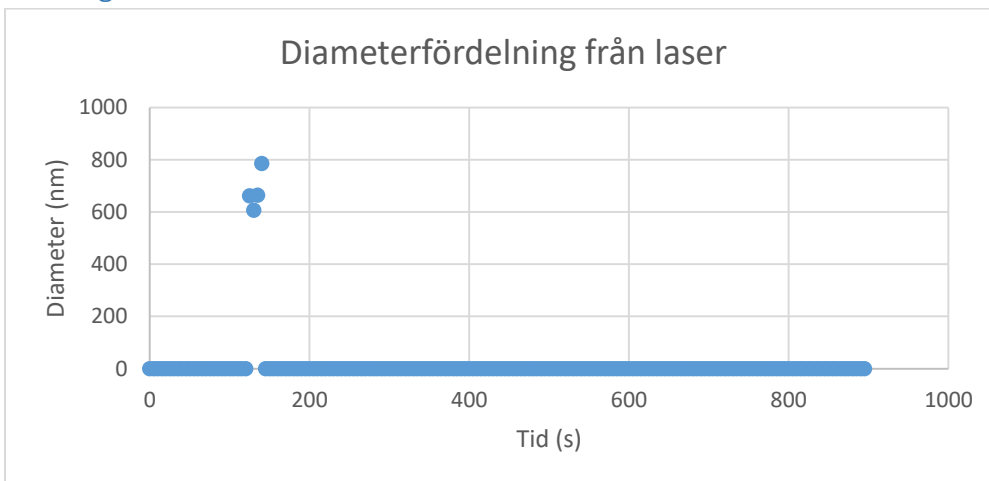


Figur 73: 16 % syre, försök 2. Förbränning av polystyren. Antänder runt 750 s.

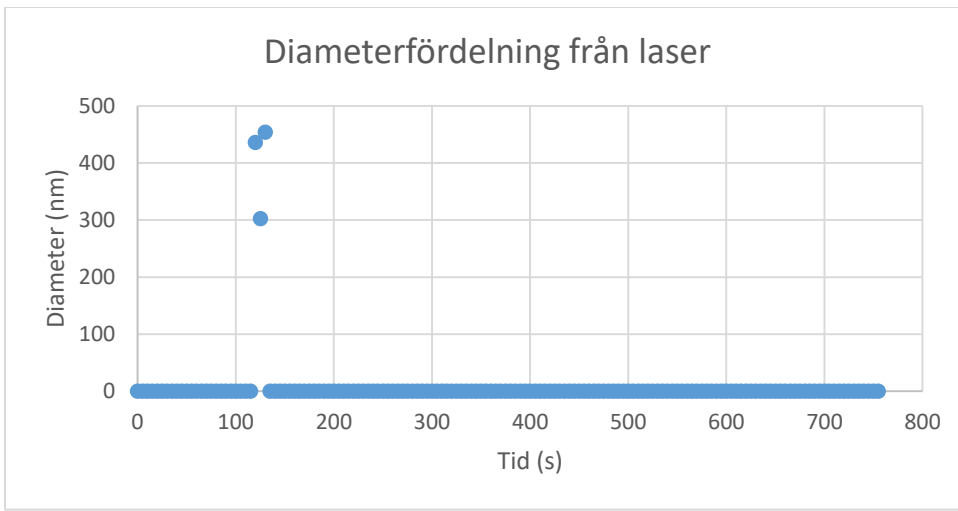


Figur 74: 15 % syre, försök 2. Förbränning av polystyren. Antänder runt 600 s.

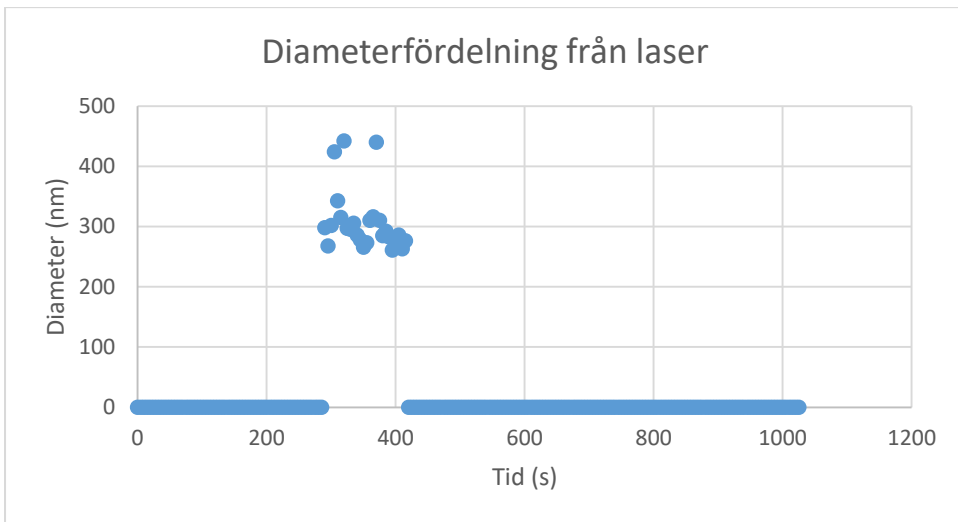
Kartong



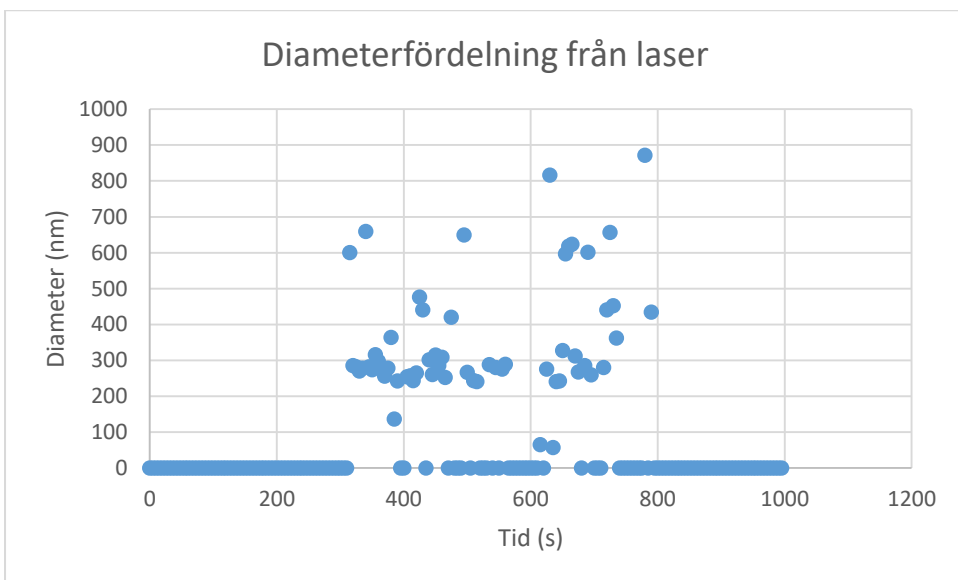
Figur 75: 21 % syre, försök 1. Förbränning av kartong. Antänder runt 150 s.



Figur 79: 21 % syre, försök 2. Förbränning av kartong. Antänder runt 120 s.



Figur 80: 19 % syre, försök 2. Förbränning av kartong. Antänder runt 250 s.

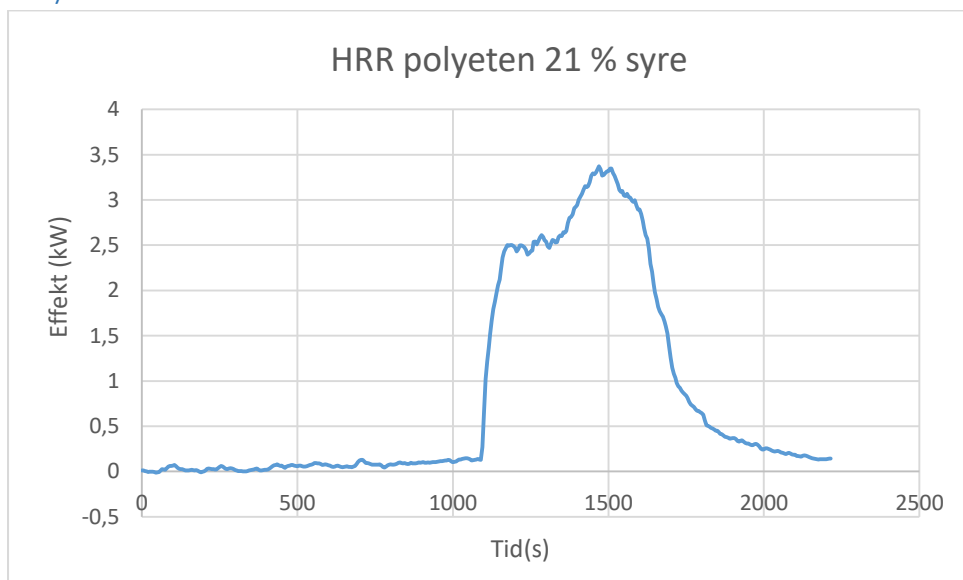


Figur 81: 17 % syre, försök 2. Förbränning av kartong. Antänder runt 350 s.

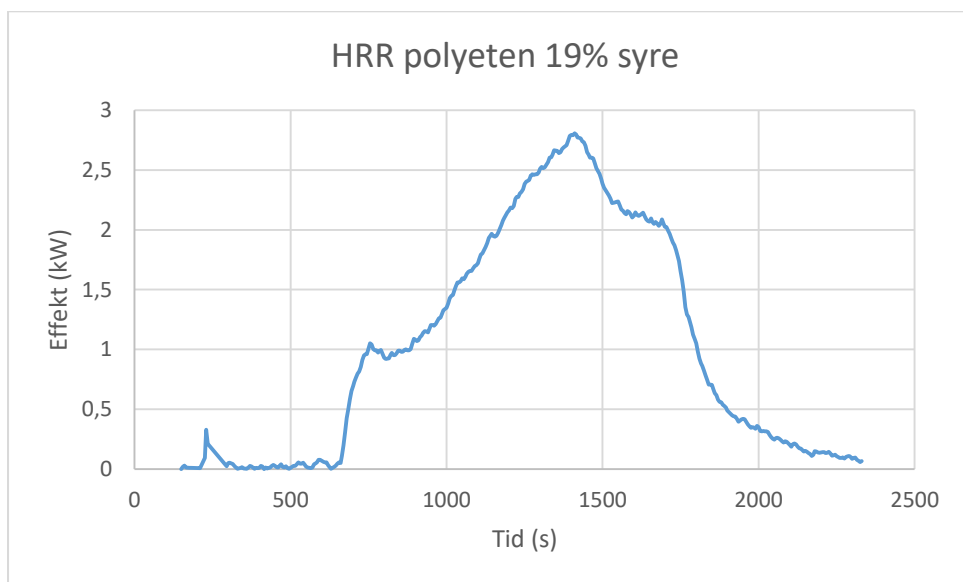
Bilaga 3 - Effektutveckling

I denna bilaga presenteras heat release rate för alla utförda experiment. Ordningen är polyeten, polystyren, kartong, var och en visar först försök 1 och sedan försök 2. Heat release rate beräknades med ekv. 1 vid 21 % syre och ekv. 2 vid alla andra syrehalter.

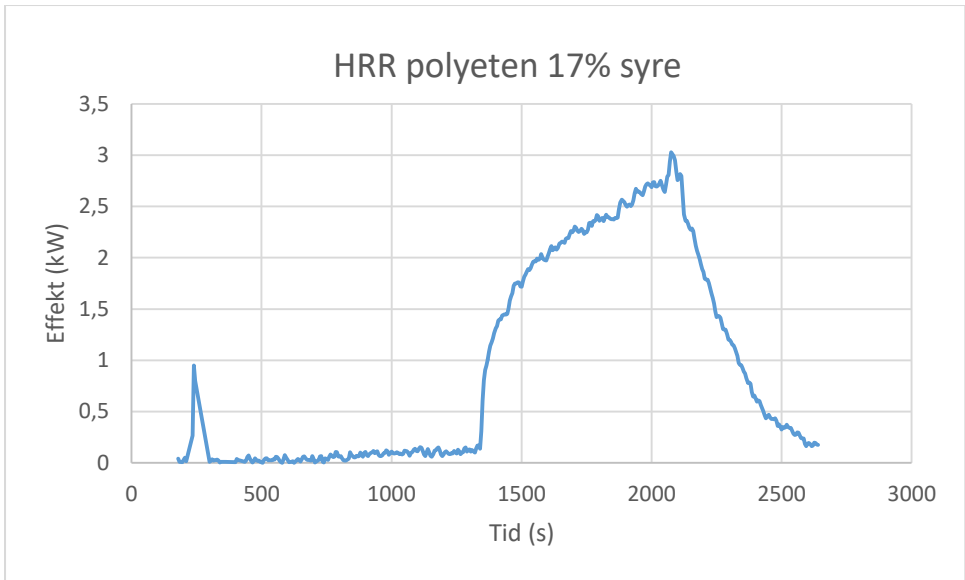
Polyeten



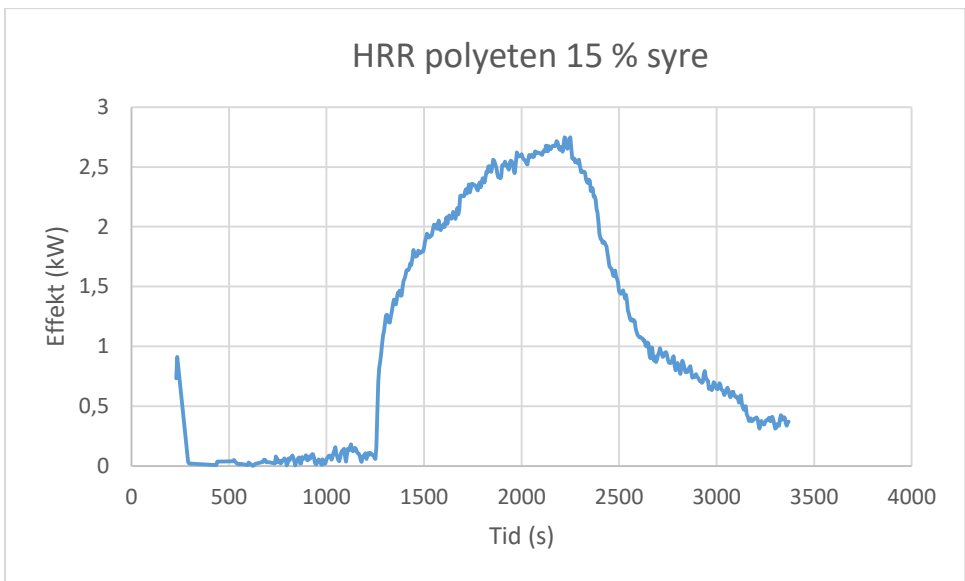
Figur 83: Effektutvecklingen för förbränning av polyeten vid 21 % syre, försök 1.



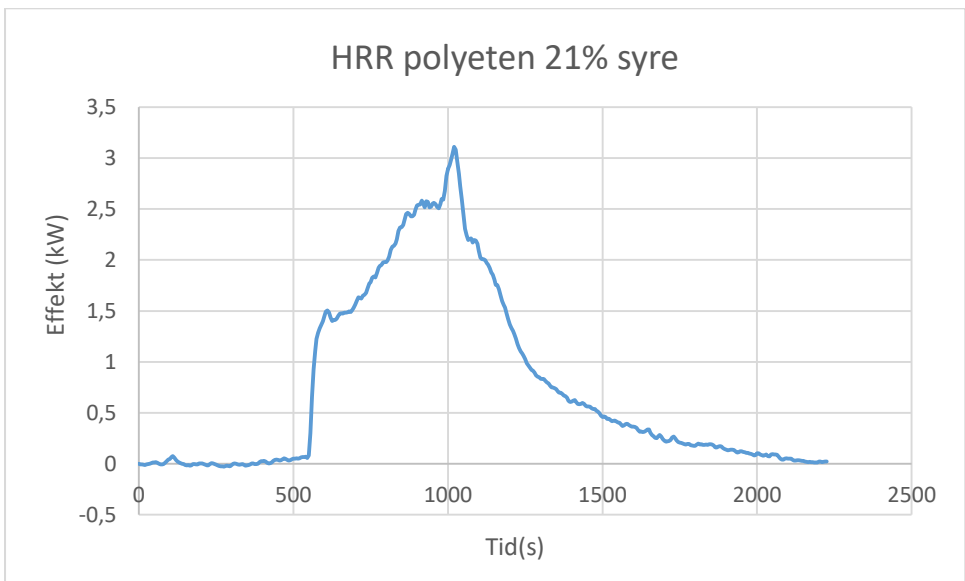
Figur 84: Effektutvecklingen för förbränning av polyeten vid 19 % syre, försök 1.



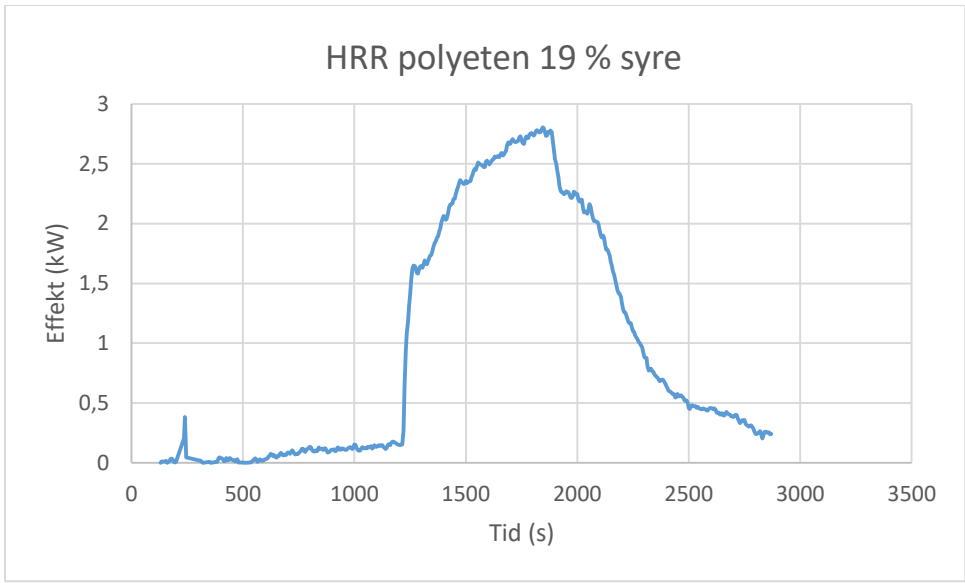
Figur 85: Effektutvecklingen för förbränning av polyeten vid 17 % syre, försök 1.



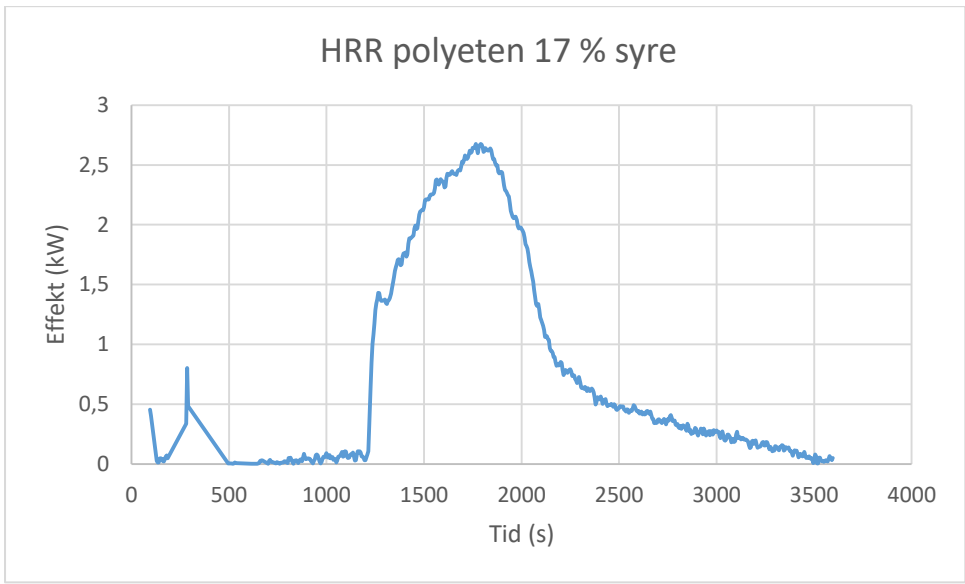
Figur 86: Effektutvecklingen för förbränning av polyeten vid 15 % syre, försök 1.



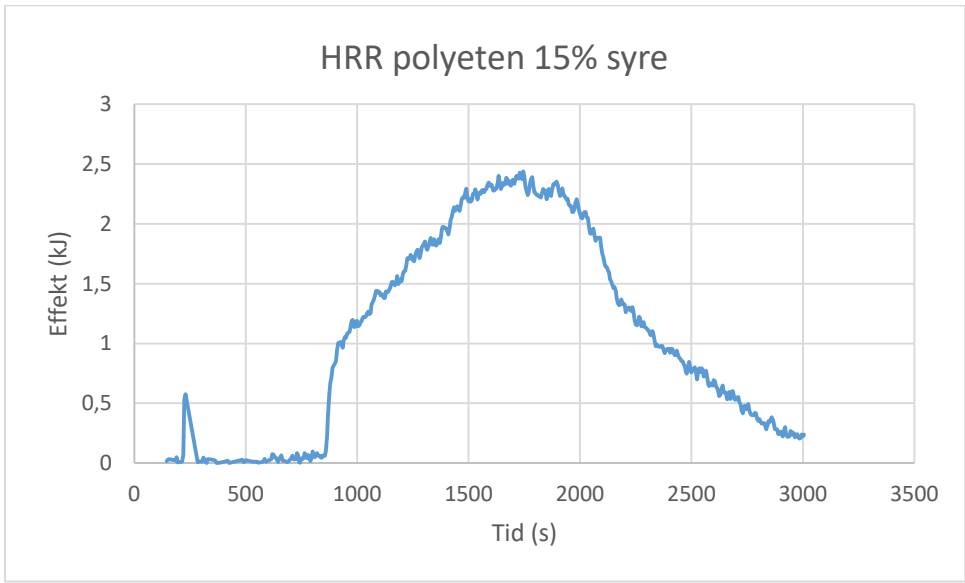
Figur 87: Effektutvecklingen för förbränning av polyeten vid 21 % syre, försök 2.



Figur 88: Effektutvecklingen för förbränning av polyeten vid 19 % syre, försök 2.

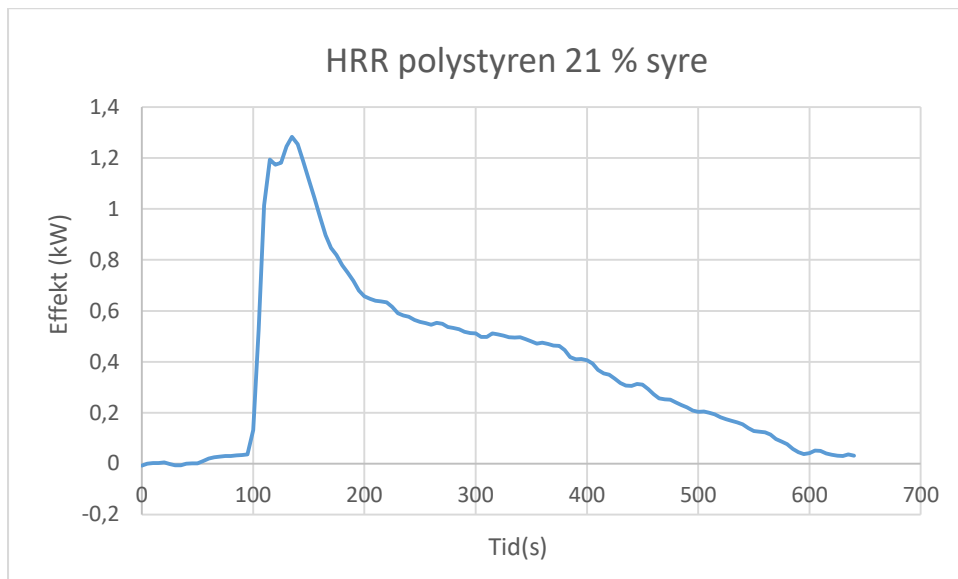


Figur 89: Effektutvecklingen för förbränning av polyeten vid 17 % syre, försök 2.

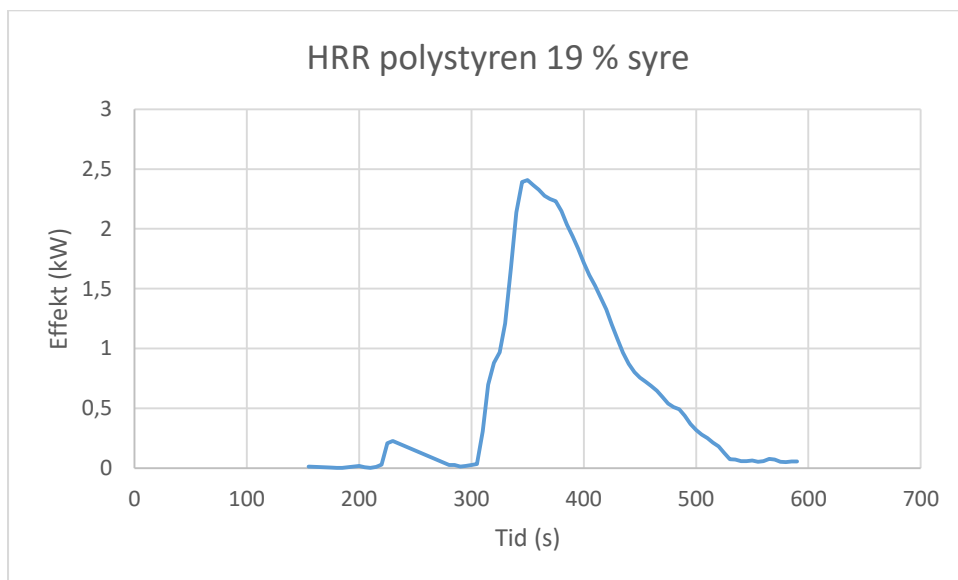


Figur 90: Effektutvecklingen för förbränning av polyeten vid 15 % syre, försök 2.

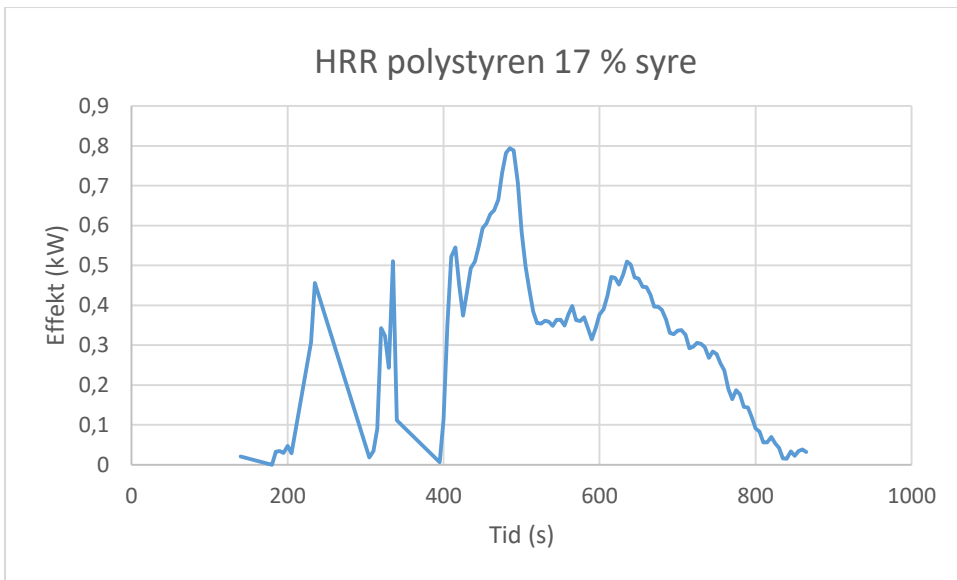
Polystyren



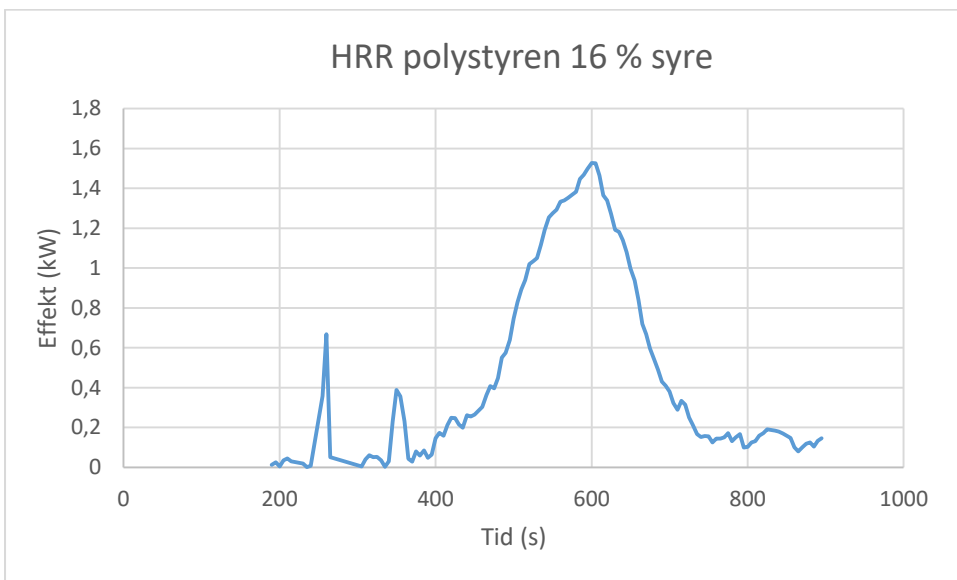
Figur 91: Effektutvecklingen för förbränning av polystyren vid 21 % syre, försök 1.



Figur 92: Effektutvecklingen för förbränning av polystyren vid 19 % syre, försök 1.

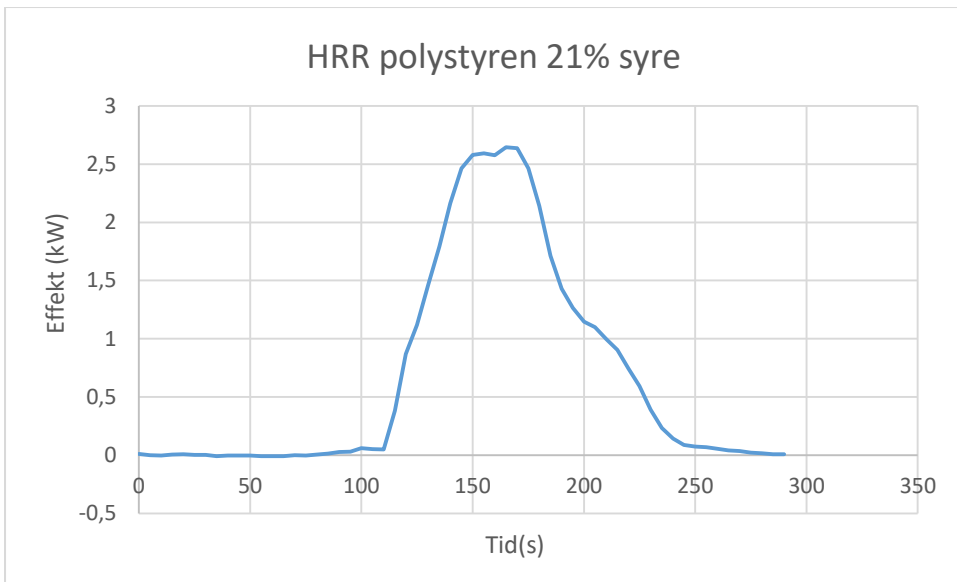


Figur 93: Effektutvecklingen för förbränning av polystyren vid 17 % syre, försök 1.

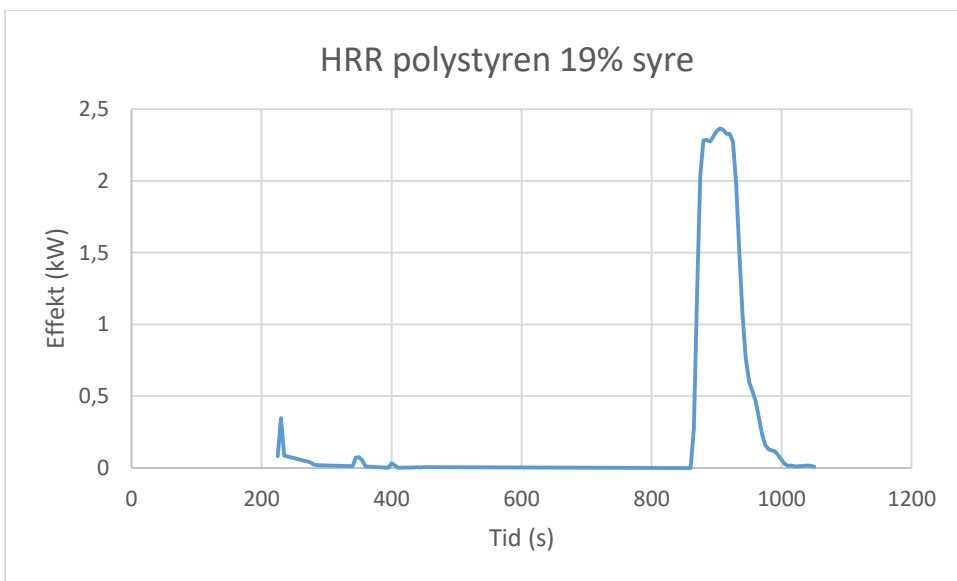


Figur 94: Effektutvecklingen för förbränning av polystyren vid 16 % syre, försök 1.

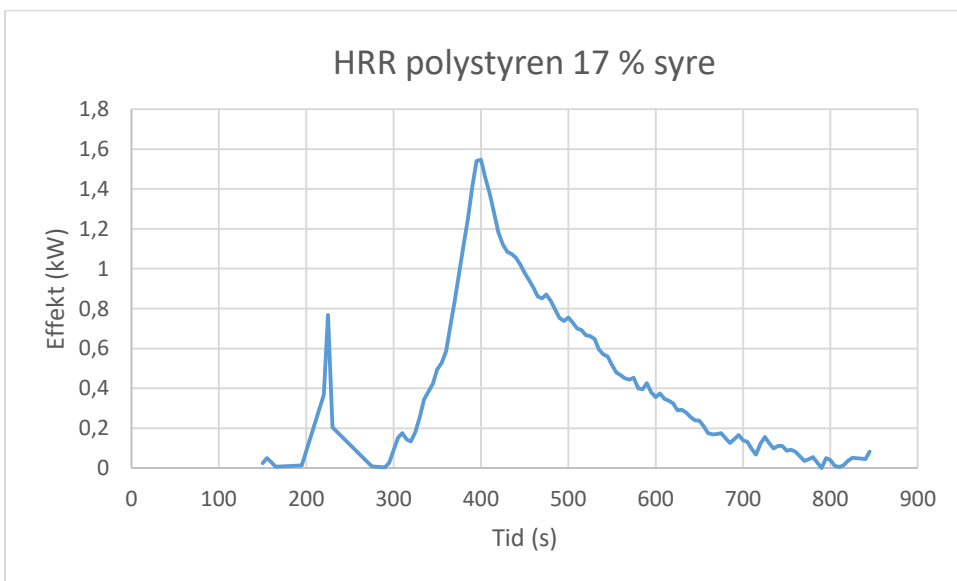
Ingen antändning skedde vid första försöket vid 15 % syrehalt, ingen kurva presenteras.



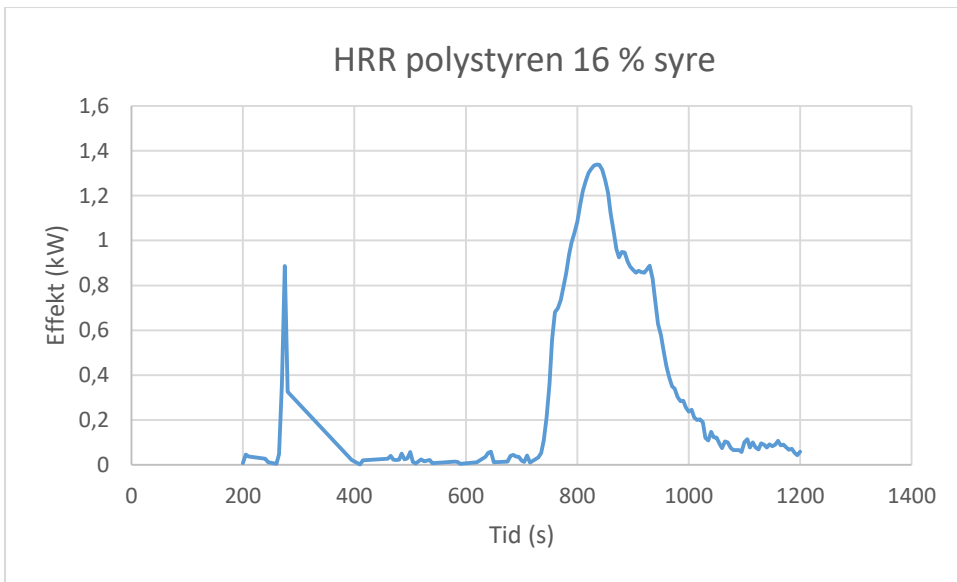
Figur 95: Effektutvecklingen för förbränning av polystyren vid 21 % syre, försök 2.



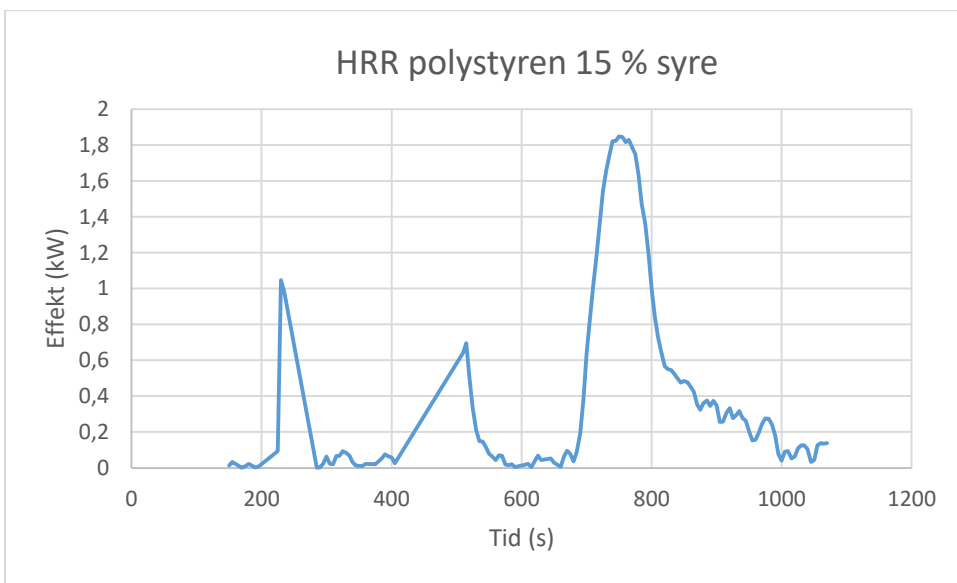
Figur 96: Effektutvecklingen för förbränning av polystyren vid 19 % syre, försök 2.



Figur 97: Effektutvecklingen för förbränning av polystyren vid 17 % syre, försök 2.

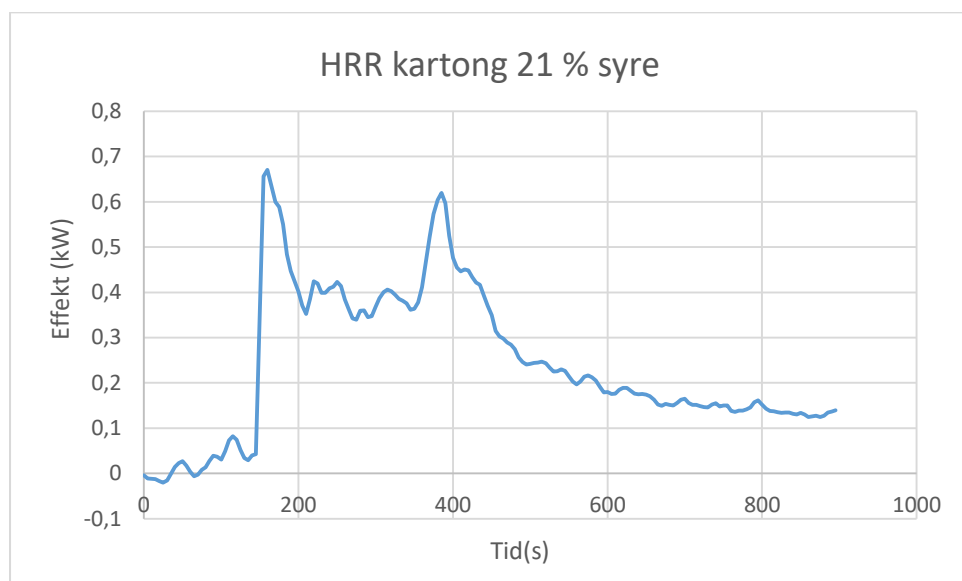


Figur 98: Effektutvecklingen för förbränning av polystyren vid 16 % syre, försök 2.

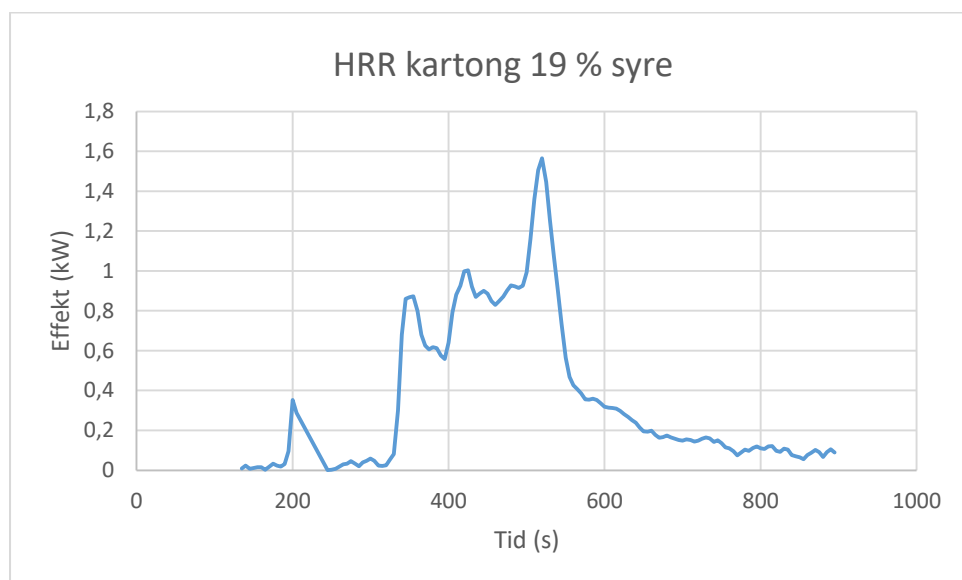


Figur 99: Effektutvecklingen för förbränning av polystyren vid 15 % syre, försök 2.

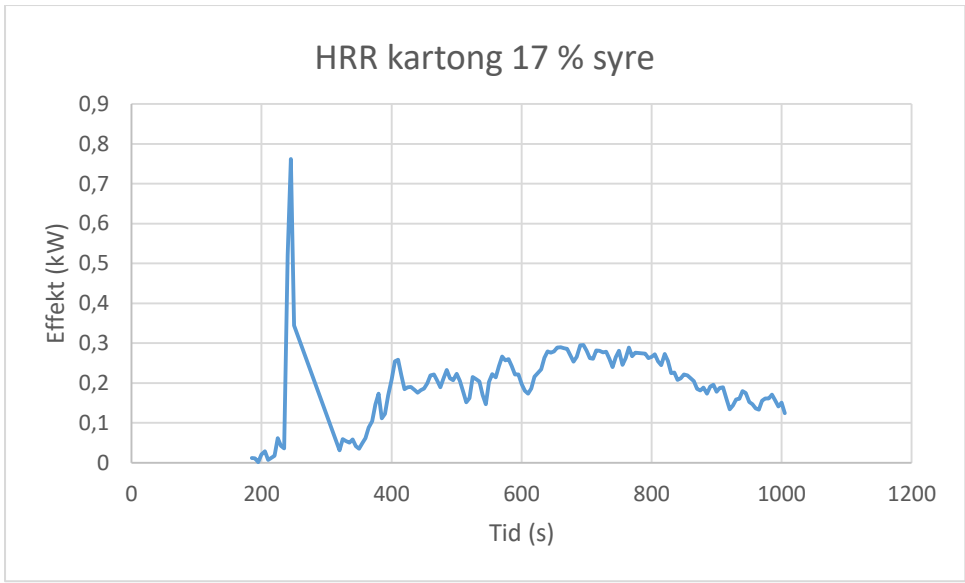
Kartong



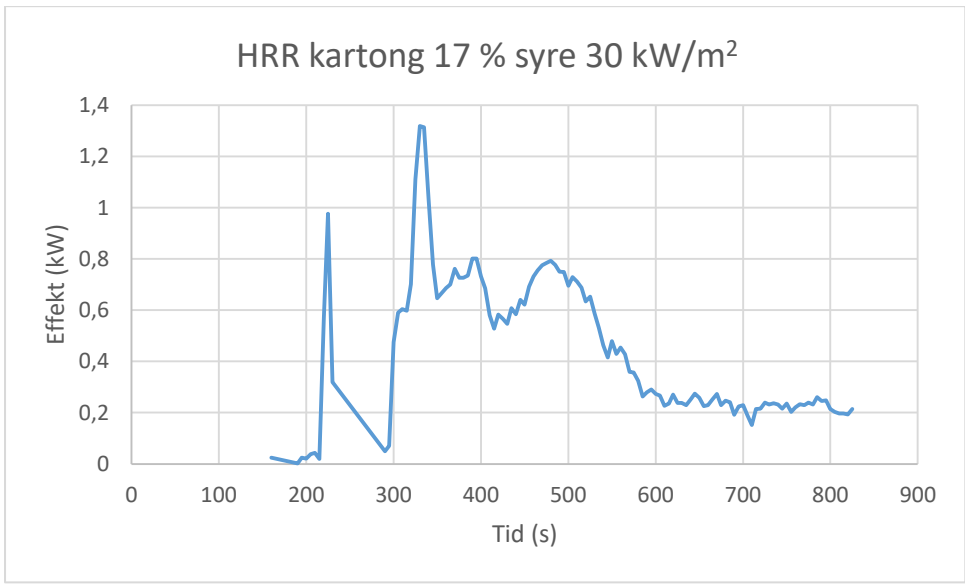
Figur 100: Effekttutvecklingen för förbränning av kartong vid 21 % syre, försök 1.



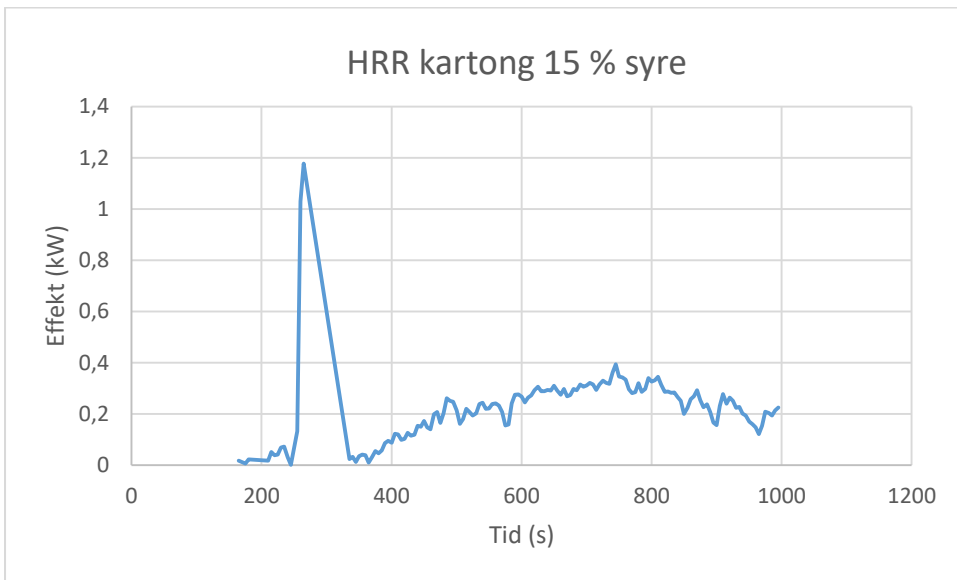
Figur 101: Effekttutvecklingen för förbränning av kartong vid 19 % syre, försök 1.



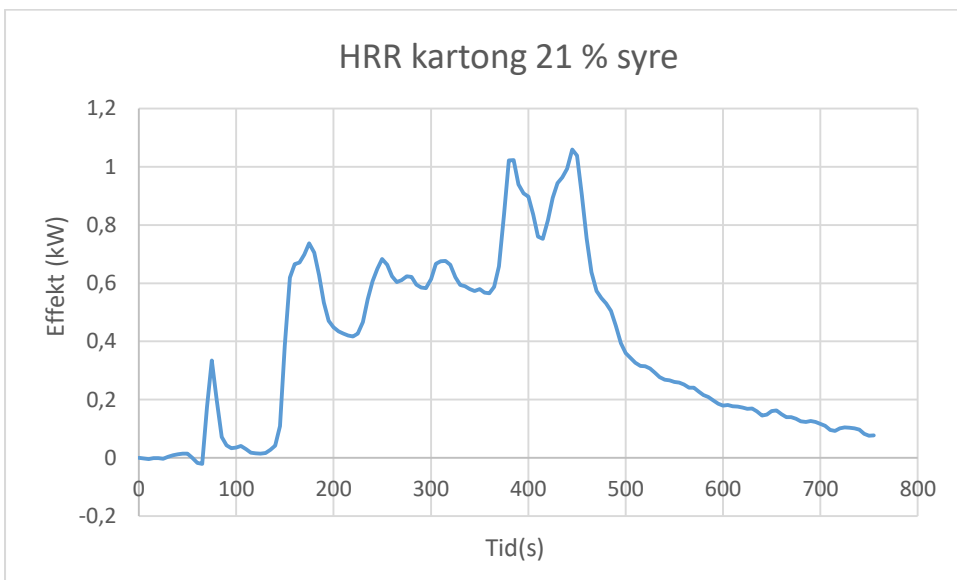
Figur 102: Effekttvecklingen för förbränning av kartong vid 17 % syre, försök 1.



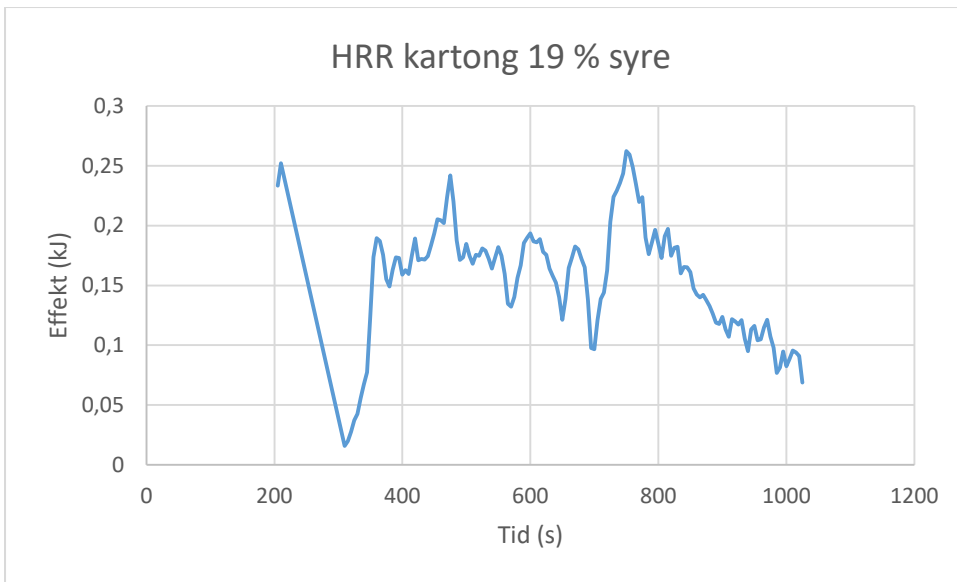
Figur 103: Effekttvecklingen för förbränning av kartong vid 17 % syre, 30 kW/m² försök 1.



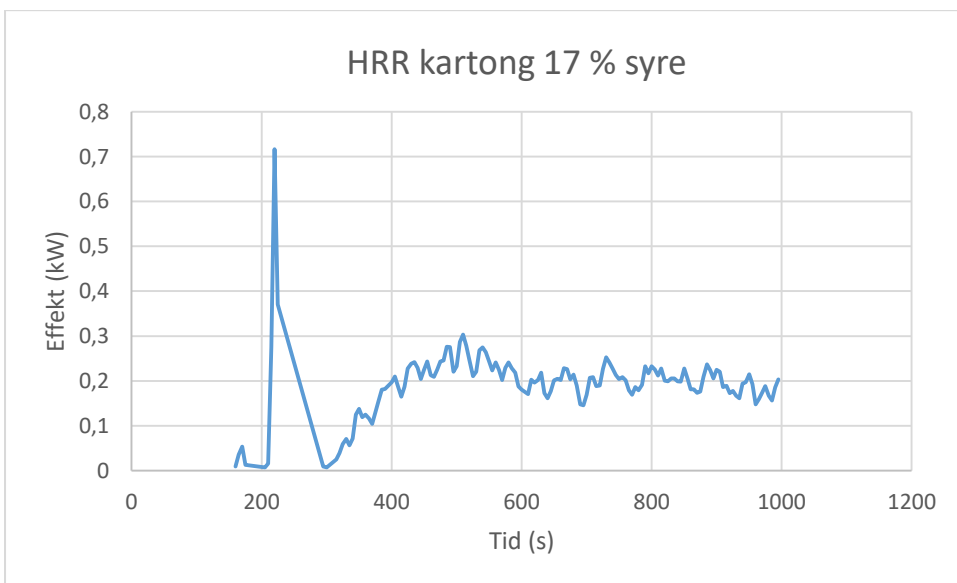
Figur 104: Effekttutvecklingen för förbränning av kartong vid 15 % syre, försök 1.



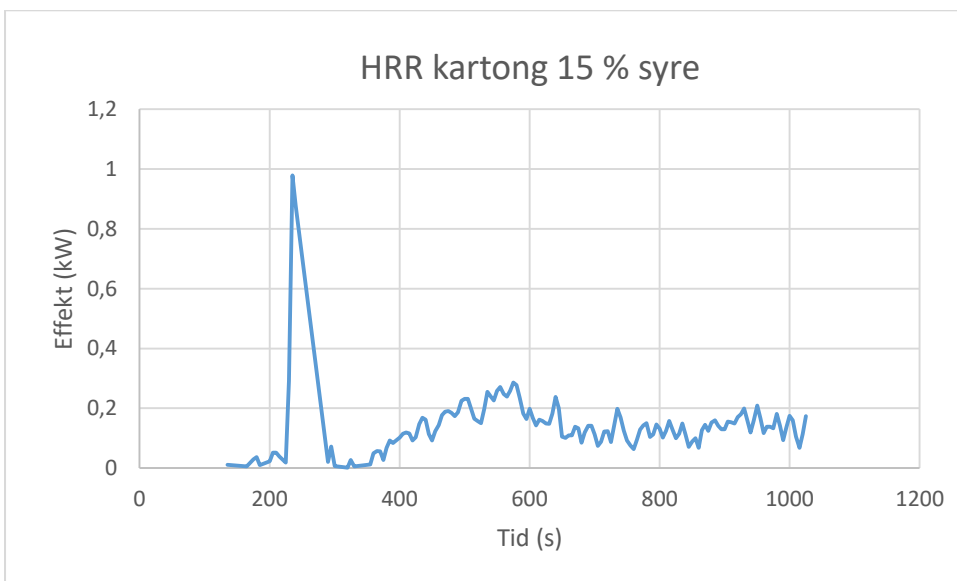
Figur 105: Effekttutvecklingen för förbränning av kartong vid 21 % syre, försök 2.



Figur 106: Effekttvecklingen för förbränning av kartong vid 19 % syre, försök 2.



Figur 107: Effekttvecklingen för förbränning av kartong vid 17 % syre, försök 2.



Figur 108: Effekttvecklingen för förbränning av kartong vid 15 % syre, försök

Bilaga 4 – Matlabkod använd för beräkning av partikelstorlek via laser

Nedan presenteras matlabkoden som använts under laborationerna oredigerad. Koden är vidareutvecklad från Konrad Wilkens med tillåtelse att publicera resultatet här. Koden är uppbyggd av en parafunktion där de mesta av inställningarna görs, en setupfunktion som gör alla beräkningar för Mie scattering med hjälp av två underfunktioner samt en calculationfunktion som utför optimeringen av mätvärden.

```
%Umbrella function to calculate the mie scattering over time and then optimize what
%smoke particle diameter is most likely to cause it. Currently set up for
%three different lasers, more will require some changes. The Miesetup
%function calculates the scattering for different refractive indexes and
%wavelengths and saves it in a big matrix "Data", while the Miec calculation
%function runs through all transmissions values and finds the best fit for
%each timestamp. The Mieumbrella function takes data from an excel file, then
%calls Miesetup and Miec calculation and writes the results into a new sheet
%in excel as well as creating a figure.
```

```
%Importing data from excel, sheet named "Matlab". A is time (in 5-seconds
% intervals), BCD is infrared, red, green laser transmission values.
T=readmatrix('Matlabkanslighet.xlsx', 'Sheet', 'Matlab', 'Range', 'A:D');
```

```
%Name of file where the results will be stored, here the same as import.
%Sheet and column where it is stored is defined further down.
filename='Matlabkanslighet.xlsx';
```

```
endtime=max(T(:,1)); %Maximum time where the experiment ended, ignores any zeroes that
follows.
timesteps=endtime/5+1; %Number of steps it will iterate through (5s intervals).
Time=T(1:timesteps,1); %For figure at the end
```

```
%Pre-allocating for speed
diametertime=zeros(timesteps,1);
errortime=zeros(timesteps,1);
%ritime=zeros(timesteps,1); %Did not use this, might be useful for someone
%else? Saves the refractive index corresponding to the best diameter when
%enabled
```

```
%Calling the setup function, storing data. Be aware of order of
%wavelengths, is not the same as before but no energy to change it now!
%Currently green, red, infrared here, how Miesetup is created. Feel free to
%make the order consistent throughout the program! Wavelength here in
%micrometer.
[Data]=Miesetup(0.532,0.650,0.735);
```

```
% Sends each pairing of transmission values to Miec calculation, saves data
% unless it is really bad (calculations can get weird when no smoke is
```

```

% present, values at 10 000 makes it hard to see the interesting ones at
% 200. best_d gives output in micrometer, I wanted it in nanometer so
% currently saves the value x1000.
for i=1:timesteps
    if T(i,2)<0.99 && T(i,3)<0.99 && T(i,4)<0.99
        [best_num,best_d,ri]=Miecalculation(T(i,2), T(i,3), T(i,4),Data);

        if best_d <= 1
            diametertime(i,1)=best_d*1000;
            errortime(i,1)=best_num;
            % %ritime(i,1)=ri;
        end
    end
end

%Writes the results into matlabfile specified in the beginning of the code,
%in the sheet "Matlabresultat"
writematrix(Time, filename,'Sheet', 'Matlabresultat','Range', 'A2')
writematrix(diametertime, filename,'Sheet', 'Matlabresultat','Range', 'B2')
writematrix(errortime, filename,'Sheet', 'Matlabresultat','Range', 'C2')
%writematrix(ritime, filename,'Sheet', 'Matlabresultat','Range', 'D2')

%Figure to make sure everything worked out mostly OK.
figure
plot(Time,diametertime);
legend('diameter');

%Function to calculate the best fit for a set of transmission values to the
%theoretical scattering calculated by Miesetup and saved in "Data". The
%function compares the combined errors for each refractive index, then
%gives a result "best_num" which is the smallest error and "best_d" which
%is the corresponding best fit for the diameter of the particles. The
%function is currently set up for 3 lasers, in the order high-low
%wavelength. If more or less lasers are used changes need to be made in
%most places, as the function assumes "Data" will have a refractive index
%every 3:rd row. If "mini", "maxi", or "pnt" are changed corresponding
%changes needs to be done in "Miesetup".

function[best_num,best_d,ri]=Miecalculation(tra735,tra650,tra532,Data)

tra=[tra735,tra650,tra532]; %transmission values
% [infrared, red, green]

%calculation of the transmission ratios
% 1=infrared(735nm), 2=red(650nm), 3=green(532nm)
trans_ratio=[log(tra(1))/log(tra(2));log(tra(1))/log(tra(3));
            log(tra(2))/log(tra(3))];

%initial values
best_num=100;
best_d=100;
ri=1+1i;

```

```

mini=0; %minimum diameter (micrometer)
maxi=1.2; %maximum diameter (micrometer)
pnt=1000; %datapoints diameter
SSR=zeros(height(trans_ratio),pnt-1); %preallocating for speed
dia1=linspace(mini,maxi,pnt); %diameter range vector

%Compares the transmission ratios with the theoretical ones for different
%refractive indexes, finds the one that results in the lowest error and
%gives the corresponding diameter as output together with the error and
%index.
for i=1:height(Data)/3

    for j=1:length(trans_ratio)
        SSR(j,:)=((trans_ratio(j)-Data(3*(i-1)+j,3:pnt+1))).^2;
    end

    SSRR=sum(SSR);
    [num, index]=min(SSRR);

    mean_diameter=dia1(index);

    if num<best_num
        best_num=num;
        best_d=mean_diameter;
        ri=Data(3*i-2,1);
    else

    end

end

end

%Setupfunction for Mie scattering calculations. Calculates the scattering
%for currently three different wavelengths for the range of refractive
%indexes defined and saves it in Data together with the index. If more or
%less than three lasers are used, changes need to be made in "function"
%(both here and in umbrella), "wav" and "ratios". Changes in mini, maxi or
%pnt needs to be mirrored in th "Miecalculation" function. Changes to the
%rest should hopefully work :)

%input, green, red, infrared laser (increasing order of wavelength)
function[Data]=Miesetup(laser1,laser2,laser3)

%Initial values
m=1.5:0.05:1.95; %range of the real part of the refractive index
mi=(0.05:0.05:0.95).*1i;%range of the imaginary part of the refractive index
mini=0; %minimum diameter
maxi=1.2; %maximum diameter
pnt=1000; %number of calculation points
wav=[laser1, laser2, laser3]; %wavelengths used in the calculation

%Preallocating matrixes for speed
n=zeros(pnt,6);

```

```

Qext=zeros(length(wav),pnt);
Data=zeros(length(m)*length(mi)*3,pnt+1);
mmi=zeros(length(mi),length(m));

dia1=linspace(mini,maxi,pnt); %diameter range vector
rad=dia1/2; %radius range vector

%Creating matrix with all refractive indexes
for j=1:length(m)
    mmi(:,j)=m(j)+mi;
end
%Putting the refractive indexes in a single column
mmii=mmi(:);

%Calculating scattering for each refractive index, wavelenght and diameter
for k=1:length(mmii)

    for l=1:length(wav) %calc for the different wavelenghts

        x_p=(2*pi*rad)/wav(l); %calculation of wavenumber (x) vector for use in
        % the Mie calculation (its a required input)

        for i=1:pnt %calc of Qext, Qsct, Qb.. etc for the range of diameters

            miee=Mie(mmii(k,1),x_p(i));

            n(i,:)=miee; %creates one vector for Qext, Qsct, Qb.. etc for
            %range of diameters

        end

        Qextt=n(:,1); %takes out only Qext data from m vector

        Qext(1,:)=Qextt; %makes a vector of all the Qext values with wavelenght
        %for the range of diameter

    end

    %calculation of the Qext ratios for the various wavelenghts
    % 3=infrared(735nm), 2=red(650nm), 1=green(532nm)
    ratios=[Qext(3,:)./Qext(2,:);Qext(3,:)./Qext(1,:);...
            Qext(2,:)./Qext(1,:)];

    %Saving the refractive index. With three lasers (three parts of ratios) the
    %refractive index is currently saved in slot (1,1), (4,1), (7,1) etc.
    Data(height(ratios)*(k-1)+1,1)=mmii(k);
    %Saving the ratios. With three lasers the ratio infrared/red is saved in
    %slot (1,2:1001),(4,2:1001), the ratio infrared/green below it etc.
    Data(height(ratios)*(k-1)+1:height(ratios)*k,2:pnt+1)=ratios;
end

```



```

function result = Mie_ab(m,x)

% Computes a matrix of Mie Coefficients, an, bn,
% of orders n=1 to nmax, for given complex refractive-index
% ratio m=m'+im" and size parameter x=k0*a where k0= wave number in ambient
% medium for spheres of radius a;
% Eq. (4.88) of Bohren and Huffman (1983), BEWI:TDD122
% using the recurrence relation (4.89) for Dn on p. 127 and
% starting conditions as described in Appendix A.

z=m.*x;
nmax=round(2+x+4*x.^(1/3));
nmx=round(max(nmax,abs(z))+16);
n=(1:nmax); nu = (n+0.5);

sx=sqrt(0.5*pi*x);
px=sx.*besselj(nu,x);
p1x=[sin(x), px(1:nmax-1)];
chx=-sx.*bessely(nu,x);
ch1x=[cos(x), chx(1:nmax-1)];
gsx=px-i*chx; gs1x=p1x-i*ch1x;
dnx(nmx)=0+0i;
for j=nmx:-1:2      % Computation of Dn(z) according to (4.89) of B+H (1983)
    dnx(j-1)=j./z-1/(dnx(j)+j./z);
end;
dn=dnx(n);        % Dn(z), n=1 to nmax
da=dn./m+n./x;

```

```
db=m.*dn+n./x;
```

```
an=(da.*px-p1x)./(da.*gsx-gs1x);
```

```
bn=(db.*px-p1x)./(db.*gsx-gs1x);
```

```
result=[an; bn];
```

```
function result = Mie(m, x)
```

```
% Computation of Mie Efficiencies for given
```

```
% complex refractive-index ratio  $m=m'+im''$ 
```

```
% and size parameter  $x=k_0*a$ , where  $k_0$ = wave number in ambient
```

```
% medium,  $a$ =sphere radius, using complex Mie Coefficients
```

```
%  $a_n$  and  $b_n$  for  $n=1$  to  $n_{max}$ ,
```

```
% s. Bohren and Huffman (1983) BEWI:TDD122, p. 103,119-122,477.
```

```
% Result:  $m'$ ,  $m''$ ,  $x$ , efficiencies for extinction ( $q_{ext}$ ),
```

```
% scattering ( $q_{sca}$ ), absorption ( $q_{abs}$ ), backscattering ( $q_b$ ),
```

```
% asymmetry parameter ( $asy=\langle \cos\theta \rangle$ ) and ( $q_{ratio}=q_b/q_{sca}$ ).
```

```
% Uses the function "Mie_ab" for  $a_n$  and  $b_n$ , for  $n=1$  to  $n_{max}$ .
```

```
if x==0 % To avoid a singularity at  $x=0$ 
```

```
result=[0 0 0 0 0 1.5];
```

```
elseif x>0 % This is the normal situation
```

```
nmax=round(2+x+4*x.^(1/3));
```

```
n1=nmax-1;
```

```
n=(1:nmax);cn=2*n+1; c1n=n.*(n+2)./(n+1); c2n=cn./n./(n+1);
```

```
x2=x.*x;
```

```
f=Mie_ab(m,x);
```

```

anp=(real(f(1,:))); anpp=(imag(f(1,:)));
bnp=(real(f(2,:))); bnpp=(imag(f(2,:)));
g1(1:4,nmax)=[0; 0; 0; 0]; % displaced numbers used for
g1(1,1:n1)=anp(2:nmax); % asymmetry parameter, p. 120
g1(2,1:n1)=anpp(2:nmax);
g1(3,1:n1)=bnp(2:nmax);
g1(4,1:n1)=bnpp(2:nmax);
dn=cn.*(anp+bnp);
q=sum(dn);
qext=2*q/x2;
en=cn.*(anp.*anp+anpp.*anpp+bnp.*bnp+bnpp.*bnpp);
q=sum(en);
qsca=2*q/x2;
qabs=qext-qsca;
fn=(f(1,)-f(2,)).*cn;
gn=(-1).^n;
f(3,)=fn.*gn;
q=sum(f(3,));
qb=q*q'/x2;
asy1=c1n.*(anp.*g1(1,)+anpp.*g1(2,)+bnp.*g1(3,)+bnpp.*g1(4,));
asy2=c2n.*(anp.*bnp+anpp.*bnpp);
asy=4/x2*sum(asy1+asy2)/qsca;
qratio=qb/qsca;
result=[qext qsca qabs qb asy qratio];
end;

```