

Skalningseffekter av medelstora pölbränder i syrereducerad miljö

Tim Hemel & Philip Frenander
Avdelning för Brandteknik | LTH | LUNDS UNIVERSITET



EXAMENSARBETE
Brandteknik VBRM01

**Skalningseffekter av medelstora pölbränder i
syrereducerad miljö**

Tim Hemel
Philip Frenander

Lund 2024

Skalningseffekter av medelstora pölbränder i syrereducerad miljö
Scaling effects of medium pool fires in oxygen reduced atmosphere

Författare/Author: Tim Hemel & Philip Frenander

Report: 5715

ISRN: LUTVDG/TVBB--5715--SE

Antal sidor/Number of pages: 71

Illustrationer/Illustrations: 31 (65)

Sökord/Keywords

Sökord: syrereducerad atmosfär, medelstora pölbränder, skalningseffekter.

Key words: hypoxic air, oxygen reduced atmosphere, medium pool fire, scaling effects, LOC, yields.

Abstract

This bachelor's thesis focuses on how scaling the pool diameter affects flammable liquids in an oxygen reduction system (ORS). This topic in the study of pool fire behavior in hypoxic air has been only lightly discussed in previous literature. Therefore, the goal of this thesis work is to further broaden the understanding of hypoxic air. This is done through experimental studies, examination of prior literature and comparison between the two. Experiments were conducted with heptane and methanol contained in round steel vessels with a diameter of 0.2 m or 0.15 m, placed inside a hypoxic chamber. Fire behaviors were studied in oxygen concentrations (X_{O_2}) of 21 and 15 vol%, as well as the liquids' limiting oxygen concentration (LOC). The results that were found indicate that, for luminous and sooty fires such as heptane, an ORS has a larger reducing effect on fire behaviors, including peak heat release rate (HRR), peak HRRPUA, flame height and temperature compared to non-luminous and less sooty fires such as methanol. The fire reducing effects of hypoxic air were more prominent for the 0.2 m vessels than for 0.15 m. It was found that the biggest reduction in both peak HRRPUA and flame height was obtained when X_{O_2} was reduced, even though the percentage-based reduction of vessel area was greater than the percentage-based reduction of X_{O_2} . When down-scaling the pool diameter the fire-reducing effects were weaker when done in ORS opposed to normal atmosphere. This indicates that ORS is more effective for larger fires than small fires. CO/CO₂ yields were largely unaffected by hypoxic air for both flammable liquids. The liquids' LOC differed when different pool diameters were used, but no correlation between LOC change and pool diameter change was found. The conclusions that can be drawn from these results are that even though ORS at a X_{O_2} of 15 vol% does not prevent all fires from starting, it does have a reducing effect on the heat release rate and fire spreading capabilities of a pool fire. Furthermore, the results indicate that ORS has increased effectiveness with a larger size of pool fires. When using current standards, ORS works as an effective retardant of pool fires. To fully prevent pool fires with ORS, additional measures must be taken in research and current date regulations to further improve the use of hypoxic air in fire protection systems.

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University,
Lund 2024

Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2024

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

Förord

Vi vill rikta ett stort tack till professor Patrick van Hees och doktorand Joakim Åström vid avdelningen för brandteknik vid Lunds tekniska högskola. Deras kunskap, vägledning och stöd har varit ovärderligt i genomförandet av detta arbete. Vi vill även rikta ett tack till personal och ansvariga vid Brandlabbet vid Lunds tekniska högskola som bidragit med tid, plats och resurser för att utföra experimentella studier. Ett särskilt tack återigen till Joakim Åström som byggde och lät oss bruka hans hypoxic chamber.

Sammanfattning

Detta examensarbete undersöker hur skalning av pöldiametern påverkar pölbränder i ett syrereducerande system (eng. *oxygen reducing system*, "ORS"). Detta ämne inom studien av pölbränder i syrenedsatt miljö har endast diskuterats ytligt i tidigare litteratur. Därför syftar detta arbete till att bidra med en bredare förståelsen för hypoxic air. Detta görs i arbetet genom experimentella undersökningar, granskning av tidigare litteratur och jämförelser mellan de två. Experimenten utfördes med heptan och metanol i runda stålkärl med en diameter på 0,2 meter och 0,15 meter. Dessa kärl placerades inuti en kammare med möjlighet att sänka syrekoncentrationen. Brandbeteenden studerades vid syrgaskoncentrationer (X_{O_2}) på 21 och 15 vol %, och vätskornas begränsande syrgaskoncentration (eng. *limiting oxygen concentration*, "LOC") undersöktes. De resultat som erhöles indikerar att för bränder med en starkt strålände och sotande flamma, likt heptan, har ORS en större reducerande effekt på branden jämfört med svagt strålände och svagt sotande bränder som metanol. Brandeffekterna som undersökts är högsta effektutvecklingen (HRR), högsta effektutvecklingen per ytenhet (eng. *heat release rate per unit area*, "HRRPUA"), flammhöjd, och temperatur. De brandreducerande effekterna vid en sänkt X_{O_2} var större för kärl med 0,2 m jämfört med 0,15 m. Det visades även att den största minskningen i peak HRRPUA och flammhöjd erhöles när X_{O_2} minskades, trots att den procentuella minskningen av kärlstorleken var större än den procentuella minskningen av X_{O_2} . Vid nedskalning av pölens diameter var de hämmande effekterna svagare när kärlreduktionen gjordes i ORS jämfört med normal atmosfär. Detta indikerar att ORS är effektivare och har en starkare hämmande effekt för större bränder än för små bränder. CO/CO₂-produktion påverkades i stort sett inte av ORS för båda brandfarliga vätskorna. Vätskornas LOC skiljde sig när olika pöldiametrar användes, men ingen korrelation mellan LOC-förändring och pöldiameterförändring kunde erhållas. Slutsatserna som kan dras från dessa resultat är att även om ORS vid en X_{O_2} på 15 vol % inte kan förhindra att alla bränder från att starta, har det en reducerande effekt på effektutvecklingen och brandspridningsförmågan hos en pölbrand. Ytterligare indikerar resultaten att ORS har en starkare hämmande effekt mot större pölbränder. Med dagens standarder fungerar ORS som ett effektivt hämmande brandskydd mot pölbränder. För att helt skydda mot uppståndelsen av pölbränder med ORS måste dock ytterligare åtgärder vidtas i forskning och nuvarande regelverk för att vidare förbättra användningen av hypoxic air i brandskyddssystem.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Ordlista

ORS - Oxygen Reduction System

HRR - Effektutveckling (eng. *Heat Release Rate*)

HRRPUA - Effektutveckling per ytenhet (eng. *Heat release rate per unit area*)

X_{O₂} - Syrekonzentration

CAC - Controlled Atmosphere Calorimetry

MLR - Massförlust (eng. *Mass Loss Rate*)

UFL - Upper Flammability Limit

LFL - Lower Flammability Limit

LOC - Limiting Oxygen Concentration

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte och mål.....	2
1.3 Problemformulering	3
1.4 Kunskapsutveckling.....	3
1.5 Disposition.....	3
1.6 Avgränsningar och begränsningar	3
1.6.1 Inga mätningar för massförlust.....	3
1.6.2 Ingen infallande strålning	4
2 Metod.....	5
3 Litteraturstudie	6
3.1 Hypoxic Air	6
3.2 Oxygen Reduction Systems.....	8
3.3 Hypoxic air effekt på brand	8
3.4 ORS effekt på fasta material.....	8
3.5 ORS effekt på flytande material	9
3.6 ORS effekt på skalning av vätskediameter	11
3.7 Open Controlled Atmosphere Calorimetry (open CAC).....	12
3.8 Beräkningsmetod HRR_OC och HRR_CDG.....	13
3.8.1 Generellt	13
3.8.2 Savitzky-Golay metoden för flytande medelvärde.....	14
4 Laborativ undersökning.....	16
4.1 Design av experimentell uppställning.....	16
4.2 Ingående parametrar och variabler	16
4.3 Experimentell uppställning	18
4.4 Experimentellt genomförande	21
5 Resultat.....	23
5.1 Översikt.....	23
5.2 Exempelkurvor för HRR_OC och HRR_CDG	24
5.3 HRR	25
5.3.1 Heptan	25
5.3.2 Metanol	28

5.3.3 Peak HRRPUA.....	29
5.3.4 Isolering	29
5.4 Flamhöjd och okulära observationer	31
5.5 Kammartemperatur.....	35
5.6 Kärntemperatur.....	38
5.7 Förbränningsprodukter	40
5.8 Laserreduktion.....	41
5.9 Limiting Oxygen Concentration (LOC)	42
6 Diskussion	43
6.1 Resultat	43
6.1.1 Beräkningsmetod HRR_OC och HRR_CDG	43
6.1.2 Effektutveckling.....	43
6.1.3 Total energi.....	45
6.1.4 Temperatur	45
6.1.5 Förbränningsprodukter och laserreduktion	46
6.1.6 Okulära observationer	47
6.2 Avvikelser.....	47
6.2.1 Vätskans brinntid.....	47
6.2.2 Isolering	48
6.3 Svar till frågeställning.....	49
7 Förslag på fortsatta studier.....	51
8 Slutsats	52
Referenser	53
Bilaga A	55

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Hypoxic air är ett relativt nytt brandskyddssystem som utnyttjar den brandhämmande effekten hos syrereducerad luft för att förebygga och reducera brand och dess förödande effekter. Detta utförs i praktiken genom att för ett rum eller utrymme som behöver brandskyddas kontinuerligt tillsätta kväve till luften genom att använda ventilationsfilter som endast tillåter kväve att passera. Detta späder ut syrehalten så att en permanent syrereducerad atmosfär uppstår. Detta erbjuder ett brandskydd mot en bredd av bränslen och har användningsområden inom bland annat industri, lager och kärnkraft. Det som utmärker hypoxic air från andra brandskydd är att den syrereducerade atmosfären har möjlighet att helt förhindra bränder från att uppstå, och skulle de uppstå kan atmosfären fortfarande ha en hämmande effekt på branden. Den hämmande effekten gör att magnituden av samtliga brandeffekter reduceras, vilket innebär att både storlek och spridning av brand blir mindre (Nilsson & van Hees, 2014). För en brandsäker framtid är målet, med hjälp av dagens forskning, att ett syrereducerande system (eng. *oxygen reduction system*, "ORS") för en bredd av verksamheter ska kunna utgöra ett fullskaligt brandskydd som tillåter tillfredsställande utrymning vid händelse av brand. Tillfredsställande avser att personer som utrymmer, med tillräcklig säkerhet, inte utsätts för nedfallande byggnadsdelar, höga temperaturer, hög värmestrålning, giftiga brandgaser eller dålig sikt som hindrar utrymning till en säker plats (Boverkets Författningssamling, 2011).

Utöver utrymning ska även brandskyddet i sig vara tillfredsställande, vilket innebär att byggnader, inventarier och annan egendom ska utsättas för så liten skada som möjligt i händelse av brand. För att uppnå detta dimensionerar man utrymmet med kvantitativt mätbara brandegenskaper, vilket innefattar infallande strålning, CO/CO₂-produktion, effektutveckling och flam- och gastemperaturer. Beroende på konstruktionsmaterial, konfigurationer av rummen och utrymningsmöjligheter samt närvarande bränslepaket kan maximalt tillåtna värden för dessa brandegenskaper erhållas. För att tillfredsställande förhållanden ska kunna säkerställas ska dessa maxvärden ej överskridas. Att få bättre kunskap om hur olika material beter sig i brandskyddade miljöer är därför av stor vikt och intresse.

Forskningen kring vätskebränder i syrereducerade miljöer är enligt P. van Hees (personlig kommunikation, 1 september 2023) starkt begränsad jämfört med informationen som går att hitta kring vätskebränder i vanlig atmosfär. På grund av att ORS fortfarande är en relativt ny tillkomst som brandskydd svarar även forskningen mot detta.

Av den lilla mängd material som publicerats hittills finns dock en enad åsikt kring brandeffekterna som erhålls av ett sådant system vid bränder i fasta material, vilket i testmiljöer ofta inkluderar trä, PVC och plywoodskivor. Vad etablerade brandforskare pekar på är att de kvantifierbara brandegenskaperna effektutveckling (eng. *Heat Release Rate*, "HRR"), massförlust (eng. *Mass Loss Rate*, "MLR"), brandspridning och flammhöjd sjunker när

en brand tar plats i en syrereducerad miljö. Samtidigt är CO/CO₂-produktion, sotproduktion och antändningstid egenskaper som ökar (Nilsson & van Hees, 2014).

Förekomsten av brännbara vätskor i samhället är stor, inte minst i industrivärlden. Här används ett brett sortiment av ämnen, exempelvis bensin och diesel som drivmedel för maskiner och fordon, eller metanol som lösningsmedel i produktutveckling. Enligt NFPA (2022) är vätskebränder den tredje ledande orsaken till att bränder startat i lagerbyggnader, samt störst orsak till civila skador. Med tidigare nämnd uppåtgående trend i etablerandet av lagerbyggnader syns ett tydligt behov att förstå ORS och utveckla tekniken till ett tillförlitligt och effektivt brandskydd.

För att kunna dimensionera ett brandskyddssystem med hypoxic air behövs information om hur brännbara vätskor beter sig när de utsätts för syrereducerade miljöer, och hur de kvantitativa egenskaperna HRR, MLR, produktion av gaser, flamhöjd och antändbarhet påverkas. Vätskebränder är dessutom unikt i det avseendet att det endast är vätskans ytarea som brinner, gentemot många fasta material som kan ha mer komplicerad förbränning; glödbland, olika höjduppställning samt vertikal flamspridning är alla egenskaper som kan påverka den slutgiltiga brandeffekten. Simpliteten i pölbrandens förbränningsprocess gör att diametern för pölbranden har en stark påverkan på förväntad intensitet och ofta blir den dimensionerande egenskapen, vätskans natur åsido. Kunskap om hur brandegenskaper påverkas när brandens diameter skalas upp och ner blir därför oerhört viktig. Med tillgång till sådan kunskap kan brandbeteenden och brandeffekter med hög precision extrapoleras även för större bränder än det som kan testas i laborativa förhållanden. Detta har gjorts under lång tid för vätskebränder i normal atmosfär där ekvationer har erhållits som förutspår effektutveckling, strålning, förbränningsprodukter och beteenden (Drysdale, 2011). För att kunna skapa liknande ekvationer för vätskebränder i ORS behövs kunskap om skalningseffekterna, och det är denna kunskap detta exjobb eftersträvar att bidra till.

1.2 Syfte och mål

Detta arbete syftar till att med empiriska och litterära studier redogöra för beteendet hos medelstora bränsleytor av brandfarliga vätskor i syrenedsatta miljöer. Det syftar ytterligare till att redogöra för hur förändring i vätskediameter påverkar brandegenskaper, även detta i syrereducerad atmosfär. Erhållna resultat ska vidareutveckla förståelsen och forskningsunderlaget för vätskebränder i hypoxic air samt förståelsen för ORS som ett brandskydd, områden som idag saknar större belägg.

Arbetets mål är att med hjälp av experiment och litteraturstudier ta reda på hur mediumskalade vätskebränder beter sig i ORS. Effektutveckling (eng. *heat release rate*, "HRR"), effektutveckling per ytenhet (eng. *Heat Release Rate Per Unit Area*, "HRRPUA") och CO/CO₂-yield är data som genom mätning och beräkningar kommer utvärderas vid två varierande syrekoncentrationer (X_{O_2}): 20,95 % (skrivs härnäst som 21 %) och 15 %. Limiting oxygen concentration (LOC) kommer mätas från 21 % X_{O_2} ner till att flammen slocknar. Information om hur vätskebränderna beter sig när deras storlek förändras och om skalningssamband går att hitta är även en del av detta arbetes syfte. Observationer via filminspelning kommer göras för samtliga försök där speciell vikt läggs på flamhöjd, upplevd

turbulens och flammans sotighet. Den inhämtade datan kommer sedan jämföras med resultat från litteraturen, där likheter och olikheter kommer diskuteras.

1.3 Problemformulering

Frågor som rapporten ämnar besvara är

1. Hur påverkas mediumskalade heptan- och metanolbränders brandegenskaper av att man sänker syrekonzentrationen från 21 % till 15 %?
2. Hur påverkas mediumskalade heptan- och metanolbränders brandegenskaper av att man skalar ner diametern på branden i syrereducerad miljö på 15 % X_{O_2} ?
3. Kan hypoxic air ensamt utgöra ett tillfredsställande brandskyddssystem vid lagring och användning av heptan och metanol?

1.4 Kunskapsutveckling

Examensarbetet avser bidra till en ökad kunskap och förståelse om hypoxic air och dess effektivitet som brandskydd vid lagring av brandfarliga vätskor, samt hur mediumskalade vätskebränder beter sig i syrenedsatt miljö med avseende på skalning, antändlighet, effektutveckling, massavbrinning och CO/CO₂-produktion. Befintlig litteratur kring dessa ämnesområden är bristfälligt, varpå detta arbete avser bidra till forskningen.

1.5 Disposition

Först förklaras arbetets använda forskningsmetod, sedan beskrivs befintlig litteratur kring vätskebränder i hypoxic air. Därefter behandlas de experimentella försöken, vilket bland annat omfattar testuppställning, genomförande av prover, observationer och anmärkningar under tester med mera. Därpå presenteras resultaten som erhållits i de laborativa försöken. Efter det kommer en diskussionsdel som jämför resultat med litteratur samt tar upp avvikelser som förekommit i rapporten. Avslutningsvis kommer en slutsats som avrundar rapporten samt besvarar frågeställningen.

1.6 Avgränsningar och begränsningar

I detta avsnitt följer avgränsningar som gjorts i arbetet som innefattar beslut om användandet av mätutrustning och designval av den laborativa uppställningen.

1.6.1 Inga mätningar för massförlust

Massförlusten hos vätskorna har ej mätts i detta arbete. Det finns ett par anledningar till detta, och en av dem är att det ej ansågs ge tillförlitliga data för heptantesterna då botten av kärlet fylldes med vatten för samtliga försök. Detta för att skapa en jämn förbränningsyta. Om en lastcell placerats under kärlet i dessa försök hade lastcellen registrerat både vattnets och heptanens massförlust, då heptanen förångas och förbränns medan vattnet kokar bort. De två massförlusterna från båda vätskorna hade medfört stora svårigheter i avläsning av data för att urskilja vad heptanens massförlust var.

En annan anledning till att massförlust ej mättes var att mätinstrument för en sådan undersökning ej fanns tillgänglig bland resurserna som tillhandagavs inför exjobbet. Tillgängliga resurser tillät heller inte införskaffning av sådan mätutrustning.

En tredje anledning till att massförlust ej mättes var att datan ej ansågs vital för att se korrelationer och samband mellan X_{O_2} och kärstorlekens påverkan på brandeffekterna. Samband kunde erhållas även utan massförlust. Därtill har litteratur visat att massförlust och effektutveckling följer ett linjärt samband där en parameter växer om den andra också gör det (Nilsson & van Hees, 2014). Att mäta massförlust hade alltså inte varit överflödiga data och tvärtom också en intressant aspekt att jämföra med litteraturen, men arbetet fallerar inte på att ej ha inkluderat denna parameter då effektutvecklingen ger liknande resultat.

1.6.2 Ingen infallande strålning

Infallande strålning är en parameter som är vanligt förekommande i brandtester för fasta material, se avsnitt 3.4 ORS effekt på fasta material och Nilsson & van Hees (2014). Att använda infallande strålning görs med motivationen att det redan finns antända bränslepaket i närheten av det undersökta materialet som bidrar med strålning och därmed påverkar antändnings- och förbränningsprocessen. För detta arbetes laborativa undersökningar har ingen påliggande strålning använts utöver den egenproducerade strålning från brandens flamma. Anledningen till detta är att exjobbet är utformat för att undersöka en brands benägenhet att uppstå i en utspild brännbar vätska om detta skulle vara en primär brandkälla. Om utomstående strålning hade använts för att antända eller påverka vätskebränderna hade det implicerat att aktuellt ORS ej kunnat förebygga den första branden som ska agera antänt bränslepaket. Då anses inte vidare undersökning på huruvida ORS kan förhindra pölbranden att antända vara nyttig eftersom det skyddade rummet redan har en påbörjad brand i sig. Ytterligare är inte arbetet utformat för att ta reda på huruvida brännbara vätskor kan antända med en annan primär brandkälla i närheten. Fokus ligger istället på att undersöka om vätskebränder i ORS kan antändas från lågenergikällor för att simulera verkliga scenarion där utspild vätska kan komma att exponeras för till exempel svetsloppor och gnistor från heta arbeten, maskineri och kablage.

Utöver aspekten om antändning påverkas även förbränningsprocessen och effektutvecklingen om påliggande strålningen ökar. Ökad infallande strålning skulle öka värmeöverföringen till vätskan vilket ger en direkt ökning på regressionshastighet (Blinov & Khudiakov, 1961; Chen, 2023). Detta är inte önskvärt att undersöka i detta arbete, då frågan som ställs är hur *vätskans* brandeffekter påverkas när X_{O_2} sänks. Detta för att bidra med information om hur dimensionering av brandskydd ska ske utefter att dessa vätskor lagras på plats. Att införa en utomstående strålning medför en stor del osäkerheter och antaganden som skulle göra detta redan nischade område ännu mer fördjupat och specifikt, vilket kan göra datan oanvändbar för framtida användare som ej använder samma förutsättningar. Målet med arbetet är att bidra med information om vätskebränder i ORS som kan agera som en bas för framtida arbeten att bygga vidare på.

2 Metod

Forskningsmetoden som använts i detta arbete är experimentella försök kompletterade med litteraturstudier. Experiment utfördes för att erhålla resultat om hur mellanskalade pölbränder agerar i syrenedsatt miljö, för att sedan jämföra med tidigare arbeten och litteratur. Eftersom ämnet hypoxic air som brandskyddssystem är relativt nytt och ej grundligt efterforskat har befintlig litteratur ingen stor mängd konkret information om vad förväntat beteende för pölbränder i syrenedsatt miljö är. Därför har det i detta arbete bestämts att hämta egen information genom empirisk försöksmetodik, som sedan kan jämföras mot scenarion och litteraturer som ej nödvändigtvis är likadana, men som är snarlika och har jämförbara omständigheter. I många fall utspelar sig denna jämförelse mellan experiment och litteratur genom att pölbrandens brandegenskaper som är i fokus får jämföras för sig, och ytterligare egenskaper får bortses från tillfälligt. Grunden till detta är att det finns en begränsad mängd publicerat material som fokuserar på mellanskalade pölbränder i syrenedsatt miljö. Istället jämförs till exempel skalningseffekter erhållen från detta arbetes experiment med andra arbeten som behandlar just skalningseffekter av vätskebränder. Likaså jämförs effekten av vätskebränder i syrenedsatt miljö med arbeten som fokuserar på just ventilationsegenskaper och påverkan av nedsatt syre på pölbränder. När sådana jämförelser har gjorts får korrelationer, likheter och olikheter diskuteras mellan verken. När tydliga trender erhållits får det slutligen undersökas om teori stämmer överens med praktik, där skillnader och olikheter kommer att diskuteras.

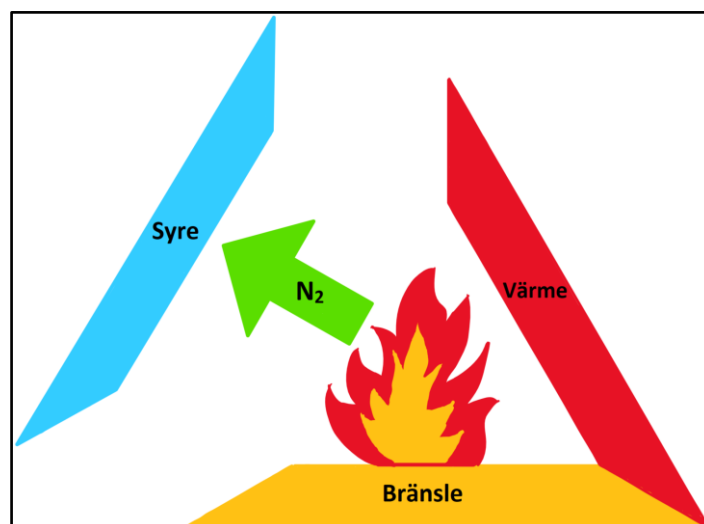
Litteraturstudien genomfördes 29/8-2023 huvudsakligen via sökmotorn LUBsearch och Google Search Engine, där sökorden pool fire, flammable liquids, automated warehouse, oxygen reduced air, hypoxic air, ventilation controlled, scaling factor, soot production, mass loss rate och andra synonyma termer har kombinerats för att hitta artiklar, rapporter och avhandlingar. Dessa sökord gav träffar på många arbeten, ofta utanför detta arbetes intresseområde. Framför allt sökningar med "hypoxic air" medförde svårigheter då det oftast resulterade i artiklar som behandlar det medicinska fenomenet hypoxi i människor. Ett urval bland artiklar och rapporter fick därför göras, där den dominerande beslutsfaktorn var om den undersökta artikeln arbetade under liknande förhållanden som detta arbete gör. Det vill säga med gas- eller vätskebränder i någon form av syre-reducerad eller syrekontrollerad miljö.

3 Litteraturstudie

I arbetets början genomfördes en initial litteraturstudie på ämnet hypoxic air för att ta reda på vad det handlar om, vilka områden det fanns forskning på och vilka det fanns mindre belägg för. Detta för att kunna bestämma vad som var värt att undersöka när laborationerna sattes i gång, hur försöken skulle utformas samt vilka möjliga frågor testresultaten skulle kunna besvara. Härefter gjordes laborativa försök och därpå utfördes en utförlig litteraturstudie, denna gång för att hitta underlag och förklaringar som kopplar till de laborativa testresultat som erhållits. I nedan följande delar presenteras det vad litteraturen säger om hypoxic air, Oxygen Reduction Systems, deras funktioner, användningsområden och påverkan på brand i fasta material samt flytande ämnen. Hur skalningseffekter ser ut och hur beräkning av effektutveckling görs redogörs också för. Dessa områden utgör en bas av information som behövs för att förstå hur hypoxic air fungerar, hur detta arbete gjort för att ta fram sina resultat samt vad dessa resultat betyder och hur de ställer sig till tidigare litteratur.

3.1 Hypoxic Air

Hypoxic air eller syrereducerad luft kan erhållas genom olika metoder. Man kan till ett avsett utrymme tillsätta en förblandad luftmix (Jensen, 2006) eller inert gas, vanligen kväve, och på så sätt späda ut mängden syre i luften till en lägre volymprocent än i naturlig atmosfär. Det är även möjligt att pumpa luft genom ett filter som bara släpper igenom kväve och därav få en syrereducerad miljö (Chiti, 2010). En lägre syrenivå innebär förändrade egenskaper för omgivningen och människor som vistas i den, men den mest intressanta egenskapen för detta arbete är dess hämmande effekt på brand. I ORS används vanligen en X_{O_2} mellan 21 % som är naturlig luft och 15 % som klassas som inert luft (Jensen, 2006). Vid en X_{O_2} på 15 % har systemet en förebyggande, eller åtminstone hämmande effekt på förekomst av brand i de flesta fasta material. Detta baseras på teorin av brandtriangeln där brand behöver bränsle, värme, och syre för att uppstå och spridas, se figur 1 nedan. Tas syret bort kommer brand inte längre kunna uppstå, vilket sker när kväve tillsätts och späder ut luften (Drysdale, 2011). Kvävet kyler även ner flaman eftersom det har en högre specifik värmekapacitet än luft, vilket också bidrar till nedsatt brännbarhet. Effekten av nedkylningen är dock ganska liten i förhållande till effekten av syrebristen då skillnaden i värmekapacitet mellan kväve och syre är liten i sig (Nilsson & van Hees, 2014).



Figur 1. Illustrerar hur kvävet syrebegränsande effekt bryter brandtriangeln och förhindrar brand. Av Hemel, T. Modifierad från Chiti S. (2010). *Test Methods for Hypoxic Air Fire Prevention Systems and Overall Environmental Impact of Applications*. [bild].

Det finns bränslen och ämnen som kan antändas vid lägre syrekoncentrationer, även lägre än de som upprätthålls vid traditionell ORS. Exempel på sådana vätskor är metanol och heptan som båda har en LOC som är lägre än 15 %. LOC är den lägsta syrenivå för vilken ett givet bränsle kan brinna (Chiti, 2010). För att säkerställa att ett ORS förebygger samtliga bränder, däribland även material med $LOC < 15\% X_{O_2}$, krävs en X_{O_2} på 10-12 % (Kuchta, 1985; Chiti, 2010). Här tillkommer dock hälsorisker för människor som vistas i den syrenedsatta miljön, se tabell 1 (Chiti, 2010). Beroende på vilken syrekoncentration och tidslängd som människor vistas i den syrereducerade atmosfären kan symptom sträcka sig från nedsatt finmotorik och tankeverksamhet till andnöd, medvetslöshet och död. I dagsläget går därför ORS endast ner till 15 % i bemannade miljöer för att tillåta vardaglig verksamhet att fortgå och samtidigt sänka risken för och effekten av en brand (Jensen, 2006; Nilsson & van Hees, 2014).

Tabell 1. Symptom och exponeringstider för olika syrekoncentrationer, reproducerad från Chiti. S (2010) *Test Methods for Hypoxic Air Fire Prevention Systems and Overall Environmental Impact of Applications*. [tabell].

Syrekoncentration (vol %)	Symptom	Exponeringstid
21-17	Inga (normal syrenivå)	-
17-15	Nedsatt mörkerseende	-
15-13	Ökad andningsfrekvens och puls	-
13-11	Trötthet, huvudvärk, nedsatt fysisk och intellektuell förmåga	1 h
11-10	Yrsel och desorientering	20 min
10-8	Medvetslöshet och torpor	2 min
5-0	Kramper, apné, hjärtstillestånd, död	<1 min

3.2 Oxygen Reduction Systems

Syrereducerad luft har använts länge till brandskydd och brandbekämpning, men just ORS som brandskydd förekommer i olika varianter först runt 1990-talet, och har de senaste åren snabbt fått större spridning inom marknad och forskning (Lundgren et al., 2014). Vid 2014 fanns 500 kända installationer av syrereducerande system runt om i världen (Nilsson & van Hees, 2014), där vanliga applikationsområden var datacentraler, elrum, automatiserade lager, arkiv och historiska byggnader (Jensen, 2006). Enligt en rapport av Scriven (2023) förutses produktionen av lagerbyggnader fortsätta att öka från att ha byggt 6700 nya lagerbyggnader i 2023 till nära 12000 nya byggnader till 2027, där dessutom 25 % av dessa ska vara automatiserade. Det finns alltså en stigande trend i automatisering av lagerbyggnader, där ORS är ett väl lämpat brandskyddssystem (Nilsson & van Hees, 2014).

3.3 Hypoxic air effekt på brand

Den generella idén utmed forskningen är att minskad X_{O_2} bidrar till minskad HRR, MLR, flamspridningshastighet, flamhöjd, ökad antändningstid och ökad antändningsenergi (Nilsson & van Hees, 2014). Detta är dock främst kartlagt för fasta material. För flytande material är undersökningarna färre vilket gör sökning av information försvårad, men inte omöjlig. I nedan följande kapitel redogörs det för hur litteraturen beskriver att fasta och flytande material beter sig i syrenedsatt miljö.

3.4 ORS effekt på fasta material

Övervägande majoritet av forskning som gjorts på brandegenskaper i syrenedsatt miljö har gjorts på fasta material, där de vanligaste testmaterialen är plywood-skivor, PVC och PMMA (Nilsson & van Hees, 2014). Resultat som erhålls från tester kan variera från varandra beroende på material, procedur och testuppställning, men generella beteenden går att fastställa. De flesta försöken innefattar någon form av infallande strålning på bränslet, vilket motiveras ur scenariot att det redan finns ett antänt bränslepaket i närheten av det undersökta materialet som bidrar med strålning. Den infallande strålningen från konkalorimetern varierar vanligen mellan 20-50 kW/m² och är en parameter som påverkar brandegenskaperna bland annat i form av ökad pyrolysning och minskad nödvändig antändningsenergi (Nilsson & van Hees, 2014). Detta bör tas hänsyn till när jämförelser görs med detta arbetes tester för flytande material där ingen utomstående strålning har använts. Motivering till detta finns i diskussionen bland rapportens avvikelser.

I undersökningen av syrenedsatta miljöers påverkan på bränder i fasta material har information främst hämtats från Nilssons & van Hees (2014) artikel. Här kan det observeras att med sänkt X_{O_2} ökar generellt antändningsenergin och antändningstiden. Antändningstiden såg dock endast en ökning vid reducerad X_{O_2} när infallande strålningen var 50 kW/m², och utan strålning rapporterades skillnaden försumbar. Sotproduktionen ökar generellt när fasta material brinner i ventilationskontrollerade förhållanden, vilket också observerades i Nilssons & van Hees artikel, även om just denna variabel inte fick så stort utrymme i artikeln och kräver mer belägg i framtida forskning. Brandtillväxt och brandspridningshastighet är däremot grundligare undersökta egenskaper, och här ses en tydlig positiv inverkan när syrekoncentrationen sänks. Med en reducerad X_{O_2} minskar brandens tillväxtfas från antändning till steady-state HRR. Både horisontell och vertikal

flamspridningshastighet minskar med X_{O_2} , där skillnaden hos det sistnämnda är mer markant. Slutligen studeras HRR och MLR, två parametrar som båda är beroende av testobjektets effektiva förbränningsenergi (*eng: effective heat of combustion* " ΔH_{eff} "). Detta innebär i stor utsträckning att de följer ett linjärt samband där om ena parametern sjunker i värde sjunker även den andra. För de flesta observerade fallen i Nilssons & van Hees studie var materialens ΔH_{eff} opåverkad av en reducerad X_{O_2} , förutom för tester gjorda på hög altitud vid 3650 m över havet (Yao et al., 2013) där ämnets ΔH_{eff} var 40 % lägre än vid havsnivå. Denna avvikelse motiveras med att de ej använde någon extern infallande strålning för att pyrolysera materialet samt att det förändrade statistiska trycket påverkade förångningen av brandgaser. Detta påverkar MLR som i sin tur går ifrån det linjära sambandet med HRR. För resterande tester gjorda på marknivå i artificiellt skapade syrereducerade miljöer kunde en lika stor minskning i HRR och MLR observeras, och i många fall var minskningen upp till 20 % lägre.

Sammanfattningsvis har ORS en positiv inverkan på de flesta kvantifierbara brandegenskaper hos en bredd av fasta material. Tekniken försvårar antändning, förlänger tillväxtfasen samt sänker effekten av en potentiell brand. För att tillåta verksamhet i atmosfären krävs en syrehalt på 15 % var brand fortfarande kan uppstå och sprida sig, men med den sänkta syremiljön blir sannolikheten för brand sänkt och potentiella skador hämmade.

3.5 ORS effekt på flytande material

Det finns få publikationer som diskuterar brännbara vätskors brandegenskaper i syrereducerade miljöer specifikt. Däremot är brännbara vätskor ett sedan länge studerat ämne, och det finns publikationer som behandlar scenarion snarlika de som presenteras här. Ett exempel på sådana publikationer är artikeln av Yao et al. (2019) som undersöker ventilationskontrollerade pölbränder i tunnlar. I den artikeln erhålls liknande förhållanden som eftersträvas i detta examensarbete, varav information och resultat anses jämförbara. Denna metod av att välja litteratur som använder snarlika förhållanden är genomgående för den teoretiska uppbyggnaden av brandegenskaper för brännbara vätskor i syrenedsatta miljöer. Då underlag som undersöker just skalningseffekter av pölbränder i ORS är fåtaliga och svåra att finna är detta den bästa metoden tillgänglig idag.

Ett examensarbete som dock behandlar just pölbränder i syrereducerad luft är det av Hersner & Nilsson (2021). Detta arbete undersökte fem brännbara vätskor i småskaliga kärllstorlekar. Deras resultat påvisar svårigheter att se generella samband i beteenden hos samtliga vätskor som undersöktes, då det inte finns någon brandegenskap som påverkas likadant av reducerad syrenivå för någon av vätskorna. Dock går det att se generella trender, och dessa trender pekar på, om än ibland tämligen vagt, en positiv inverkan av ORS på vätskebränder. I exjobbet observeras det att för spannet av undersökta vätskor kan en reducerad syrehalt likväl höja som sänka HRR, MLR och CO/CO₂-produktion. Dock kan det ses att för majoriteten av vätskorna, vilket i de flesta fallen är tre av fem, sjunker peak HRR och MLR i olika stor grad. Det går även att se att CO₂-produktionen för majoriteten av vätskor ökar när syrenivån sjunker. CO-produktionen följer väldigt irreguljära mönster för de olika vätskorna vilket gör det svårt att fastslå ett konsekvent beteende och bedöma vad som bidrar mest till resultatet: ORS eller mät- och testprocedur. Som rapporterat i Nilsson och

Hersners examensarbete fanns det svårigheter med reproducerbarhet för försöken vilket kan förklara avvikande trender. Metanol är den gemensamma vätska som både Hersner & Nilsson samt detta arbete valt att studera. Effekterna på just denna vätskas brandegenskaper när syrenivåerna trappades ner var att effektutvecklingen samt CO/CO₂-produktionen ökade, medan massavbrinningen följde ett irreguljärt mönster som först minskade sedan ökade. Dessa observationer kommer senare jämföras med detta arbetes egna tester.

En annan artikel som studerar brännbara vätskors brandegenskaper och som nämndes tidigare är det av Yao et al (2019). Här är det inte explicit vätskebränder i syreducerade miljöer som undersöks, utan i stället pölbränder i modellskalade tunnlar som i olika grad når en ventilationskontrollerad förbränning. I artikeln kan syrekoncentrationen i flertalet fall observeras nå så låga nivåer som 14 volymprocent, vilket är snarlikt de nivåer som detta arbete utforskar. Även om testmetod och mål inte följer samma konsensus tas beslutet att resultaten från deras artikel gällande brandegenskaperna är applicerbara även på detta arbete. Detta då likartade förhållanden erhålls för både pölbränder som blir syrebegränsade genom kvävevitierad luft såväl pölbränder som blir ventilationskontrollerade genom begränsning av tillflöde av luft. Resultatet blir att branden har en reducerad tillgång till syre vilket påverkar förbränningsmöjligheten. Något som bör beaktas i denna liknelse och som skiljer de två metoderna åt är att kvävevitiering har en ytterligare kylande effekt hos flammen på grund av den högre specifika värmekapaciteten hos kväve jämfört med syre. Detta begränsar och hämmar flammans värme och brandens effekt ytterligare, utöver att kvävet späder ut syret i luften vilket försvårar tillgången till syre i förbränningen.

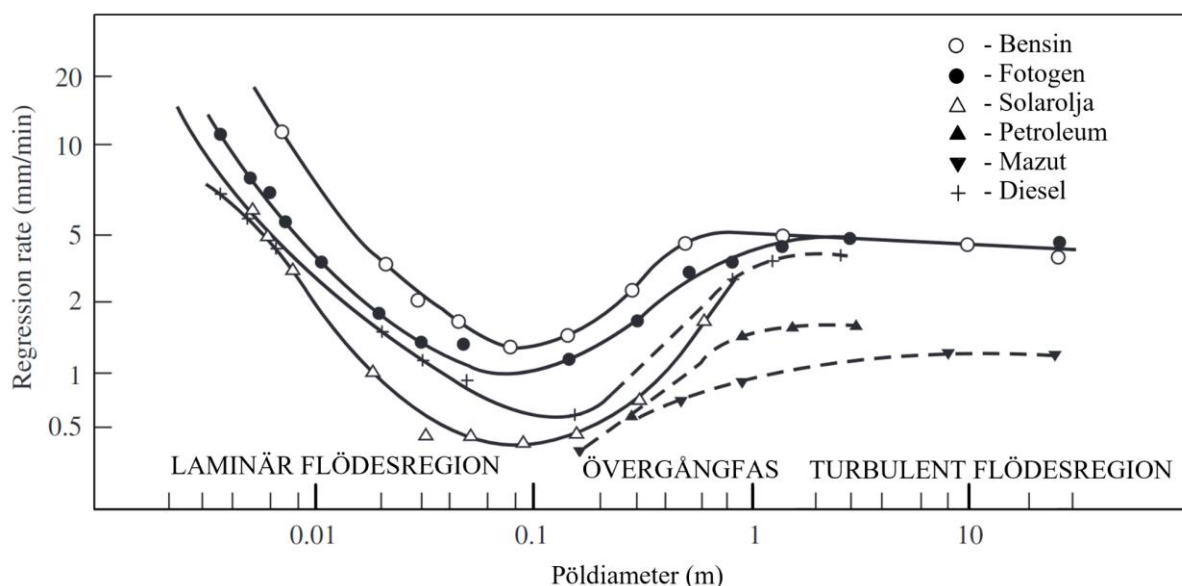
Vad Yao et al. (2019) observerade i sin artikel var att MLR minskade i takt med att branden blev mer ventilationskontrollerad vilket i sin tur sänkte effektutvecklingen. Detta har tidigare etablerats vara logiskt då de två egenskaperna hänger ihop genom det brinnande ämnets effective heat of combustion, och minskar den ena attributen följer den andra efter (Nilsson & van Hees, 2014). Rapportens mätningar för CO/CO₂-produktion visar att mindre CO produceras när branden blir ventilationskontrollerad, och skribenternas motivering är att när syretillgången går ner minskar MLR som tidigare nämnt. När MLR minskar gör HRR likaså, och med mindre effekt från branden blir även produktionen av CO mindre. En ytterligare observation som görs i rapporten är att vid lägre syrenivåer kunde flammen ses lämna basen av kärlet, brinna flackande ovanför kärlet och även utanför kärlets kanter. Fenomenet kallas "ghosting fire" eller "ghosting flames", och är något som kan observeras hos pölbränder vid låga syrekoncentrationer.

En annan artikel som kan bidra till rapportens sammanställning av brandegenskapers beteenden är den av Xiong et al. (2021). Deras arbete behandlar mätning av sotproduktion från en gasbrännare via laser i syreundersatt miljö. Det som undersöks och som är av intresse är vad som händer med sotproduktion när syrekoncentrationen sänks, något som även detta examensarbete undersöker. Artikeln bedöms därför vara relevant för detta arbete. Observationerna som görs av Xiong et al. är att när syrekoncentrationen sänks minskar sotproduktionen som följd. Detta motiveras med två orsaker. Minskningen sker både för att kvävevitierad luft bidrar till lägre flamtemperatur som vidare leder till mindre bränsle som förbränns och därmed mindre sot som bildas, men även för att mindre sot oxideras i flammen när syrekoncentrationerna är lägre.

Litteraturen, om än den är i begränsad omfattning, tyder på att för även flytande bränslen har ORS en hämmande och reducerande effekt på brandeffekterna. HRR och MLR kan ses minska i flertalet fall, och CO/CO₂ har en reducerad produktion. För fasta material blir sotproduktionen ofta högre när bränslet når ett ventilationskontrollerat stadiet, men detta beteende verkar inte stämma överens för vätskebränder där sotproduktionen antingen förblir oförändrad eller minskar (Xiong et al., 2021). Allt som allt förväntas förändringar observeras i detta arbetets laborativa undersökningar när ORS introduceras till vätskebränder.

3.6 ORS effekt på skalning av vätskediameter

Skalningseffekter hos vätskebränder är något som har undersökts grundligt under lång tid och dess påverkan på brandegenskaper är väl etablerad. MLR, HRR, flamhöjd och CO/CO₂-produktion är brandegenskaper som alla påverkas av pöldiameteren. Exempel på hur diameteren påverkar MLR kan ses i figur 2 (Drysdale, 2011).



Figur 2. Visar regressionshastighet baserat på pöldiameter. Olika flödesregioner är angivet över x-axeln. Av Hemel, T. Modifierad från Drysdale D (2011). *Introduction to fire dynamics*. [bild].

I figur 2 visualiseras det att när pöldiameteren ökar eller minskar förbi specifika storlekar, minskar eller ökar även regressionshastighet (eng. *Regression rate*), en term som beskriver massförlust för vätskor i millimeter per minut (mm/min) (Drysdale, 2011). För små kärldiameter (D < 0,08 m) är konduktion den dominerande värmeöverföringen till bränsleytan i kärlet. I övergångsfasen övergår den dominerande värmeöverföringen från att vara konduktionsbaserad till strålningsbaserad, vilket sker vid diameter mellan 0,08-0,2 m. För storlekar över 0,2 m är generellt strålningen den övervägande källan för värmeöverföring till vätska (Li et al., 2020; MacKinven et al., 1970)

Regressionshastighet minskar initialt på grund av att bidraget från värmeledning, som är den dominerande värmeöverföringen för små kärldiameter, minskar med ökande diameter. När diametern ökar gör volymen vätska i kärlet likaså, förutsatt att en konstant vätskehöjd och kärldiameter erhålls. För den konduktiva värmeöverföringen är kärlets väggar den starkast

bidragande faktorn (Blinov & Khudiakov, 1961), och genom observation av hur kärllkantens mantelyta ökar gentemot dess volym vid ökad diameter:

$$\text{Kärl mantelyta} = h \cdot r \cdot 2 \cdot \pi \quad \text{Ekv. 1}$$

$$\text{Volym käril} = h \cdot r^2 \cdot \pi \quad \text{Ekv. 2}$$

kan det observeras att volymen ökar kvadratisk med avseende på r medan mantelytan ökar linjärt. Detta innebär att när diametern ökar en given mängd når volymen vätska större proportioner än kärllkantens mantelyta gör. Följaktligen minskar förhållandet mellan kontaktytan kärllvägg per volymenhet vätska (m^2/m^3) i takt med ökande diameter. Detta resulterar i en minskande regressionshastighet, men endast fram till övergångsfasen, se figur 2.

Varför regressionshastigheten planar ut i övergångsfasen beror på att den konduktiva värmeöverföringen minskar samtidigt som den infallande strålningen mot vätskan ökar och tar över som den dominerande faktorn av värmeöverföring (Chen, 2023). Bidragande faktorer till en ökad strålning mot vätskeytan är att förbränningsarean blir större varpå flammorna blir mer turbulenta och därav strålar mer (Blinov & Khudiakov, 1961), samt att en större vätskeyta bidrar till att en större andel av strålningen träffar vätskan.

Efter övergångsfasen kan en ökning i regressionshastighet observeras, vilket kommer från den ökade värmeöverföringen från strålning. Hur stor effekt strålningen har på värmeöverföringen till vätskeytan och vid vilken vätskediameter övergången sker beror på vilken vätska som brukas, förbränningseffektiviteten, ventileringsgrad och hur sotig flammen är. Flammor med högre sothalt har en högre strålningsfraktion gentemot flammor som ej har hög sotproduktion. Exempelvis har heptan en relativt ofullständig förbränning varav en stor andel restprodukter färdas upp i flammen och bildar sotpartiklar (Boon-ying, u.å). Dessa sotpartiklar avger värme och ett gult sken när de förbränns, vilket är det som gör att heptanflammen strålar med hög intensitet och har en gul färg. Detta gör att när heptan vid ökande storlek får ökad infallande strålning från flammorna får bränslet även högre regressionshastighet (Klassen & Gore, 1994). Metanol som är ett renare ämne har högre förbränningseffektivitet och därav mindre restprodukter i flammen, vilket innebär mindre sot som avger värme och ljus. Detta resulterar i att heptanflammen är blå och inte har lika hög strålningsgrad och synlighet som andra klassiska flammor från kolbaserade bränslen. För bränslen med högre strålningsfraktion är alltså ökningen i regressionshastighet högre när diametern ökar än för andra bränslen (Blinov & Khudiakov, 1961).

3.7 Open Controlled Atmosphere Calorimetry (open CAC)

En metod som används för att mäta effektutveckling kallas controlled atmosphere calorimetry, eller CAC. Denna metod kan ytterligare delas upp på två sätt: öppen (*eng: open*) CAC och stängd (*eng: closed*) CAC, och skillnaden mellan de två är om kopplingen mellan brandutrymme och rökgaskanalen är öppen eller stängd (Werrel et al., 2014). Av dessa två kommer av praktiska skäl open CAC användas i detta arbete. Med den öppna kopplingen mellan brandutrymme och rökgaskanal är det lättare att hålla atmosfärstryck inne i brandutrymme, men ett problem som uppstår är att det inte endast är brandgaserna som sugas upp i rökgaskanalen och analyseras. Även luft från atmosfären kommer sugas in och

påverka de uppmätta värdena. Hur mycket luft som sugts in från rummet jämfört med brandutrymmet beror på fläktens inställning och dimension. Detta måste tas hänsyn till och därför införs en syrereduceringsfaktor (eng: *oxygen depletion factor*) i ekvationen för effektutvecklingen, vilken beskrivs vidare i delavsnitt 3.8.1 nedan.

3.8 Beräkningsmetod HRR_OC och HRR_CDG

3.8.1 Generellt

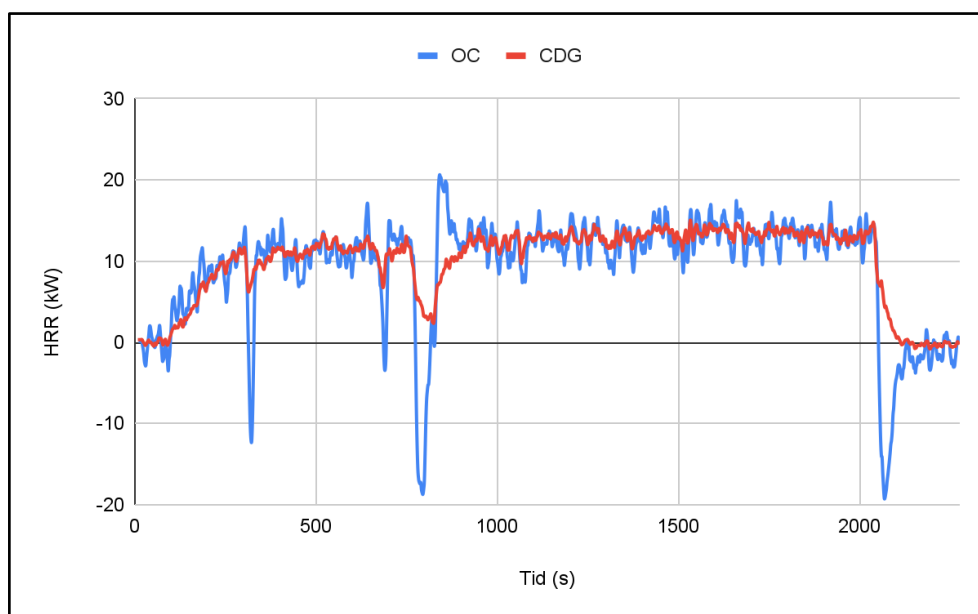
För alla försök utom LOC har två beräkningsmetoder använts för att översätta mätningar från försök till kvantifierbara effektutvecklingar. Den ena metoden, HRR_OC, använder mängden syre som uppmätts i kalorimetern tillsammans med mängden koldioxid och kolmonoxid, där mängderna CO₂ och CO används för att ta hänsyn till ofullständig förbränning (Werrel et al., 2014). Metoden är relativt krånglig då den tar hänsyn till att de uppmätta brandgaserna är utspädda med vanlig rumsluft såsom beskrevs i avsnitt 3.7. Mätningarna för effektutveckling som gjorts med denna metod benämns i graferna i resultatdelen som HRR_OC, där OC står för Oxygen Consumption. Det är även denna metod som inte använts vid beräkning av LOC-försöken då metoden inte längre fungerar om syrehalten i testutrymmet sänks kontinuerligt. Eftersom metoden använder sig av en grundnivå (eng: *baseline*) och beräknar effektutvecklingen baserat på hur mycket de uppmätta värdena skiljer sig från grunden. Konkret innebär det att om grundnivån sätts som vanlig atmosfär på 21 %, vilket är fallet i ett LOC-test, och syrekoncentrationen sedan manuellt sänks till under 15 % kommer den beräknade effektutvecklingen bli otroligt mycket högre än den faktiska.

Den andra metoden benämns HRR_CDG (eng. "*Carbon Dioxide Generation*") och kräver inte lika många parametrar i ekvationen för att beräkna effektutvecklingen. Denna metod använder endast mängderna koldioxid och kolmonoxid som producerats vid förbränningen, i kombination med empiriska värden för hur mycket energi som produceras per kg producerat koldioxid och metanol för både metanol och heptan enligt SFPE (2016).

Den största skillnaden mellan metoderna är det som kallas syrereduceringsfaktor som beskrevs inledande i avsnitt 3.7. Denna behövs i HRR_OC då huvudprincipen för metoden är att beräkna effektutveckling baserat på hur mycket syre som förbränts, men eftersom brandgaserna blandas ut med rumsluft går det inte att direkt räkna på den uppmätta mängden syre. Syrereduceringsfaktorn tar hänsyn till den förbrukade mängden syre med hjälp av att mäta de producerade mängderna koldioxid och kolmonoxid. Varför den inte behövs i HRR_CDG är för att mängderna koldioxid och kolmonoxid är så små i atmosfären jämfört med de mängder som finns i brandgaserna att de inte påverkar mätningarna. Syrekoncentrationen däremot är relativt hög i atmosfären, och framförallt är skillnaden mellan atmosfären och den "förbrända" luften ganska liten. Då skillnaden är det som ska mätas är det då viktigt att ta hänsyn till atmosfärsluften som sugts in i rökgaskanalen.

En markant skillnad i resultaten mellan de två beräkningsmetoderna är att HRR_OC-kurvorna snabbt når negativa värden när branden slocknar och höga toppar när den manuellt återantänds, något som ej förekommer för HRR_CDG-kurvor. Detta fenomen illustreras i figur 3 nedan samt i resultatdelen där ytterligare kurvor kan ses. För de två

beräkningsmetoderna följer kurvorna varandra överlag stadigt och stämmer till stor del överens med varandras framräknade värden. HRR_OC får dock en brusigare kurva medan HRR_CDG visar likvärdigt resultat med stadigare kurva. En ytterligare nackdel med HRR_OC-metoden är att kurvan dippar till negativa värden för effektutveckling när branden slocknar samt skjuter högt upp igen när branden manuellt återantänds. Detta anses vara en dålig beskrivning av verkligheten, och eftersom CDG-metoden ger liknande resultat vid jämn förbränning och i övrigt en stadigare kurva används denna metoden för att beräkna resultaten som presenteras i form av grafer i resultatdelen.

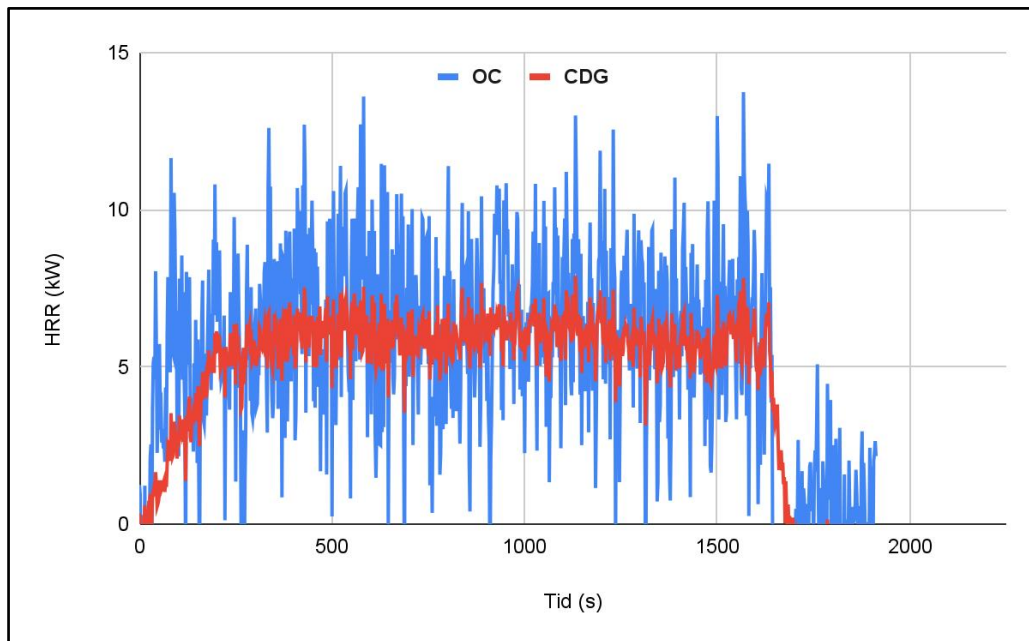


Figur 3. Ett brandtest vars HRR-kurvor beräknats med OC-metoden och CDG-metoden.

I figur 3 ovan syns mätningarna från ett test där branden slocknade och antändes upprepade gånger. Varje gång branden slocknade dök båda kurvorna nedåt, men HRR_OC gick långt ner i negativa värden vilket är en dålig uppskattning av verkligheten då negativ effektutveckling inte kan förekomma. Varför dessa dippar förekom tas vidare upp i diskussionen.

3.8.2 Savitzky-Golay metoden för flytande medelvärde

Då de mätinstrument som används inte är perfekta blir resultaten väldigt brusiga om de inte behandlas i efterhand. En metod att göra detta kallas Savitzky-Golay och beskrivs av Chen et al. (2004). Metoden går ut på att använda en typ av flytande medelvärde men applicerat på ett sådant sätt att viktiga datapunkter inte går förlorade samtidigt som datan plattas ut. I figur 4 nedan visas hur resultaten kan se ut innan de har jämnats ut, och som synes blir resultatet från HRR_OC-metoden väldigt brusiga och relativt svåra att tyda medan resultaten från HRR_CDG-metoden inte kräver fullt lika mycket utjämning för att bli läsbara. Figur 3 ovan visar hur resultaten såg ut efter utjämning, och är också hur resterande grafer presenteras.



Figur 4. Resultat från brandtest innan utjämning har applicerats.

4 Laborativ undersökning

Laborativa försök skulle utformas så att frågeställningen kunde besvaras. För att göra detta utformades en experimentell metodik och strategi för att systematiskt testa vätskebrändernas egenskaper, och genom en rad försök skulle en bild av brandbeteendet kunna målas upp.

4.1 Design av experimentell uppställning

Frågeställningens mål var att ta reda på hur brandegenskaperna HRR, flamhöjd, sotproduktion och antändlighet påverkas när vätskebränder utsätts för hypoxic air samt hur brandegenskaperna påverkas av att brandens diameter skalas upp och ner, även detta i syrereducerad miljö. För att besvara denna frågeställning behövde en metod utformas som tillät de ingående egenskaperna att undersökas var för sig. Det behövde även vara säkert att den önskade parametern var den som också undersöktes och att det gjordes på ett tillförlitligt sätt. För att konstruera en sådan metod konsulterades tidigare litteratur då det finns en avsaknad av standardiserade testmetoder i aktuell volymstorlek för denna typ av brandtester i ORS.

Ett arbete som gjort icke-standardiserade brandtester i en liknande testuppställning som denna är det av Chiti, S. (2010). Här beskriver han att man för brandtester i syrenedsatt miljö bland annat bör inkludera följande saker i uppställningen: en lufttät volym att fylla med syrenedsatt luft; ett system som sänker syrekoncentrationen; minst tre mätpunkter på olika höjd för att mäta syrekoncentration; termoelement på olika höjd för att mäta temperatur; ett dataloggningsprogram som loggar erhållna värden för X_{O_2} , CO/CO₂-produktion, temperatur med mera; en kamera för att dokumentera visuell information; en brandkälla och en antändningskälla styrbar utifrån rummet. Alla dessa riktlinjer följdes och anpassades till detta arbetes testuppställning, vilken beskrivs ingående i 4.3 Experimentell uppställning.

I examensarbetet av Hersner & Nilsson (2021) fanns en liknande frågeställning som i detta arbete. Dock använde de sig av en standardiserad testprocedur som tillkommer när man använder en konkalorimeter, något detta arbete ej gjorde. Hersner & Nilssons testprocedur användes därför som inspirationskälla vid utformandet av detta arbetes testprocedur, då en testmiljö användes som ej var standardiserad och saknade tidigare riktlinjer. Vad Hersner & Nilsson förmedlade var att de gjorde tester vid den X_{O_2} som var av intresse samt referenstester vid 21 % X_{O_2} för att kunna jämföra resultat och se påverkan från ORS. De tillät även endast en variabel att vara föränderlig medan övriga hölls konstanta. Detta motsvarar att för två jämförbara tester var kärstorleken och vätsketypen densamma medan endast syrekoncentrationen fick variera mellan testerna. Utifrån denna information kunde en testmetod utformas vilken redogörs för i nedan delkapitel.

4.2 Ingående parametrar och variabler

De två brännbara vätskor som användes var metanol och heptan. För att kunna upptäcka vilken påverkan hypoxic air har på vätskebränder bestämdes det att en rad variabler skulle införas som kunde ökas eller minskas i värde. Målsättningen med detta att hålla samtliga variabler konstanta förutom den undersökta som förändrades, enligt Hersner & Nilsson

(2021) riktlinjer för den experimentella uppställningen. De variabler som förändrades och undersöktes var vätskans massa, kärlets diameter och syrekoncentrationen i luften.

Att två olika vätskor beslutades att användas var för att se om resultaten som skulle erhållas var unisona för vätskor med olika sotighet och förbränningsegenskaper, eller om ämnesspecifika effekter skulle observeras. I Hersner & Nilssons examensarbete (2021) kunde en stor variation mellan vätskor ses, varav ett bredare urval av vätskor med större variation på egenskaper hade varit motiverat och gynnsamt i denna fråga för att komplettera tidigare studier. På grund av begränsningar i tid fick dock urvalet hållas till två vätskor. Detta beslut gav emellertid utrymme till att lägga större fokus på att utforska fler varierande egenskaper, i stället för att exempelvis endast kunna undersöka ventilationseffekterna och ej skalningseffekterna.

Vätskans massa var en enhet som valdes att varieras, men inte för att vara en egenskap som jämförs mellan vätskorna. Den varierades mellan kärldiametrar och vätsketyper med målet att erhålla en brand som varar i 15 minuter. Detta ansågs vara en tillräckligt lång tid för att ett tydligt brandförlopp med tillväxtfas, jämn förbränning och avtagsfas skulle uppstå, men också inte för lång så att mängden tester skulle behöva begränsas i mån av tillgänglig tid i laborationssalen. Även om målsättningen var att ha en brand där bränslet tog slut efter 15 minuter, brann majoriteten av testerna både under längre och kortare tid, vilket är ett fenomen som diskuteras i resultatdelen under avsnitt 6.2.1 längre ner. För varje kärldiameter hölls den använda vätskans massa konstant utmed alla tester i såväl vanlig luft som syrereducerad. För LOC-testerna varierades dock massan för att erhålla en längre brinntid. Detta för att manuellt hinna kväva branden och utforska LOC innan all vätska brunnit ut. Massan togs fram genom beräkningar tagna från Karlsson & Quintiere (1999). Massvariation för de olika vätskorna och kärldiametrarna redovisas i tabell 2 nedan.

Tabell 2. Visar mängden brännbar vätska som användes vid olika diametrar av kärldiametrar.

Vätska \ Kärldiameter	0,15 m	0,20 m
Heptan	244 g	564 g
Metanol	270 g	480 g

Dessa mängder vätska hölls i största mån konstanta genom testerna, där variationen tilläts ligga på ± 3 g för varje enskilt test. Detta berodde på att överföring av vätska gjordes i frånvaro av speciellt ämnad utrustning, och transport skedde genom att hälla från vätskedunk till litermått till 0,300 l bägare till kärldiametrar. Denna procedur grundade sig i säkerhetsrutiner som var närvarande vid bruk av brandlabbet och för att reducera spill. Med bättre förutsättningar för vätsketransport kunde noggrannheten ha ökats, men bedömningen gjordes att den använda variationen var godtyckligt nära och gav inga märkbara skillnader på förbränningsprocessen. Som mest var skillnaden 1,2 % från målsatt vikt, och som minst 0,5 %, vilket ansågs vara bra.

Kärlets diameter förändrades för att se hur skalningseffekterna för de två brandfarliga vätskorna är. I vanlig atmosfär är detta ett relativt väl dokumenterat ämne, men i syrenedsatt miljö har skalningseffekterna bristande rapportering. De använda kärldiametrarna var 0,15 m och 0,20 m. Varför större kärldiameter inte användes var för att den aktuella testuppställningen med

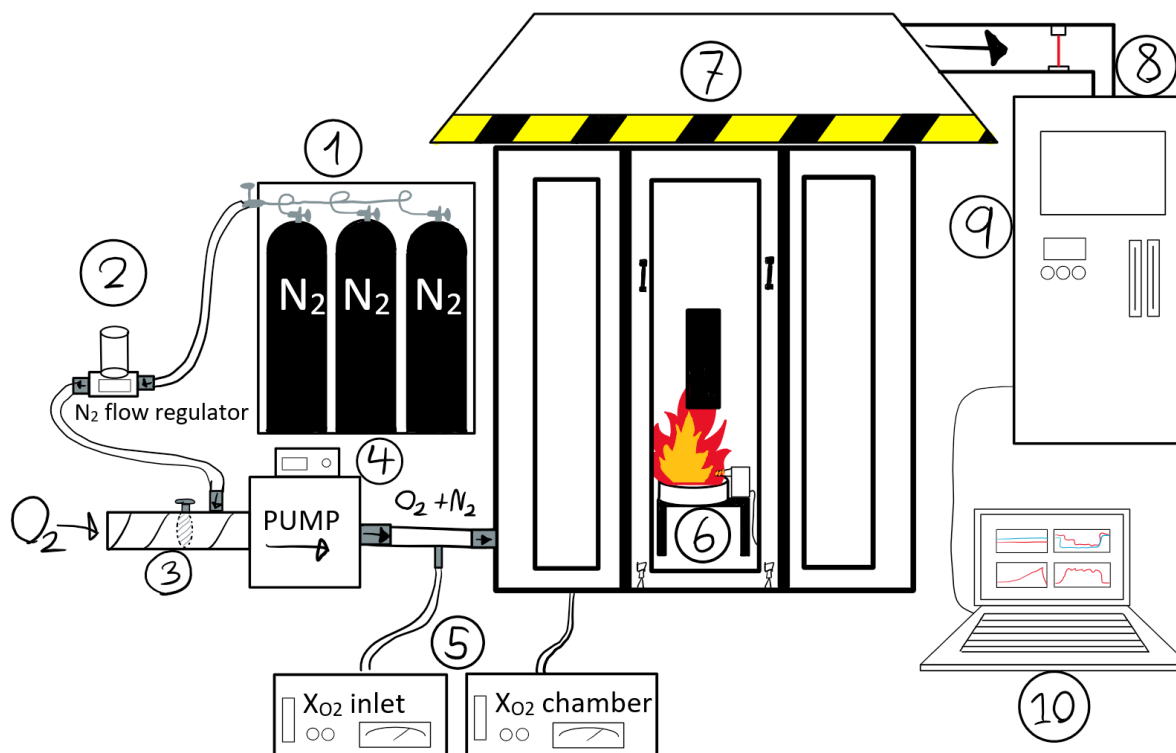
kammare och huv endast tillät en maximal effektutveckling på 300 kW, men framförallt var anledningen att flammorna ej fick bli så höga att de slog upp utanför testkammaren. Efter beräkningar för pölbränders flamhöjd och effektutveckling tagna från Karlsson & Quintiere (1999) drogs slutsatsen att 0,20 m är den största kärldiameter som kan användas för den aktuella testuppställningen. Då kunde risken reduceras för att mätutrustning tar skada eller att flammorna nådde utanför testkammaren vilket hade riskerat att invalidera resultaten.

Syrekoncentrationen i luften som tillfördes testutrymmet var den sista parametern som varierades. De två mätnivåer som bestämdes var 21 % och 15 %. Den förstnämnda nivån är normal syrekoncentration i atmosfärsluft vid havsnivå, vilken mer exakt ligger på 20,95 volymprocent syre. Den andra nivån på 15 % är den lägsta syrekoncentration som i dagsläget används i ORS när det finns människor närvarande i miljön, då lägre nivåer medför stora hälsorisker för människor enligt tabell 1 och van Hees et al. (2018). Eftersom 15 % är den lägsta nivå som är praktiskt applicerbar och lägre nivåer ej i nuläget förekommer, ansågs det inte givande att undersöka lägre nivåer. Frågeställningen är formulerad för att undersöka hur dagens nivåer och standarder av ORS fungerar i att skydda mot vätskebränder. För att ta reda på detta är det därför rimligt att jämföra med ett så stort kontrast som möjligt, exempelvis när ORS är närvarande och inte. Därmed beslutades det att lägstanivån på 15 % var en rimlig mätpunkt att inkludera.

Varför endast två syrenivåer undersöktes i stället för exempelvis tre eller fyra grundade sig i den begränsade tillgången på tid och resurser. Det var viktigt att utnyttja den tillgängliga tiden i labbet effektivt, och för att göra detta behövde resultat erhållas som kunde ge så mycket information som möjligt med så få försök som möjligt. Det gjordes en avvägning om en ytterligare mätpunkt på 17 % syrekoncentration skulle bidra med mycket mer information än en mätpunkt på 15 % redan gjorde. Om det fanns speciell anledning att tro att 17 % medförde stora förändringar eller fluktuationer i brandbeteendet hade det varit en rimlig mätpunkt att inkludera. Dock har det i examensarbetet av Hersner & Nilsson (2021) observerats att en ytterligare mätpunkt på 17 % inte skiljer sig mycket från de resultat som erhöles vid 15 %, och i många av testerna kan antingen ett linjärt samband ses mellan 21 %, 17 % och 15 % eller så är skillnaden försumbar. Med denna information togs beslutet att tiden som det skulle ta att utföra tester på 17 % syrekoncentration var bättre använd för att göra skalningsförsök och mäta LOC, varpå en tredje mätpunkt på 17 % ej inkluderades.

4.3 Experimentell uppställning

Brandförsöken gjordes med de brandfarliga vätskorna heptan och metanol som placerades i cirkulära kärl med en diameter på 0,15 m och 0,20 m samt en kanthöjd på 0,08 m. Det kärl som användes var placerat på en 0,5 m upphöjning i centrum av en kammare vars volym var $1,80^3 \text{ m}^3$. På golvet var ett stort kvadratisk uppsamlingskärl placerat med en area på $1,60^2 \text{ m}^2$ och en kanthöjd på 0,15 m, vars botten var täckt med aluminiumfolie. Kammaren var konstruerad av gipsskivor och träbalkar, vilka tätats i alla fogar med högtemperatursilikon som klarar upp till 300°C . Detta gjordes på ett sätt för att hålla rummet så lufttätt som möjligt och förhindra läckage av luft både in och ut. I kammarens väggar var observationsfönster inbyggda samt en av- och påtagbar dörr som tillät åtkomst till innanmätet, se figur 5 nedan. Samma tidigare nämnd tätning utfördes runt dessa fönster och dörren som var helt avtagbar sattes fast med fönsterlister och dörrspringorna tejpades över med silvertejp inför varje test.



Figur 6. Simplifierad illustration av testuppställningen med dess olika ingående komponenter numrerade 1 till 10. Hemel (2023)

Figur 6 ovan visar hur komponenterna i stora drag hängde ihop under försöksprocessen. De huvudsakliga delarna av uppställningen har namngetts med siffror från 1 till 10 för att enklare kunna förklaras, och i text benämns komponenterna "(siffra)" vilket hänvisar till komponentdelen i figur 6 som har motsvarande siffra. Kväve (1) användes i experimenten som inert gas för att sänka syrekoncentrationen i rummet, där gasen transporterades via slangar vars tryck uppgick till 8 bar. Kvävet första inkopplingspunkt var till två flödesregulatorer (2) som kunde styra flödet av kväve från behållarna vidare in till kammaren samt minska trycket från 8 bar till atmosfärstryck. Vid bruk låg kväveflödet på värden mellan 400 och 1000 liter/minut, vilket varierade beroende på vilken syrekoncentration som önskades uppnås i kammaren. Kvävet anslöts till ett rör med en diameter på 0,10 m och som hade en ventil (3) som kunde öppnas och stängas för att släppa in mer eller mindre atmosfärluft i tilluften. Kvävet var påkopplat till röret efter ventilen i flödesriktningen, så att det flöde luft som ventilen hindrade att komma in kunde ersättas med kväve. Luften sögs in genom röret via en pump (4) som reglerade luftflödet in i kammaren. Efter pumpens punkt i schemat var kväve och atmosfärluft blandat. Efter pumpen satt två syrgasanalysatorer (5) som mätte syrets volymprocent i luften. En av analysatorerna mätte luftens syrehalt innan den gått in i kammaren (X_{O_2} inlet) och en mätte syrehalten inuti kammaren när den syrereducerade luften kommit in och spridit ut sig (X_{O_2} chamber). Den senare mätningen hämtade in luften för analys från kammaren genom tre olika mätpunkter enligt Chiti, S. (2010) på höjderna 0,30 m, 0,80 m och 1,30 m, varifrån den sedan tog ett genomsnitt. Båda syrgasanalysatorerna skickade mätdata till en data- och gasanalysator (9). Inne i kammaren (6) satt 8 termoelement utmed den bakre väggen som mätte temperaturen i luften. De var placerade med 0,2 m mellanrum från 0,3 m över marken upp till 1,50 m över marken, och ett sista termoelement var beläget 1,66 m över marken. Det fanns även ett termoelement placerat på undersidan av kärlet. Kärlet i fråga hade en botten som var

kupad inåt, varpå det inte fanns något material i direkt kontakt på undersidan för att leda bort värme. Temperaturmätningar gjordes även i inflödesluften samt i skorstenen, vilket uppgår till totalt 10 punkter som mätte lufttemperaturen. Samtliga data skickades till data- och gasanalysatorn. Inne i kammaren stod även en gnisttändare (6) intill vätskekärlet som tillät manuell antändning utifrån rummet. När förbränning väl var i gång, oavsett om det var i atmosfärsluft eller syrereducerad luft, färdades brandgaserna upp i kalorimetern (7) för vidare transport via ett större luftrör (8). I röret fanns en mängd av mätinstrument, däribland två lasrar. Dessa mätte sotigheten i brandgaserna vilket uttrycks i rapporten som procentuell nedsättning av laserintensitet. När brandprodukterna färdats genom kalorimetern och hade analyserats skickades data i form av elektriska signaler till data- och gasanalysatorn (9). Här lästes de elektriska signalernas intensitet in i tillhörande fördefinierade intervall som tolkar datans elektriska intensitet i volt och översätter det till läsbara data. Denna data fördes slutligen över till datorn (10) där det tog form som grafer via ett program som loggade all data under brandförloppet.

4.4 Experimentellt genomförande

När de ingående variablerna bestämts och testuppställningen var i ordning skulle försöken utföras. Initialt var målsättningen att utföra två försök per undersökt parameter, och i mån av tid även ett tredje. Detta skulle göra att resultaten för samma testade parametrar kunde sammanfogas för att få mer träffsäkra och sannolika slutvärden som bättre beskriver det brandförlopp som uppstår med de angivna parameterar. Det skulle även förhindra att mätfel och osannolika avvikelser dikterar alltför stor del av resultaten som då blir missvisande från verkligheten. Tester gjordes under 7 dagar med som högst 4 tester genomförda på en dag. Gasanalysatorn kalibrerades i början av varje dag och de två syrgasmätarna kalibrerades mellan försöken.

Kalibrerande försök behövde först utföras, vilket var tre försök som namngavs försök A-C vars mätdata ej utgör en roll i sammanställningen av resultat. Faktorer som undersöktes var i försök A om en brand kunde underhållas i kammaren med stängd tilluftskanal (se komponent 3 i figur 6 ovan som visar schematisk skiss) och utan kväveflöde. Här observerades det att syrekoncentrationen sjönk i kammaren vilket förmodligen berodde på att allt syre i rummet förbrukades i branden utan tillräckligt inflöde av nytt syre, och som följd orsakades en underventilerad atmosfär och brand. Detta gav upphov till försök B som först skulle se om en jämn syrenivå går att hålla i kammaren vid brand med öppen tilluftskanal, vilket gick. I samma försök undersöktes även vilka lägsta nivåer av X_{O_2} som kunde erhållas i kammaren vid ett kväveflöde på 1000 L/min, vilket var en X_{O_2} på 12,9 % med stängd luftkanal och X_{O_2} på 16,5 % vid öppen. För att nå den önskade syrenivån på 15 % behövde alltså tilluftskanalen vara någorlunda stängd, vilket undersöktes i försök C där ventilen började öppen och långsamt stängdes tills mätningarna gav utslag för en plötsligt sjunkande syrenivå. Den minsta öppning som kunde erhållas utan att X_{O_2} i rummet sjönk var 13 % eller ca 12° öppen, där 100 % eller 90° öppen gav fullständigt genomflöde och 0 % eller 0° innebar att ventilen var stängd. Varför ventilen eftersträvades till att vara så stängd som möjligt och inte bara så stängd så att precis 15 % X_{O_2} kunde uppnås motiverades med att ju mindre syre från atmosfärsluft som blandas in i tilluften till kammaren, desto mindre kväve behövde förbrukas för att sänka syrekoncentrationen vilket ur en ekonomisk faktor var gynnsamt.

För alla tester med heptan och första två testerna med metanol gjordes repeterande försök, men herefter gjordes en utvärdering av åtgången tid, materiel och kvarstående resurser varpå beslutet togs att endast utföra singulära försök för resterna tester. Detta för att säkerställa att alla undersökningsområden som var av intresse skulle hinnas med. Härmed utfördes först en serie med fyra unika tester för heptan som duplicerades, namngivna försök 1AB-4AB, sedan två unika tester för metanol som duplicerades, namngivna försök 5AB och 6AB, och slutligen två ytterligare metanoltester som förblev singulära namngivna försök 7 och 8. För båda vätskorna gjordes försöken i cirkulära kärl med 0,20 m och 0,15 m i diameter. När metanoltesterna skulle utföras introducerades stenullsisolering runt kärlet för att se om detta gav en förbättrad värmeledningseffekt till vätskan och högre effektutveckling. Undersökningsmetoden för isoleringen var dock av flera anledningar ej utförd korrekt vilket författarna är medvetna om. Därför förblir isoleringen en mindre detalj som ej tas upp vidare utöver i diskussionen under avsnitt 6.2.2. När metanoltesterna påbörjades fästes en termoelement till kärlets underkant för att mäta den konduktiva värmen. Då detta ej gjordes för heptantesterna går inga jämförelser att göra mellan de två vätskornas ledningsförmågor. Det kunde ha varit givande data baserat på de skiljande mängderna av sotighet och strålning från flammen vilket säkert kunde presenterat intressanta resultat. Detta undersöktes dock ej och lämnas i stället för framtida forskning att undersöka vidare. Något som temperaturmätningarna dock kan visa är hur ledningseffekterna påverkas av kärlestorlek och syrenivå, något som faller i linje med arbetets frågeställning. Syrenivåerna hölls konstanta på antingen 21 % eller 15 % X_{O_2} under hela genomförandet av testerna, vilket var från att vätskan antändes till att den slocknade. Släckning kunde ske antingen för att bränslet tog slut, eller för att så låga syrenivåer hade uppnåtts att branden inte kunde underhålla en flamma längre. Vid händelsen att flammen misstänkts slockna i förtid gjordes försök till återantändning med gnisttändaren flertalet gånger. I flera fall kunde detta återantända en flamma, men när flammen upprepade gånger slocknade ansågs X_{O_2} ha fallit under vätskans LOC, varpå testet avslutades. Då stängdes kvävetillförseln av och vätskan återantändes igen så den fick brinna ut.

LOC var den sista brandegenskapen som undersöktes. Tre tester, namngivna försök 9, 10 och 11, genomfördes med heptan i 0,20 m, 0,15 m och 0,10 m diameter kärl. Metodiken var att kärlet ställdes in i kammaren och antändes, varpå syrekoncentrationen sänktes från 21 % till 16 %. Herefter sänktes X_{O_2} inkrementellt med 0,2 procentenheter åt gången, där vid varje sänkning en stadig syrenivå i kammaren inväntades innan X_{O_2} sänktes ytterligare. Detta upprepades tills vätskebranden slocknade. Vid släckning användes gnisttändaren i kontinuerliga omgångar, och de gånger en flamma fortfarande gick att tända sänktes X_{O_2} ytterligare. När gnistan inte längre kunde återantända vätskan som fanns kvar i kärlet fastslogs den aktuella X_{O_2} vara LOC för den kärlestorleken av heptan. Det första LOC-försöket gjordes med stenullsisolering runt ett 0,20 m kärl, men då isoleringen tog eld och bidrog till att effektutvecklingen blev onormalt hög (se försök 13, figur 17) avbröts mätningarna och försöket annullerades, varpå efterföljande tre försök gjordes utan isolering. Det annullerade försöket, försök 13, blev en del av kalibreringstesterna och är inte ett resultat som räknas med i rapportens sammanställning av information. Två ytterligare tester som ej antände på grund av att gnisttändaren var placerad för långt från vätskan fick mätresultaten annullerades och benämns försök D och E.

5 Resultat

5.1 Översikt

I resultatdelen presenteras resultaten från experimenten i form av grafer och tabeller. Först presenteras hur utjämning av kurvorna har gått till med hjälp av Savitzky-Golay-metoden. Efter detta visas hur mätmetoderna CDG och OC förhåller sig till varandra, då de ger något avvikande resultat beroende på i vilka försök de använts. Därefter presenteras resultaten för hur effektutveckling påverkats av olika X_{O_2} för heptan och metanol. Därpå presenteras HRR-kurvor från heptantester med fokus på isoleringens effekter. Efter detta följer flammhöjd och okulära observationer, temperaturmätningar i kammarluften och kärl, CO/CO₂-produktion, sotproduktion och siktbarhet, och slutligen LOC-mätningar.

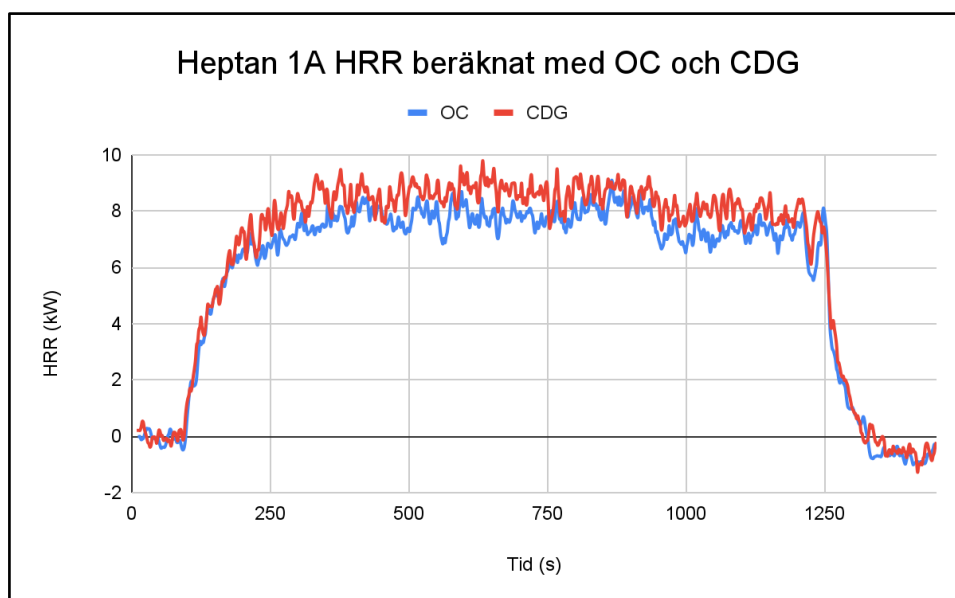
Inför resultatdelen presenteras en tabell som visar hur försöken namngivits. Färgkodning har endast använts för att separera de olika försöken och färgen har inget värde utöver detta. Försök som haft samma vätska, storlek, och syrekoncentration och därmed likadana försöksförhållanden kallas dubletter och benämns med A eller B efter försökets nummer. I de fall där dubletterna visar nära på identiska resultat visas endast ett av försöken i grafen. Försök som inte gjordes med en dublett har endast en siffra som namn.

Tabell 3. Namngivning av försök.

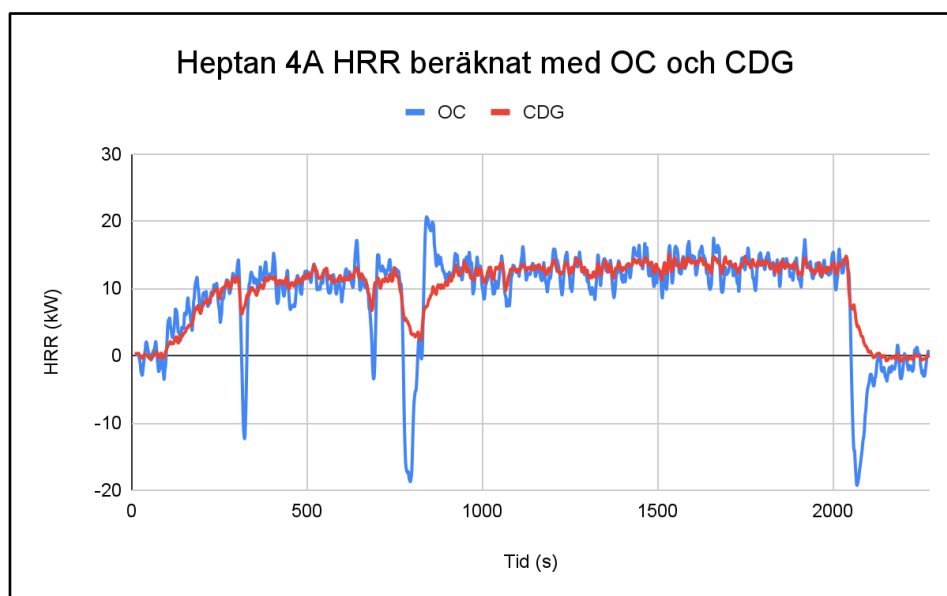
Försöksparameterar	Namn
Heptan 21 % 0,15 m	1A
	1B
Heptan 15 % 0,15 m	2A
	2B
Heptan 21 % 0,20 m	3A
	3B
Heptan 15 % 0,20 m	4A
	4B
Metanol 21 % 0,15 m	5A
	5B
Metanol 15 % 0,15 m	6
Metanol 21 % 0,20 m	7A
	7B
Metanol 15 % 0,20 m	8
Heptan LOC 0,10 m	9
Heptan LOC 0,15 m	10
Heptan LOC 0,20 m	11
Heptan Isolering 0,15 m	12
Heptan Isolering 0,20 m	13

5.2 Exempelkurvor för HRR_OC och HRR_CDG

Här presenteras testkurvor för att vidare jämföra mätmetoderna för effektutveckling, vilka namngivits HRR_OC och HRR_CDG. Som nämnts tidigare finns det en någorlunda genomgående skillnad mellan mätmetoderna. Följande kurvor är framtagna för att illustrera dessa skillnader. Som kan ses i figur 7 nedan och i flertalet försök i bilaga A resulterar CDG-beräkningarna i ett aningen högre värde än OC-beräkningarna. Detta förekommer för flera försök men är inte genomgående för alla. I figur 8 däremot illustreras de höga topparna och låga dipparna som OC-beräkningarna gav när branden slocknade och återantändes. Dessa toppar och dalar förekom för samtliga försök där flammen ej hade en kontinuerlig förbränning från början till slut. Dessa extrema vändningar förekom däremot inte för CDG-beräkningarna.



Figur 7. Test vars värden beräknats med HRR_OC och HRR_CDG.



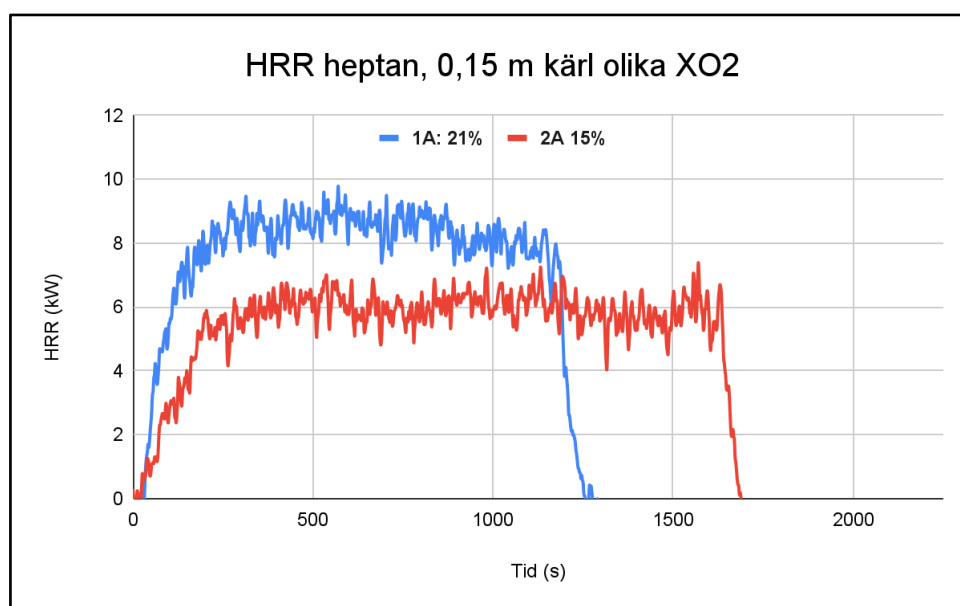
Figur 8. Test vars värden beräknats med HRR_OC och HRR_CDG.

5.3 HRR

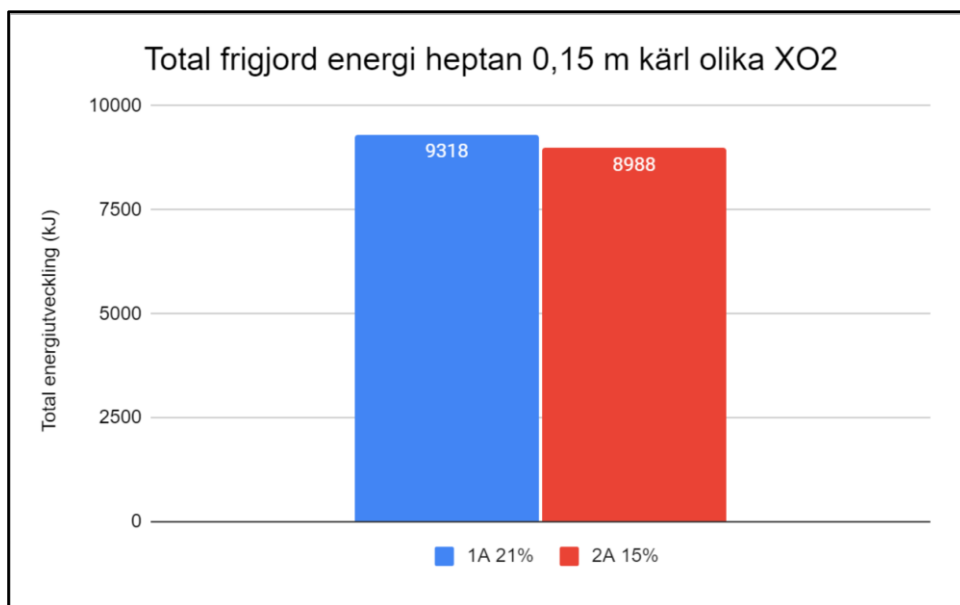
I detta delkapitel presenteras resultatkurvorna för effektutvecklingen erhållen från testerna. Först presenteras grafer för heptantesterna, sedan metanoltesterna, därefter en tabell med sammanställda värden för peak HRR, och slutligen grafer som visar isoleringens effekter. För alla tester som gjorts presenteras HRR-kurvor beräknade med CDG-metoden.

5.3.1 Heptan

Följande figurer som presenteras tillhör testerna gjorda med heptan i varierande X_{O_2} . I figur 9 kan det observeras hur nedsatt X_{O_2} påverkar effektutvecklingen. För heptan i ett kärl med 0,15 m i diameter blev HRR-toppen högre och brinntiden kortare vid 21 % än vid 15 % X_{O_2} . Trots skillnad i brinntid och effektutveckling ses i figuren att ytan under respektive kurva är ungefär lika stor. Detta belyses även i figur 10 där den totala frigjorda energin presenteras för samma tester. Här syns det att den totala energin i princip är lika stor, med en skillnad på ungefär 4 %. För 0,20 meter kärlet var skillnaden också försumbart liten, vilket kan ses i figur 12 för försöken 3B och 4B där skillnaden i förbränningsenergi är 4,6 %.

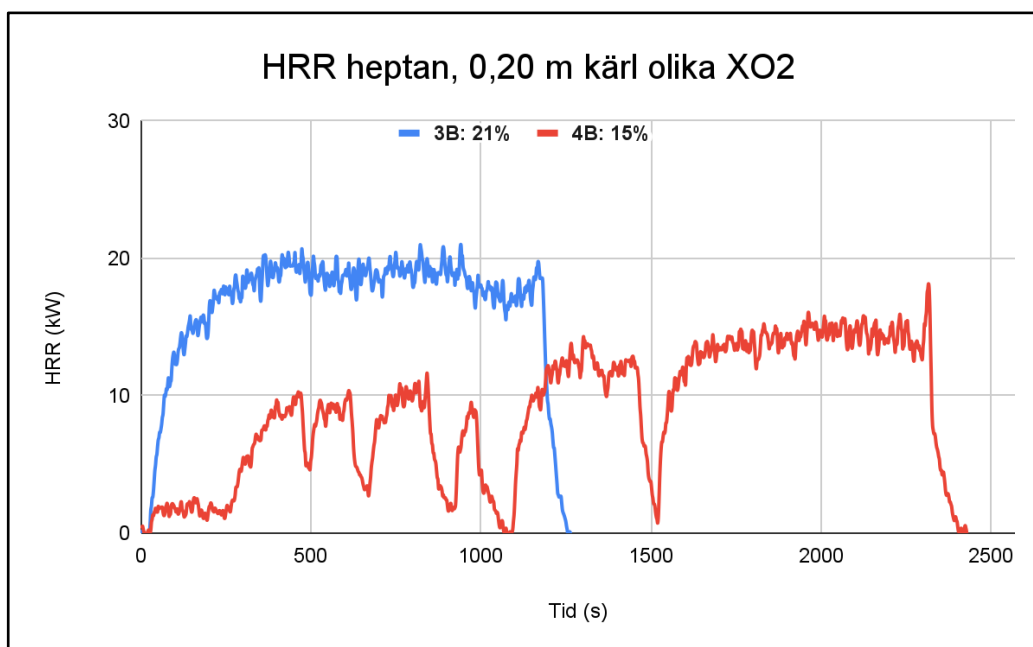


Figur 9. Effektutveckling för heptan i 0,15 m kärl med varierande syrehalt i kammaren.



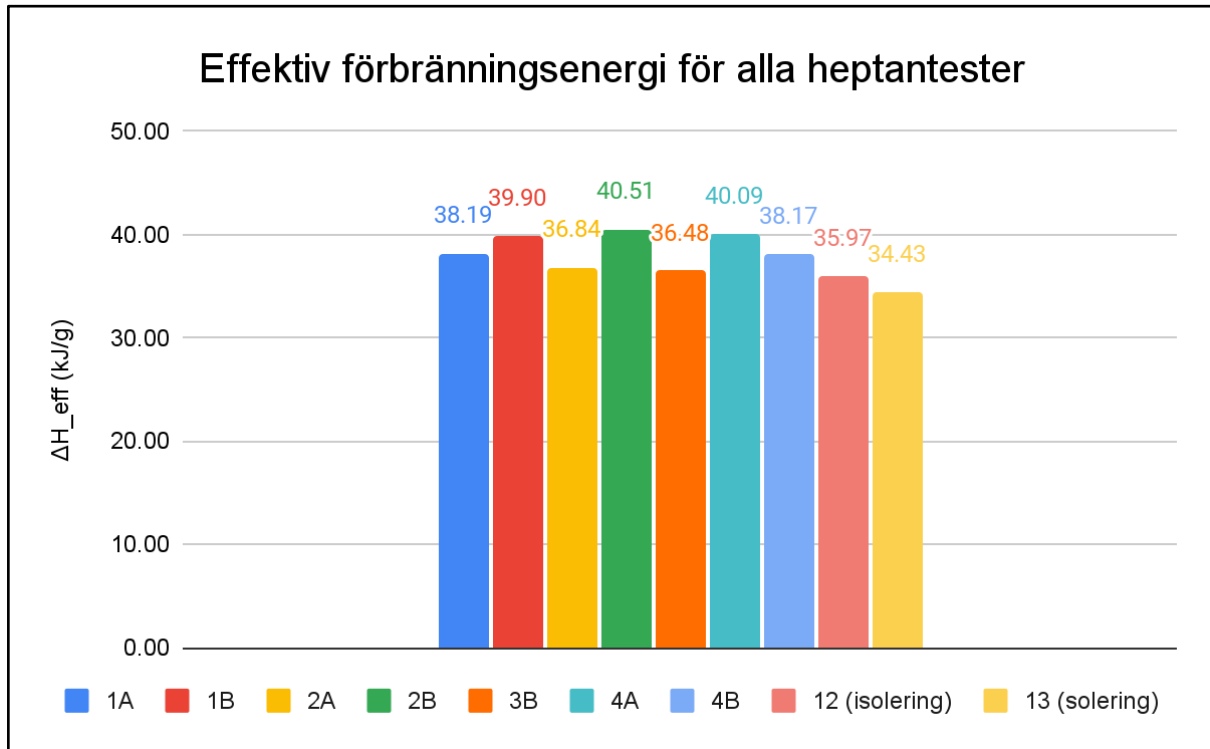
Figur 10. Total frigjord energi från försöken 1A och 2A.

I figur 11 nedan visas försöken för testerna 3B och 4B vid 0,20 m kärldiameter. Dalarna som kan ses för försök 4 uppstod varje gång branden slocknade och sedan återantändes med gnistständaren. Att branden släcktes och återantändes flera gånger resulterade i ett längre brandförlopp och en lägre peak HRR.



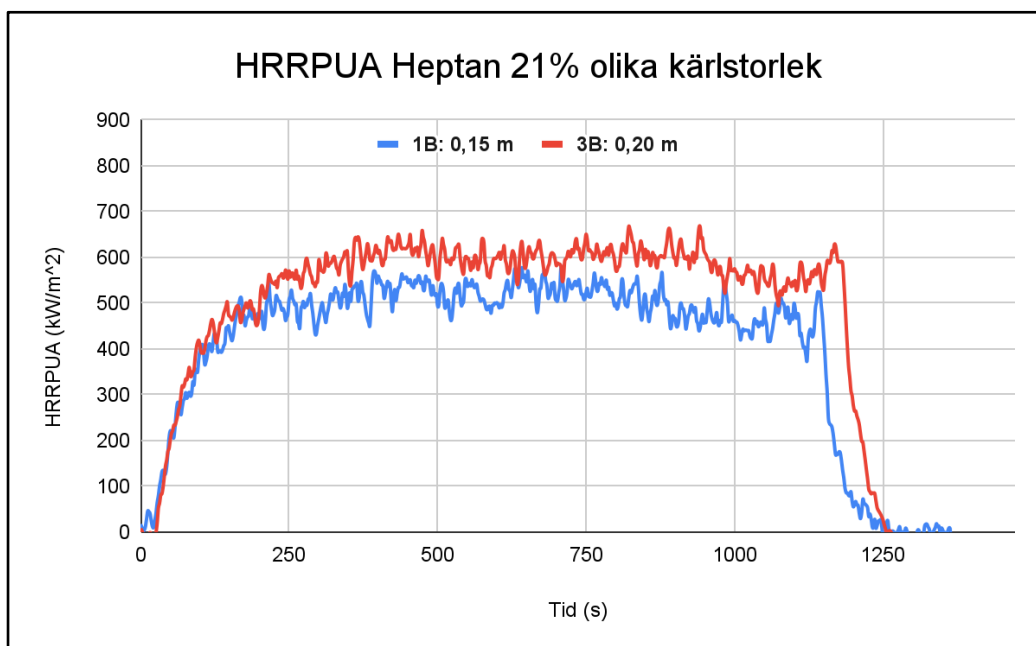
Figur 11. Effektutveckling för heptan i 0,20 m kärldiameter med varierande syrehalt i kammaren.

I följande figur 12 syns förbränningseffektiviteten för samtliga heptanbränder uttryckt i kJ/g. Vad figuren visar är att, medan det finns en viss variation mellan försöken, håller sig förbränningseffektiviteten på ungefär samma nivå oavsett syrekoncentration eller kärldiameter. Däremot visar försök 12 och 13 med isolering lägst energi per gram heptan. Detta indikerar att isoleringen ej bidragit med någon brännbar volym till förbränningsprocessen utan i stället gjort förbränningen mindre effektiv.



Figur 12. Anger effektiv förbränningsenergi för heptantesterna.

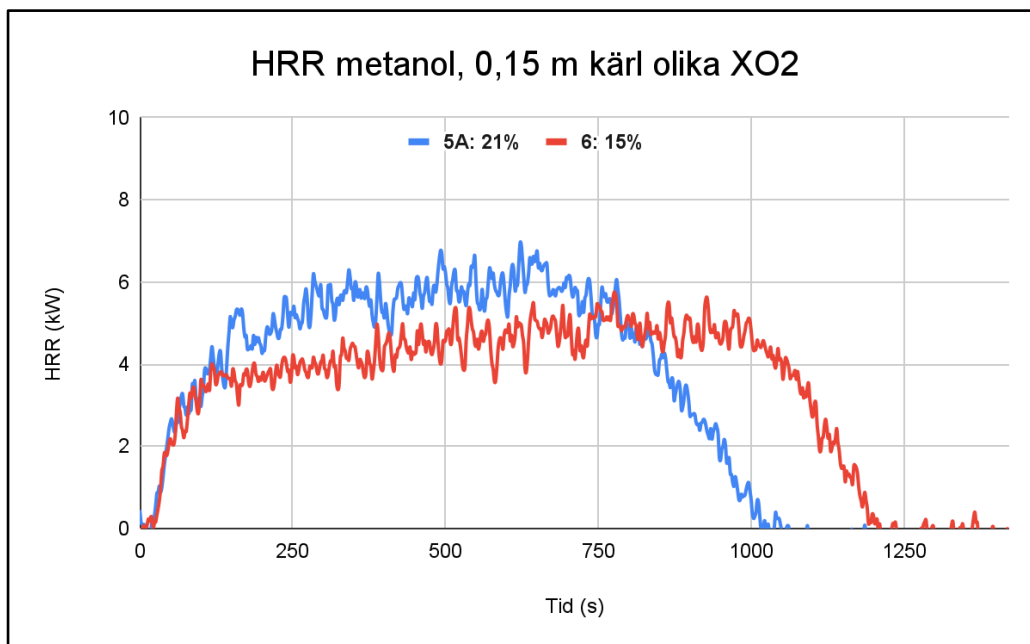
I efterföljande figur 13 presenteras kurvor för HRRPUA där syrekoncentrationen är konstant och det är storleken som varieras. Vad som kan observeras är att heptan får en något lägre HRRPUA när storleken på kärlet minskas i 21 % X_{O_2} . Samma resultat erhöles för 15 % X_{O_2} .



Figur 13. Effektutveckling per ytenhet för heptan i 21 % syrehalt med varierande storlek på kärlet.

5.3.2 Metanol

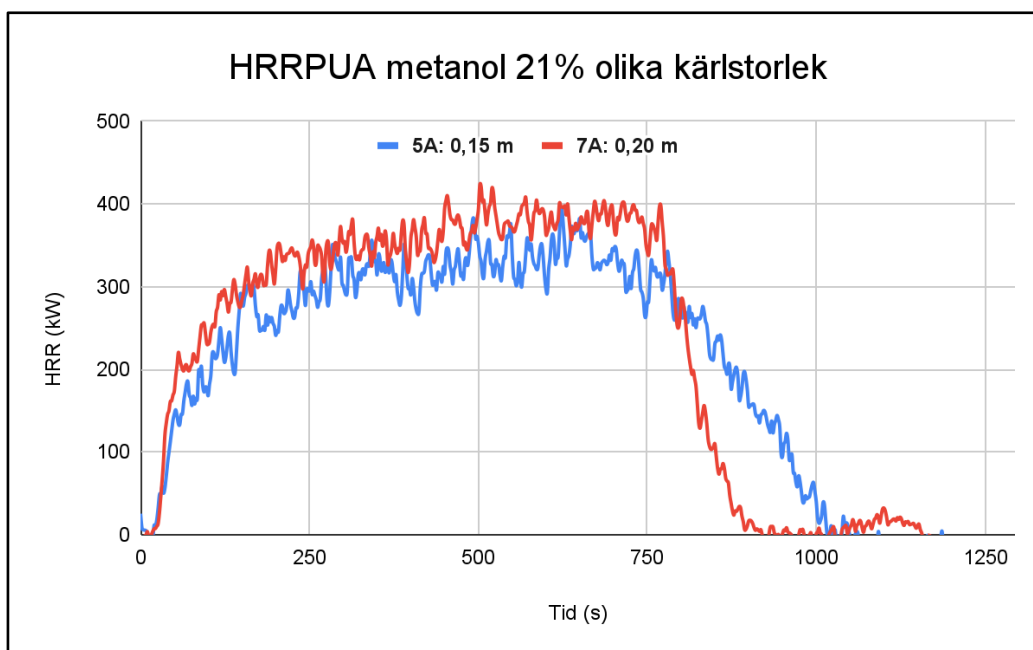
Följande kurva som presenteras i figur 14 tillhör testerna gjorda med metanol i 0,15 m kärl och varierande X_{O_2} . Här syns det att med en minskad X_{O_2} blev peak HRR lägre, vilket också gällde för 0,20 m kärlet.



Figur 14. Effektutveckling för metanol i 0,15 m kärl med varierande syrehalt i kammaren.

I figur 15 presenteras kurvor för HRRPUA där syrekoncentrationen är konstant och det är storleken som varierar. Här syns det att det större kärlet hade en aningen högre HRRPUA, men att variationen inte är stor mellan olika kärlestorlekarna. Samma minskning i HRRPUA observerades för metanolen i 15 % X_{O_2} .

f



Figur 15. Effektutveckling per ytenhet för metanol i 21 % syrehalt med varierande storlek på kärlet.

Likt heptantesterna gav försöken med metanol resultat för förbränningseffektiviteten som höll sig inom 5 % mellan högsta och lägsta värdet. Exakta värden kan ses i figur 65 i bilaga A.

5.3.3 Peak HRRPUA

Tabell 4 nedan summerar hur de två vätskornas effektutveckling minskade när antingen kärldiameter eller X_{O_2} reducerades. I horisontell riktning i tabellen avläses minskning i peak HRRPUA för när X_{O_2} minskades från 21 % till 15 % och i vertikal riktning visas resultatet för när kärldiameteren minskades från 0,20 m till 0,15 m. Pilar och cellfärg används för att visa riktning som datan ska avläsas i. Färggradering har använts för att visa för vilka parametrar som peak HRRPUA minskade med mest (grön färg) och minst (röd färg). Tabellen visar att en sänkt X_{O_2} hade större påverkan på peak HRRPUA än en sänkt kärldiameter hade för båda vätskorna. Heptan var vätskan som såg störst procentuella minskning på peak HRRPUA.

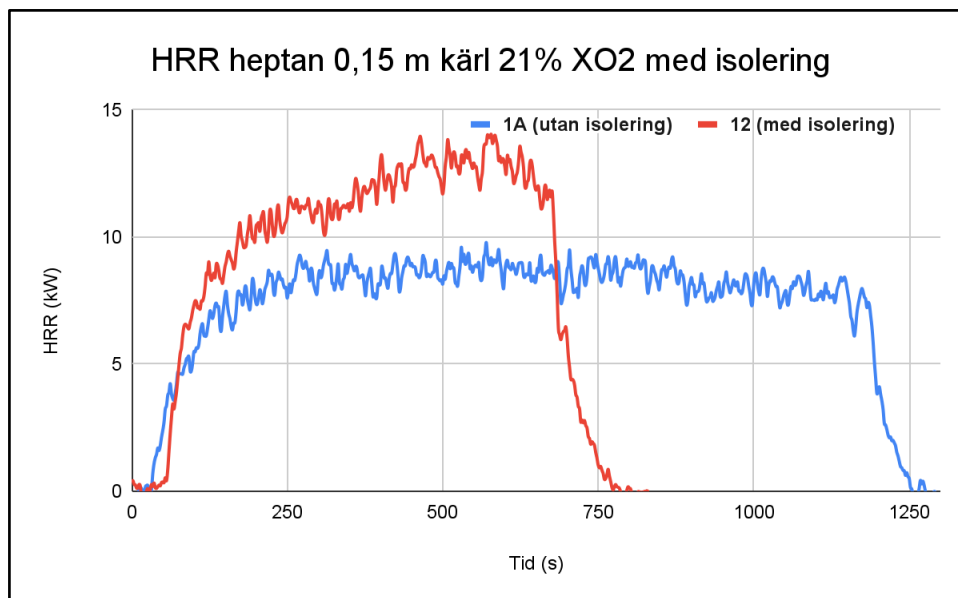
Tabell 4. Visar hur peak HRRPUA minskat för heptan- och metanolbränder när de utatts för minskad kärldiameter och syrekoncentration.

Peak HRRPUA (kW/m ²)		Minskande $X_{O_2} \rightarrow$		Procentuell minskning
		21 % X_{O_2}	15 % X_{O_2}	
Minskande kärldiameter ↓	Heptan 0,20 m	600 kW/m ²	400 kW/m ²	33 %
	Heptan 0,15 m	500 kW/m ²	350 kW/m ²	30 %
Procentuell minskning HRRPUA		17 %	13 %	
Minskande kärldiameter ↓	Metanol 0,20 m	380 kW/m ²	290 kW/m ²	24 %
	Metanol 0,15 m	340 kW/m ²	280 kW/m ²	18 %
Procentuell minskning HRRPUA		11 %	3 %	

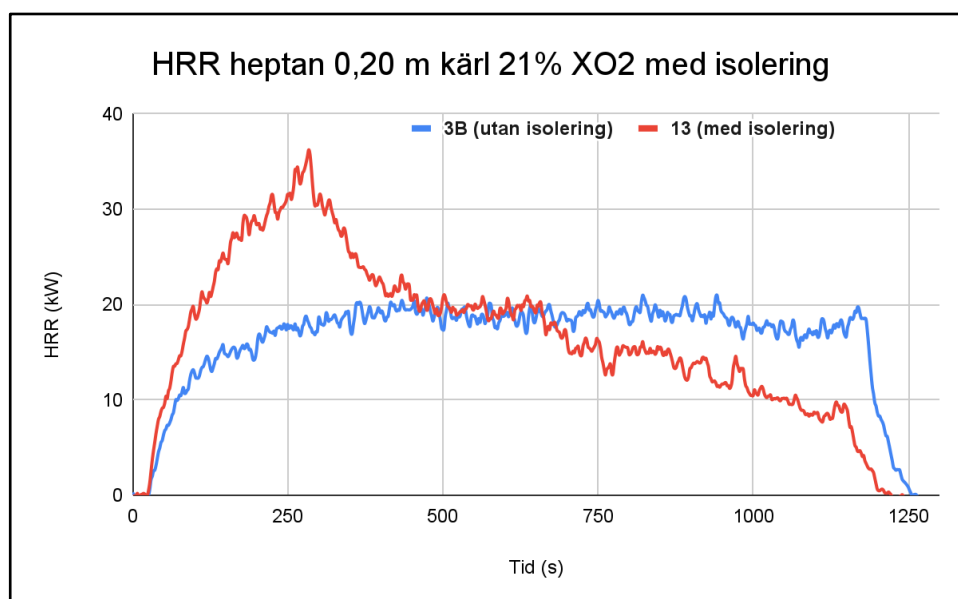
5.3.4 Isolering

I denna del visas effekterna av att stenullsisolering adderades runt kärlet. Heptan var den enda vätskan som testades både med och utan isolering. Därav presenteras effektutvecklingskurvor endast för heptantester.

Figur 16 och figur 17 nedan visar effektutvecklingen från heptantester i kärldiameter 0,15 m och 0,20 m. I försöken med isolering ses en snabbare tillväxthastighet samt högre topp i effektutveckling än för testerna utan isolering. Ett kortare brandförlopp kan också observeras, vilket kommer både från att brandförloppet är intensivare men också för att mindre vätska användes i testerna för isolering.



Figur 16. Effektutveckling för heptanbränder utan isolering (försök 1A) samt med isolering (försök 12).



Figur 17. Effektutveckling för heptanbränder utan isolering (försök 3B) samt med isolering (försök 13).

I tabellen nedan anges de värden för peak HRR som uppnåddes i testerna samt hur mycket peak HRR ökade procentuellt när isolering användes gentemot genomsnittliga peak HRR för dubblettförsöken utan isolering.

Vad tabellen visar är att med hjälp av isoleringen ökade peak HRR mellan 40-68 %. Detta är en väldigt stor ökning för att bara ha begränsat konduktiva och konvektiva värmeförluster från kärlet. Det kan istället indikera att isoleringen påverkat branden på ytterligare sätt än önskat.

Tabell 5. Anger maximal effektutveckling för isoleringstesterna av heptan och procentuell ökning av peak HRR gentemot dubblettförsöken utan isolering.

Försök	Peak HRR (kW)	Ökning i peak HRR med isolering (%)
Utan isolering 0,15 m	10	40 %
Med isolering	14	
Utan isolering 0,20 m	21,6	68 %
Med isolering	36,2	

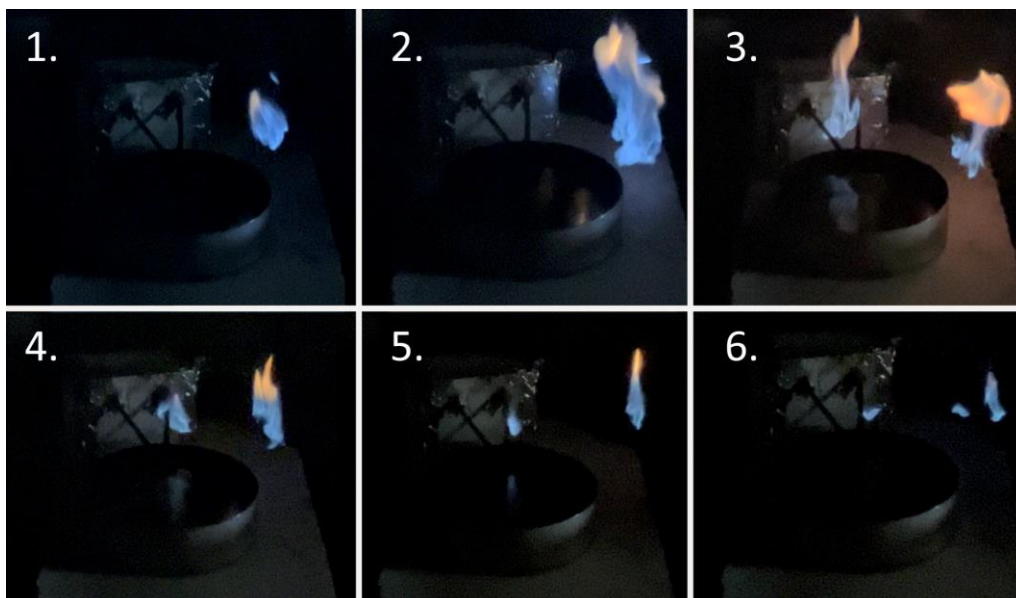
5.4 Flamhöjd och okulära observationer

I figur 18 nedan från försök 3A och 4A kan det observeras att flammans höjd reducerades när X_{O_2} sänktes från 21 % till 15 %. Flammen blev även mer turbulent samt fick en blå färg i flambasen närmast vätskeytan. Samma förlopp observerades för heptan med kärlstorlek 0,15 m.



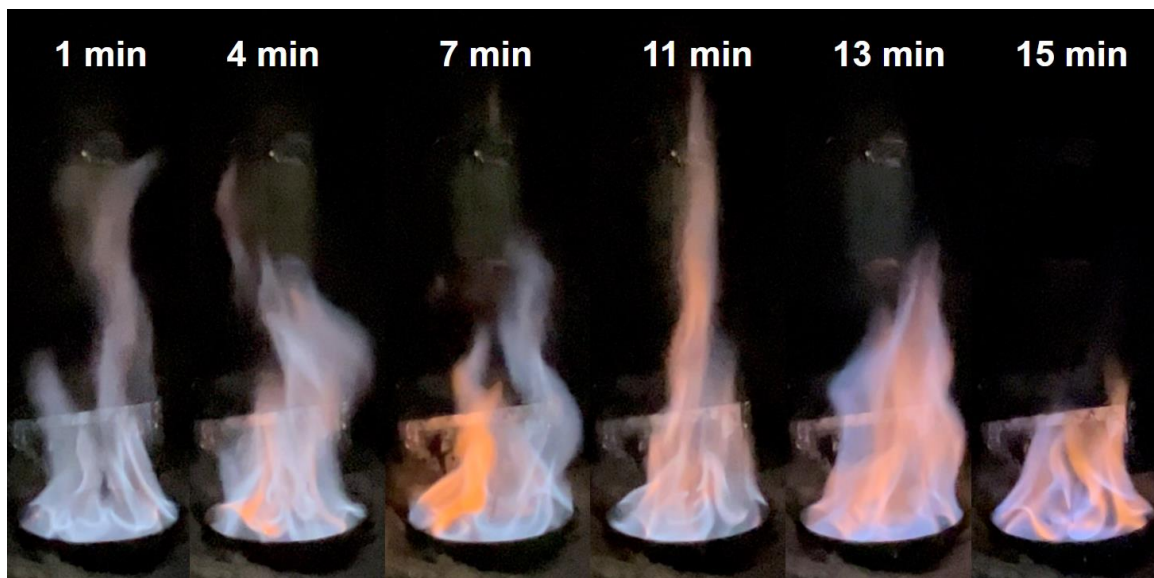
Figur 18. Bilder från försök 3A och 4A jämförda sida vid sida.

Ett fenomen som observerades i försök 4A för heptan i 0,20 m kärl vid 15 % X_{O_2} var "ghosting fire", se figur 19 nedan. Detta är en etablerad händelse som observerats av bland annat Yao et al. (2019). En brand kan benämnas som "ghosting fire" när flammor befinner sig ovanför eller utanför en till synes slocknad flambas. Detta inträffade för heptanbranden precis innan flamman slocknade. Även för LOC-mätningarna observerades ghosting fires när branden slocknade vid låga X_{O_2} , precis som i heptanförsöket nedan.



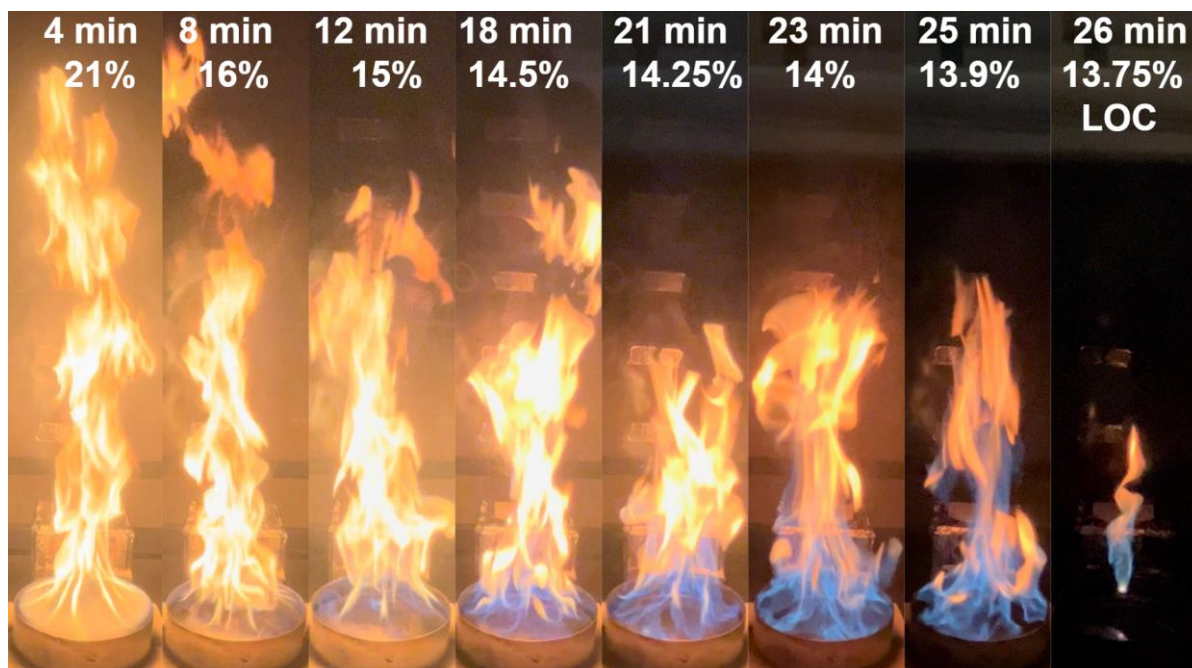
Figur 19. En serie bilder från heptanförsök 4A numrerade 1-6 efter det tidsintervall de togs i. Här visas fenomenet kallat "ghosting fire".

För metanolbränderna i 0,15 m kärl skiljde sig brandförlopp och flamhöjd inte mycket mellan 21 % och 15 % X_{O_2} . Skillnaden var främst att flammen utmed testerna övergick från att ha endast en blå flamma i början till en blandning mellan röd och blå flamma mot testets slut. Detta inträffade främst vid 21 % X_{O_2} men även vid 15 % X_{O_2} . Där trädde den röda flammen ej fram lika tidigt in i testet och var ej lika väldefinierad. I nedan figur 20 visas en bildserie från försök 5A vid 21 % X_{O_2} som illustrerar hur den röda flammen träder fram när försöket pågår. Tidstämplar i bilden talar om när i brandförloppet flammen sågs anta den form och färg som visas.



Figur 20. En serie bilder från försök 5A med tidpunkt utsatt från när i brandförloppet bilden togs. Flamma går från blå till blandning mellan röd och blå.

I figur 21 nedan visas flammans utseende när heptan i 0,20 m kärl utsattes för en X_{O_2} som sänktes från 21 % ner till LOC. Ett par saker kan observeras. Till skillnad från 0,15 meter kärlet sänks flamhöjden allt eftersom X_{O_2} sänks. Flambasens genomskinlighet ökar och den går från att ha en gul färg till en genomskinlig blå färg. Den blå färgen blir alltmer påtaglig i takt med att X_{O_2} sänks. Detta är synonymt med att flammans sotighet blir mindre. När syrekoncentrationen nått heptanens LOC kan det i sista bilden i figuren ses att vätskeytan längre kan antändas. Upprepade antändningsförsök ledde här endast till att gniständaren gav upphov till en flamma som ej kunde sprida sig vidare till vätskan.



Figur 21. En serie bilder från LOC-testerna, försök 11, med tidpunkt utsatt från när i brandförloppet bilderna togs samt vad rådande X_{O_2} var.

När tester med isolering skulle göras för heptan i 0,15 m kärl vid 21 % antändes isoleringen runt om. Detta orsakade flammhöjd och effektutveckling att bli mycket högre än det som observerats tidigare. Brinntiden blev även avsevärt kortare vilket också observerades i kapitel 5.3.4 Isolering. I figur 22 nedan kan flammorna ses emittera från isoleringen, utanför kärlets omkrets. Bilder som visar isoleringens brandutsatta yta ses i samma figur. Detta indikerar att, precis som uttalat i kapitel 5.3.4 Isolering, att isoleringen deltagit i brandförloppet på mer sätt än att minimera värmeförluster till omgivningen.



Figur 22. Bilder på isoleringen som började brinna under försök 12.

Härnäst visas tabell 6 som summerar hur de två vätskornas flammhöjd minskar när antingen kärlstorlek eller X_{O_2} reduceras. Tabellens avläsning sker på samma sätt som för tabell 4, se 5.3.3 Peak HRR. Flamhöjderna har tagits fram kvalitativt genom att okulärt bestämma vilken höjd flammen befinner sig på 50 % av tiden. Sedan har videomaterial från testerna använts och genom mätning i bild har flammhöjden bestämts.

Vad tabellen visar är att en sänkt X_{O_2} hade större påverkan på flammhöjden än en sänkt kärlstorlek hade, vilket gällde för både heptan och metanol. Heptan påverkades mer än metanol av en sänkt X_{O_2} vilket resulterade i en kraftigare minskad flammhöjd. När kärlstorleken sänktes och X_{O_2} hölls konstant såg metanolbränderna en kraftigare minskning i flammhöjd än metanolen.

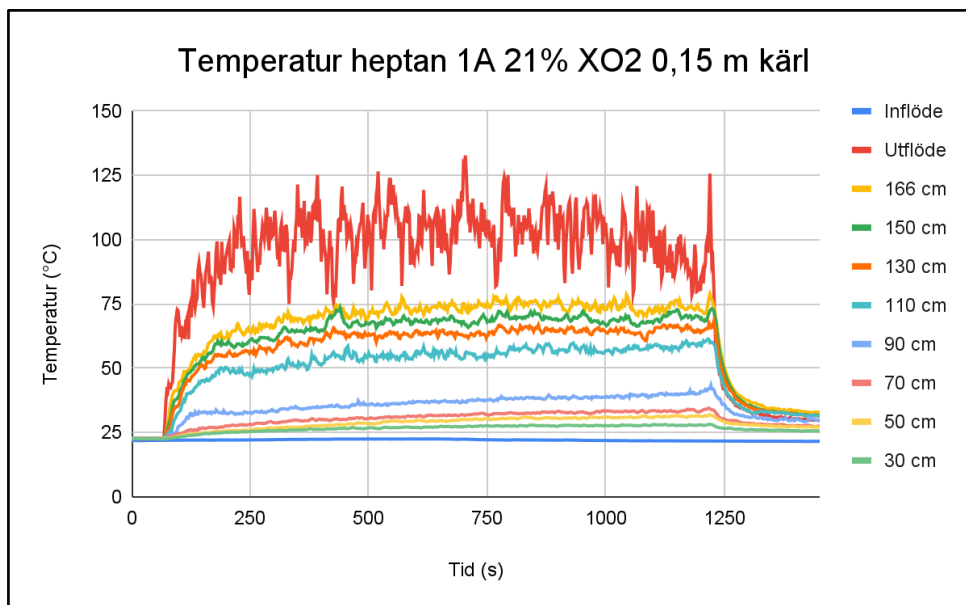
Tabell 6. Visar hur flamhöjden minskat för heptan- och metanolbränder när det utatts för minskad kärldstorlek och syrekoncentration.

Flamhöjd (m)		Minskande $X_{O_2} \rightarrow$		Procentuell minskning
		21 % X_{O_2}	15 % X_{O_2}	
Minskande kärldstorlek ↓	Heptan 0,20 m	0,7 m	0,4 m	43 %
	Heptan 0,15 m	0,6 m	0,4 m	33 %
Procentuell minskning		14,2 %	0 %	
Minskande kärldstorlek ↓	Metanol 0,20 m	0,4 m	0,25 m	38 %
	Metanol 0,15 m	0,3 m	0,2 m	33 %
Procentuell minskning		25 %	20 %	

5.5 Kammartemperatur

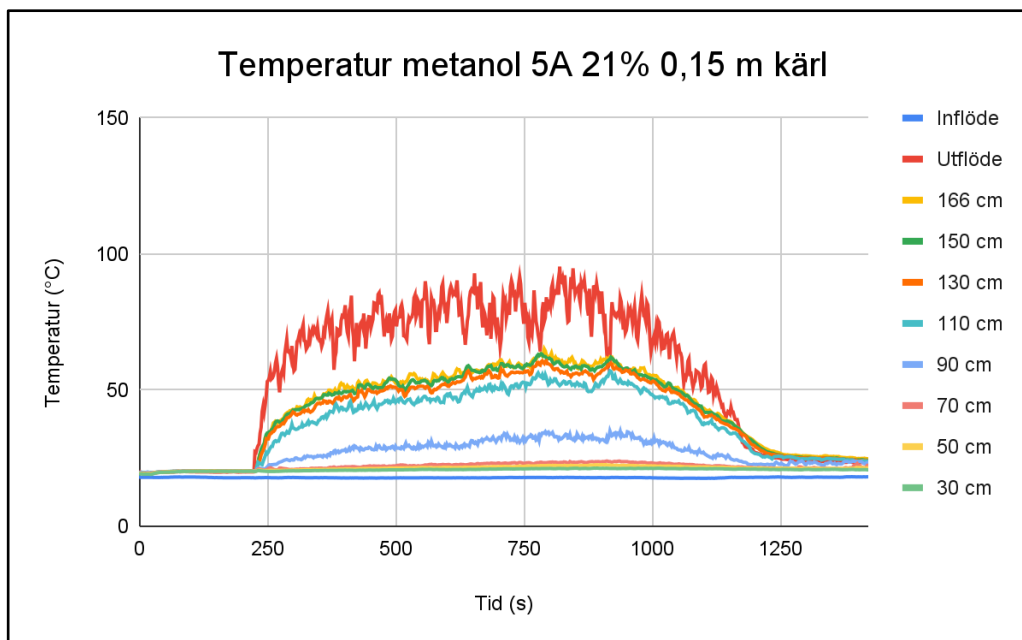
I följande delkapitel presenteras kammartemperaturkurvor för fyra försök. Termoelement som mätte temperaturen satt på olika höjder vid väggen i kammaren samt i in- och utflödeskanalerna. Dessa höjder är angivna i cm till höger om kurvorna.

I figur 23 visas temperaturkurvorna för försök 1A. I samtliga bränder som hade en kontinuerlig förbränning utan avbrott pga slockning hade temperaturkurvorna denna form och orientering, med varierande värden på temperaturerna. Den högsta temperaturen kan ses i utflödet från kammaren, där termoelementet var placerat i centrum av skorstenen i takhöjd av kammaren. Detta gjorde att termoelementet var lokaliserat precis ovanför branden vilket förklarar varför de högsta temperaturerna registrerades här.



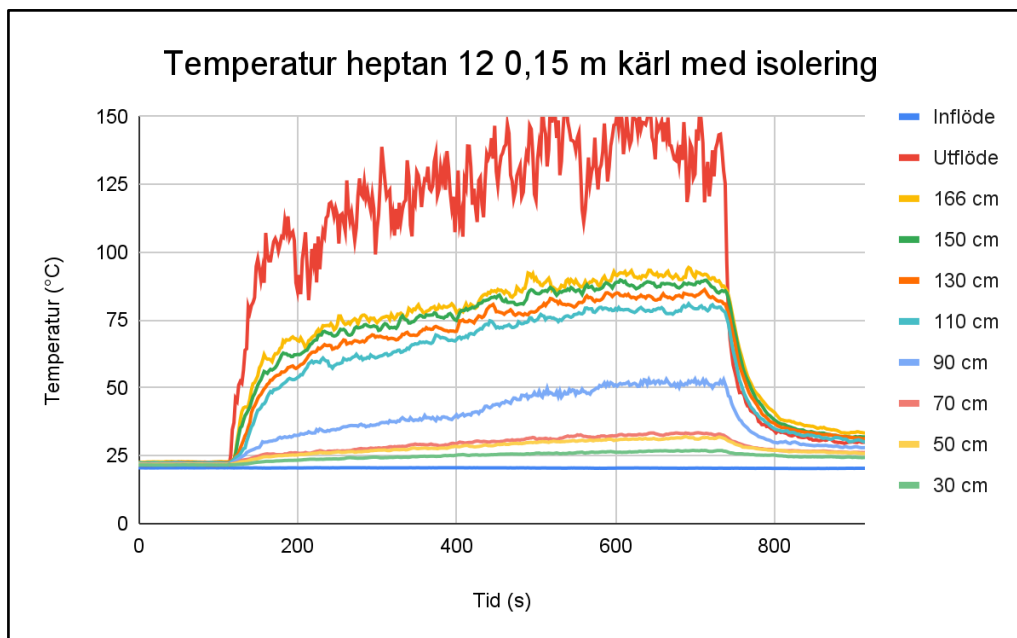
Figur 23. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.

I figur 24 visas temperaturkurvorna för metanol utförd i 21% X_{O_2} och 0,15 m kärl. Här observeras lägre temperaturer på alla höjder. Att heptanbränderna når högre temperaturer i kammaren än metanolbränderna är genomgående för samtliga test.



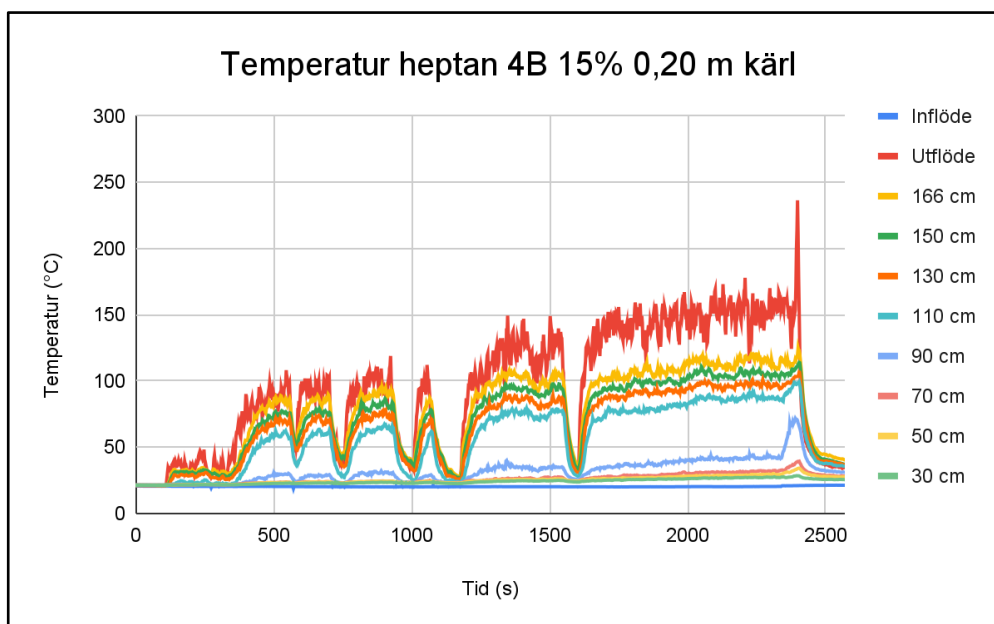
Figur 24. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.

I figur 25 visas lufttemperaturens utveckling när isolering användes för heptanförsök 12. Samma skala för y-axeln har använts som för de tidigare två figurerna, vilket tydligt illustrerar hur temperaturutvecklingen blev markant högre. Detta stämmer överens med tidigare observationer kring isoleringens effekt på brandförloppet.



Figur 25. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.

I figur 26 nedan kan det observeras vad som händer med lufttemperaturen i kammaren när flammen slocknar. Det ger upphov till att samtliga temperaturkurvor snabbt sjunker. När branden återantänds ses temperaturen stiga upp till föregående nivå lika snabbt som den sjönk.



Figur 26. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.

Undertill presenteras tabell 7 som visar hur utflödestemperaturen minskade när antingen kärlestorlek eller X_{O_2} reducerades. Tabellens avläsning sker på samma sätt som för tabell 4, se 5.3.3 Peak HRR.

Vad resultaten visar är att utflödestemperaturen påverkades som mest av en sänkt kärldiameter. Den största observerade sänkning i utflödestemperatur var för heptanbränderna när de utsattes för både sänkt kärldiameter och X_{O_2} . Utflödestemperaturen för metanolbränderna minskades också men inte i lika stor grad som hos heptanbränderna.

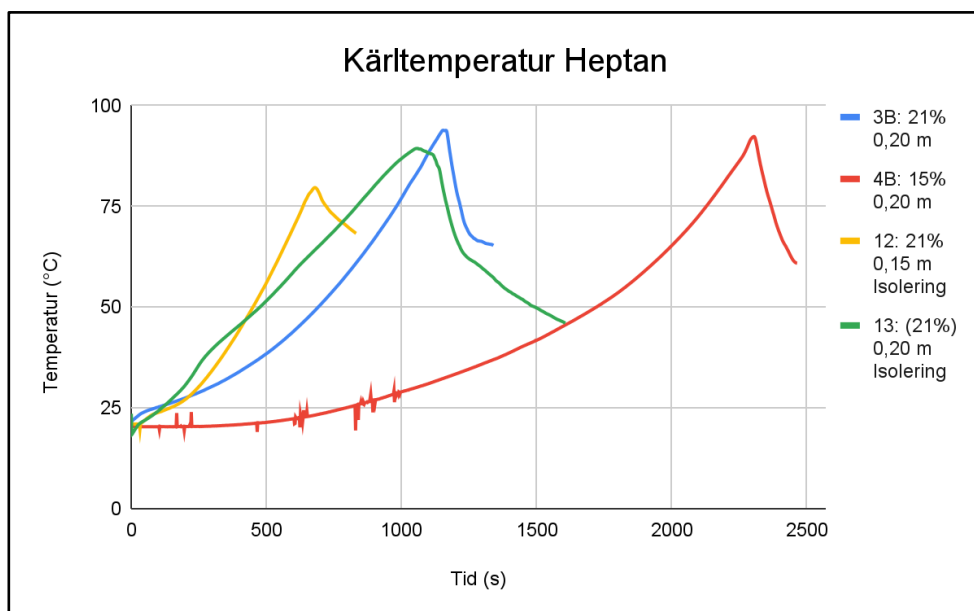
Tabell 7. Anger förändring i utflödestemperaturen i kammaren.

Utflödestemperatur (°C)		Minskande $X_{O_2} \rightarrow$		Minskning i temperatur
		21 % X_{O_2}	15 % X_{O_2}	
Minskande kärldiameter ↓	Heptan 0,20 m	250 °C	160 °C	90 °C
	Heptan 0,15 m	125 °C	90 °C	35 °C
Procentuell minskning		125 °C	70 °C	
Minskande kärldiameter ↓	Metanol 0,20 m	140 °C	110 °C	30 °C
	Metanol 0,15 m	90 °C	75 °C	15 °C
Procentuell minskning		50 °C	35 °C	

5.6 Kärntemperatur

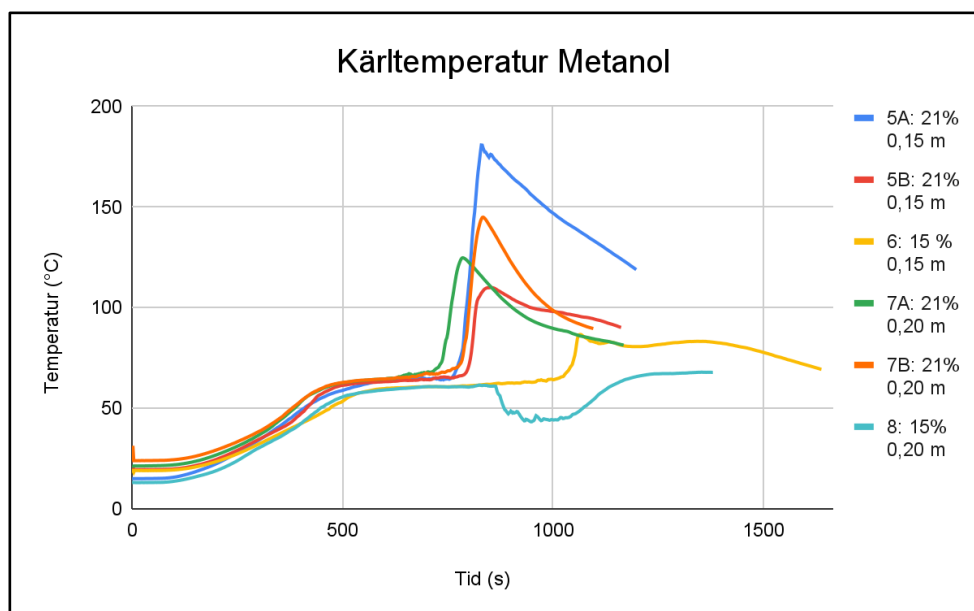
Här redovisas två grafer som visar kärntemperaturen för heptantester och metanoltester. Denna mättes med hjälp av ett termoelement som var placerat utanpå kärlets underkant. Anledningen till denna mätning var för att se hur stor den termiska uppvärmningen var av kärlet och för att sedan korrelera detta med resultaten vi såg för effektutveckling.

I figur 27 som visar heptantesterna kan en temperaturökning till högst 90 °C observeras för några tester innan en minskning följer. Kokpunkten för heptan är 98 °C. Kärlet kan ses värmas upp långsammare för kurva 4B än 3B, där syrekoncentrationen är den åtskiljande faktorn. För de två försök med isolering runt kärlet, 12 och 13, steg kärntemperaturen snabbare än för resten av försöken. Här når även försök 13 ungefär samma maxtemperatur på 90 °C som resterande försök medan försök 12 inte kommer hela vägen dit.



Figur 27. Temperaturutvecklingen i kärlets botten för samtliga heptantester.

För metanoltesterna i figur 28 ses samtliga tester följa samma utvecklingskurva och plana ut vid 68 °C vilket är metanolens kokpunkt. Efter att ha planat ut ett tag kan kurvorna ses öka till så högt som 180 °C varefter en sänkning i temperatur följer.



Figur 28. Temperaturutvecklingen i kärlets botten för samtliga metanoltester.

5.7 Förbränningsprodukter

I följande två tabeller presenteras produktionen av CO/CO₂ för samtliga tester. Något som kan observeras är att CO/CO₂-produktion för metanol är mycket mindre än för heptan, där produktionen av CO är en tiopotens mindre och produktionen av CO₂ är mindre än hälften. Ingen trend för påverkan av kärstorlek eller X_{O₂} går att utläsa från resultaten då förändringen mellan försöken är väldigt irreguljär och inte följer något mönster.. Vad gäller CO är produktionen så liten att resultaten blir svåra att mäta korrekt, exempelvis gav test 5B en negativ CO-produktion.

Tabell 8. Totala CO₂- och CO-produktionen för heptantesterna .

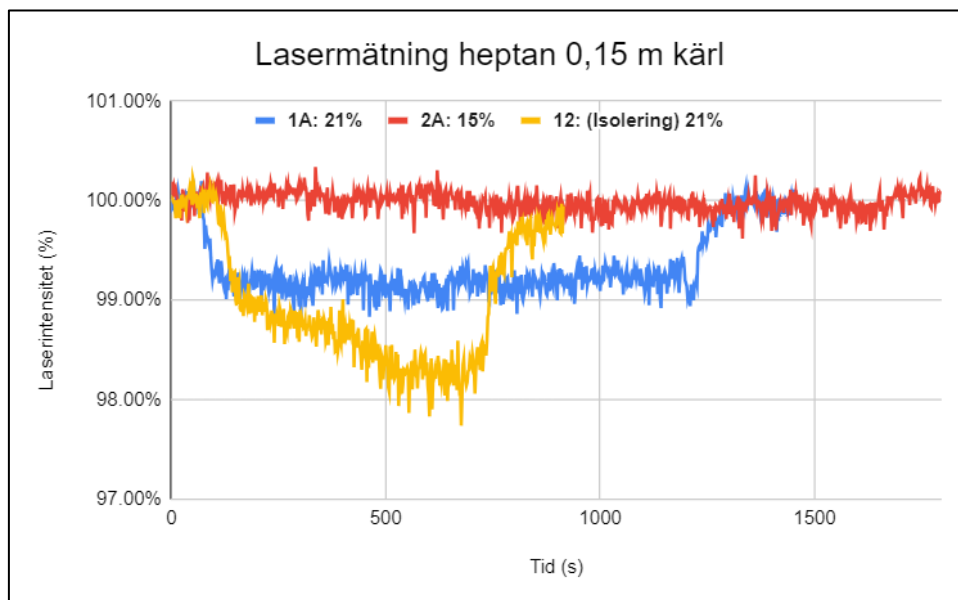
Heptan		
Test	Produktion CO₂ (g/g)	Produktion CO (g/g)
1A	2,63	0,010
1B	2,73	0,019
2A	2,52	0,020
2B	2,77	0,032
3B	2,50	0,018
4A	2,75	0,015
4B	2,61	0,020
9	2,72	0,008
10	2,36	0,022
11	2,64	0,016
12	2,46	0,027
13	2,36	0,012

Tabell 9. Totala CO₂- och CO-produktionen för metanoltesterna.

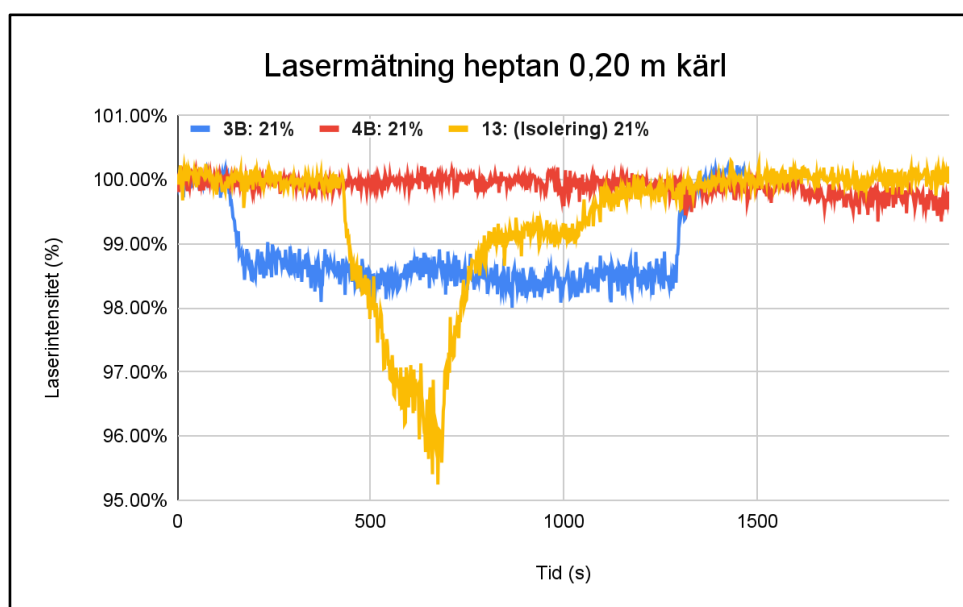
Metanol		
Test	Produktion CO₂ (g/g)	Produktion CO (g/g)
5A	1,16	0,0077
5B	1,21	-0,0032
6	1,19	0,0042
7A	1,23	0,0040
7B	1,19	0,0034
8	1,23	0,0056

5.8 Laserreduktion

I detta delkapitel presenteras grafer som för heptanförsöken visar reduktionen av lasern som satt i kanalen från kalorimetern, där laserreduktionen har uttryckts i procent. Här betyder 100 % laserintensitet att laserstrålen går opåverkad tvärs över kanalen vilket innebär helt klar sikt, och ju mer grafen sjunker desto lägre blir sikten. I graferna belyses effekten av en reducerad X_{O_2} samt påverkan från isoleringen. Vad som kan observeras är att när X_{O_2} sänks blir laserreduktionen nästintill försumbar, då sikten ligger kvar på 100 % för båda kärstorlekar medan sikten vid 21 % X_{O_2} ligger på ungefär 99 % för 0,15 m kärll respektive 98,5 % för 0,20 m kärll. Laserreduktionen vid 0,20 m kärll är högre än för 0,15 m kärll. Det går även att se i både figur 29 och figur 30 att när isolering användes bildades mycket mer sot.



Figur 29. Laserintensitet för heptan i 0,15 m kärll vid olika syrekoncentrationer.



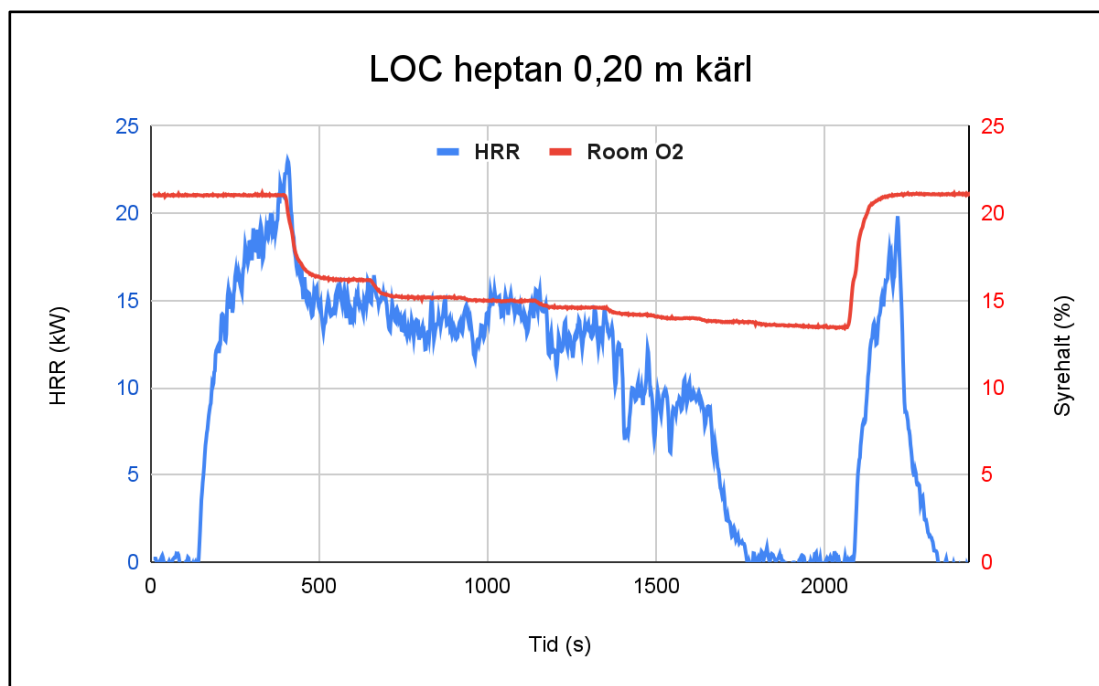
Figur 30. Laserintensitet för heptan i 0,20 m kärll vid olika syrekoncentrationer.

5.9 Limiting Oxygen Concentration (LOC)

I detta delkapitel redovisas LOC för heptan vid olika X_{O_2} i form av tabell 10. Figur 31 undertill visar processen av att mäta LOC för heptan i ett 0,2 m kärl. Här syns hur effektutvecklingen påverkades av en ständigt sjunkande X_{O_2} . Den röda linjen visar den X_{O_2} som etablerade sig i kammaren och den blå linjen effektutvecklingen från branden. Varje gång branden slocknade sjönk effektutvecklingen vilket syns i grafen. Det syns också hur HRR ökade igen när branden återantändes. När branden slocknade och ej längre kunde antändas fastslogs den rådande X_{O_2} som LOC för den specifika kärlstorleken. Graferna för kärlstorlekar 0,10 och 0,15 m hade liknande utseende som figur 31.

Tabell 10. Visar LOC för heptan i varierande kärlstorlek.

Kärlstorlek (m)	LOC
0,1	13,9
0,15	14,2
0,2	13,8



Figur 31. Effektutveckling och syrekonzentration i testkammaren under ett LOC-test.

6 Diskussion

I denna del av rapporten diskuteras resultat och avvikelser i rapporten. Diskussionerna bygger på jämförelser med litteraturen. Ämnesspecifika delar för resultat och avvikelser tas upp för sig i respektive underrubriker.

6.1 Resultat

Här diskuteras resultaten som erhöles i arbetets laborativa arbete.

6.1.1 Beräkningsmetod HRR_OC och HRR_CDG

I resultatdelen kan det ses att kurvorna för HRR_OC och HRR_CDG ser ungefär likadana ut, och har ungefär lika värden så länge X_{O_2} håller sig runt 21 %. För testerna med 15 % X_{O_2} ses dock tydligt att HRR_OC fluktuerar så pass mycket att kurvan nästan inte är läsbar även efter att den städats med Savitzky-Golayfiltret som beskrevs i avsnitt 3.8.2 Savitzky-Golay metoden för flytande medelvärde. En teori till varför kurvorna för HRR_OC går ner på negativa värden varje gång flammen slocknar är att flammen bidrar med en termisk stigningseffekt för luften i kammaren upp i skorstenen. När flammen slocknar och denna termiska stigningseffekt försvinner kommer istället en större del luft temporärt dras från omgivningsluften där syrehalten är 21 %, vilket är över den grund (eng: *baseline*) på 15 % som använts för att beräkna HRR_OC. Då följer ett stort negativt utslag i uträkningarna eftersom det för beräkningsmodellen ser ut som att flammen har producerat syre vilket är omöjligt.

HRR_OC ger relativt otydliga resultat, och i kombination med hur mycket mer invecklad ekvationen är i förhållande till HRR_CDG visar det sig ogynnsamt att använda HRR_OC i denna rapport. För kvävevitierade bränder överlag utanför denna rapportens arbete kan det argumenteras för att HRR_OC ej är optimal och att HRR_CDG är en bättre anpassad beräkningsmetod. Särskilt då båda metodernas resultat ligger i närheten av inte bara varandra utan även den teoretiska effekt som räknats fram i samband med laborativa tester. Denna metod har visat sig vara tillräckligt nära verkligheten, åtminstone samma verklighet som HRR_OC, men utan extrema dalar och toppar i kurvorna. Utöver detta möjliggör HRR_CDG att beräkna effektutveckling under LOC-tester när syrekoncentrationen sänks kontinuerligt. Samma beräkningar hade ej varit möjliga med HRR_OC-uträkningen, åtminstone om ekvationen inte ska utökas ytterligare som beskrevs i avsnitt 3.8.1.

6.1.2 Effektutveckling

När X_{O_2} minskades från 21 % till 15 % sjönk effektutvecklingen för heptanbränderna med ungefär 34 % för båda kärlstorlekar. En reduktion i kärlstorlek gav också en lägre effektutveckling. Vid studie av HRRPUA sågs en liten reduktion när kärlstorlek minskades i 21 % X_{O_2} . När kärlstorleken minskades i 15 % X_{O_2} fanns det också en reduktion, men här var skillnaderna mycket mindre. En bidragande orsak till att minskningen av HRRPUA var lägre här var att heptanbranden för 0,20 m kärl slocknade upprepade gånger och hade svårigheter att hålla sig vid liv. Detta har gjort att branden aldrig hinner nå en jämn förbränning och därmed sin högsta intensitet (se figur 11). Anledningen till varför heptanbranden i 0,20 m kärl hade så stora problem att underhålla en flamma jämfört med i

0,15 m kärl vid 15 % X_{O_2} är oklart. Det tros beror på värmeöverföring från ledning och strålning samt relationen mellan mantelarean av kärlet och ytan exponerad vätska. Vidare forskning behövs för att undersöka fenomenet vidare och bekräfta denna hypotes.

Detta examensarbets hypotes angående självslockning av flamma i syrenedsatt miljö är att någon av vätskans brännbarhetsgränser passeras och därmed släcker branden. Det finns för brännbara gaser en nedre- och övre brännbarhetsgräns (eng. *lower- and upper flammability limit*, "LFL" och "UFL") (Drysdale, 2011). LFL passeras när andelen brännbar gas i luften går under en viss gräns, och UFL passeras när gasblandningen blir för koncentrerad och fet. Det hypotiseras att i fallet av självslockning av flamma i syrenedsatt miljö är det en form av UFL som överstigs. Termen "en form av UFL" används eftersom LFL och UFL normalt gäller för normal atmosfär och ej uttryckligen har samma gränser i syrenedsatt miljö. I detta arbetes fall är det alltså inte ett explicit fenomen av att det är UFL som passeras, men samma händelseförlopp och anledningar tros uppstå som när UFL överskrids i vanliga fall. Gränsen för UFL teoriseras kunna överstigas genom att för mycket brännbar gas pyrolyseras så att en för fet blandning uppstår i luften ovanför kärlet. Detta skulle kunna hända genom att hastigheten som vätskan pyrolyseras överstiger den "hastighet" som nytt syre kan blanda in sig i luftutrymmet ovanför kärlet. Det sistnämnda inträffar eftersom luften blivit syrefattig. Precis intill ytan är då gasblandningen i luften för fet så att en brand inte kan ta plats, och det brännbara ytskiktet förflyttas en bit ovan- och utanför kärlets direkta närhet. Detta skulle även kunna förklara hur "ghosting flames" uppstår. Då förbränningszonen flyttats bort från kärlet följer flammorna efter, men på grund av det turbulenta luftflödet i kammaren skingras förbränningszonen så att flammen släcks efter ett tag.

För att avrunda denna långa hypotes måste det också nämnas att vätskans natur spelar en stor roll i frågan, där brännbarhetsgränser och flyktighet är egenskaper som kan skilja sig brett mellan olika ämnen. Det är mycket möjligt att varför metanoltesterna aldrig slocknade är för att den har en lägre LOC än heptan. Metanolens LOC för denna testuppställning undersöktes aldrig, men den är dokumenterad till att vara vid 10 % X_{O_2} (Chiti, 2010).

På tal om metanol så observerades det även här en minskning i HRR när X_{O_2} reducerades. För det mindre kärlet minskade effektutvecklingen med cirka 20 %, och för det stora kärlet minskade den med cirka 30 %. Detta är en något lägre minskning än för heptanen. När HRRPUA undersöktes sågs dock ingen skillnad på effekten oavsett vilken atmosfär och kärlestorlek branden tog plats i. Detta tros ha en grund i att metanol är ett väldigt rent brinnande ämne som inte har en sotig flamma. Som förklarades i kapitel 3.6 "ORS effekt på skalning av vätskediameter" blir regressionshastigheten större hos en vätska vid en ökad diameter främst på grund av den högre nivån infallande strålning från flammen. En högre regressionshastighet är synonymt med en ökad massförlust, och i kapitel 3.4 "ORS effekt på fasta material" observerades det att MLR och HRR följer ett linjärt samband. På grund av att metanolflammen har väldigt låg strålningsfraktion kan detta kan alltså motivera att vätskans förbränningsprocess ej påverkas mycket av att man skalar upp och ner branden. En annan observation som gjordes för metanolbränderna var att avtagningsfasen för HRR var långsammare än för heptanbränderna (jämför figur 9 och 14). Detta grundar sig i att heptanen brann med en jämn vätskeyta ovanpå en vattenbas medan metanolen var utan vatten och därför påverkades av kärlets konvexa yta. Detta kunde ansamlas vätskan till kanterna var branden kunde underhållas under längre tid. Därtill så stod kärlet vid

metanolbränderna ovanpå isoleringen som sällan hade en helt horisontell orientering, vilket ytterligare stärkte ansamlingen av vätska till ena sidan av kärlet. Detta gav vätskan en mycket mindre brinnarea vilket förlängde brinntiden gentemot om samma volym vätska hade brunnit över kärlets hela area.

6.1.3 Total energi

Som synes i figur 12 är den totala frigjorda energin i stort sett likadan för de två heptanförsöken utan isolering. Detta är rimligt då inget i tidigare litteratur (se kapitel 3.4 och 3.5) pekar på att reducerad syrehalt skulle påverka den totala frigjorda energin. Anledningen till att resultaten skiljer sig kan vara att mängden heptan som användes skiljde med några få gram mellan varje försök, att data har tappats när den städades eller att mätutrustningen inte har en exakt mät noggrannhet.

Försöken med isolering däremot uppvisar märkliga resultat. När en omräkning görs till frigjord energi per gram heptan (kJ/g) visas att isoleringsbränderna haft lägre total frigjord energi per gram heptan. Detta känns motsägelsefullt då tolkningen från effektutvecklingskurvorna var att isoleringen propagerade branden och gav en den högre effektutveckling. Istället blir effektiviteten av branden lägre när isoleringen närvarar, vilket är något som i detta arbete saknar förklaring.

6.1.4 Temperatur

Kammartemperaturen uppvisar för de flesta tester ett tydligt skikt mellan 0.90 och 1.10 m, se figur 23 test 1A. Det var ungefär i den höjden som flamman befann sig också. För samtliga tester går att konstatera att temperaturen följer samma trend som effektutvecklingen, nämligen att lägre syrekonzentration, som ger lägre effektutveckling, även ger lägre temperaturutveckling i rummet. För test 4B där branden slocknade ett antal gånger under försökets gång ses temperaturen sjunka väldigt snabbt så fort flamman slocknar. Kurvan återupptar den tidigare temperaturen lika snabbt när branden återantänds. Detta tyder på att genomflödet av luft genom kammaren var väldigt högt då värmen inte stannade kvar i kammaren någon längre tid.

Käriltemperaturen i metanoltesterna beter sig väldigt likt för samtliga tester, där den initialt ökar upp till metanolens kokpunkt på ca 65 °C för att sedan plana ut. Efter ett tag kan temperaturkurvorna ses öka igen. Detta beror på att en så pass stor volym metanol brunnit bort att kärlets botten exponerats genom vätskeytan. Då kärlet inte var helt plana i botten ansamlades vätskan intill kärlets kant där förbränning fortsatte. Detta gav upphov till två processer som bidrog till den ökade käriltemperaturen. Eftersom flammorna förflyttades från att vara centrerade i mitten av kärlet till att brinna vid kärilkanten blev värmeöverföringen mångfaldigt högre. Detta värmdde upp kärlet mer än tidigare, och eftersom kärlet var brandtåligt men av material med hög konduktivitet blev uppvärmningen homogen. Den andra, mer dominant, processen som bidrog till en högre käriltemperatur var att när vätskan brunnit bort försvann den termiska last som ledde bort värme. Metanolen fungerade som en kylande vätska som behöll temperaturen på cirka 65 °C, då detta är kokpunkten för ämnet. När det inte fanns mer vätska att kyla ner kärlet kunde temperaturen öka till så höga nivåer som 180 °C. Termoelementet var som tidigare nämnt placerat på undersidan av kärlet, och på grund av kärlets kupade botten var värmeledningen från kärlet till kringliggande material

mycket lägre än om det varit direkt kontakt mellan käril och underlag. En skillnad som går att se mellan metanolförsöken är att de tester som var i syrereducerad miljö erhöi en något lägre temperaturnivå där de planade ut på.

För heptan följde käriltemperaturen inte samma mönster som för metanolen. Detta kan bero på att det användes olika mängder vatten i kärilet beroende på kärilstorlek. Vattnet agerar som en typ av isolering mellan den brännbara vätskan och kärilets botten, där termoelementet var placerat. Om det fanns isolering runt kärilet eller inte var också en påverkande faktor. Som tidigare nämnts kan kärilet ses värmas upp långsammare för försök 4B än 3B (se figur 27), där X_{O_2} är den åtskiljande faktorn. Trots den lägre uppvärmningshastigheten når båda linjer ungefär samma sluttemperatur innan heptanet brunnit ut och temperaturen går ner igen. Sluttemperaturen är dock inte samma som heptanets kokpunkt på cirka 98 °C. Varför 90 °C är den gemensamma sluttemperaturen för många av försöken är ej självklart, men hypoteser finns. En hypotes är att det kan bero på att den termiska energi som finns i den mängden heptan som användes är "förutbestämd" till att värma upp kärilet en viss mängd. Med andra ord så kommer alltid 564g heptan resultera i en käriltemperatur på 90 °C. Vad som motsäger hypotesen är dock att försök 12 med 200 g heptan och isolering i 0,15 m käril nådde upp till 80 °C vilket ej är lika långt ifrån 90 °C som 200 g är från 564 g. I försök 12 började dock isoleringen brinna, vilket kan ha bidragit med uppvärmning av kärilet. En ytterligare hypotes är att 90 °C kan vara den temperatur där en jämvikt ställer in sig mellan uppvärmning och värmeförlust. För att underbygga denna teori hade dock kurvorna behövt stanna av och befinna sig på 90 °C under en längre tid. Istället dyker kurvorna så fort de nått 90 °C varför även denna hypotes ej är fullständigt övertygande. Den tredje hypotesen avseende kärilets tämligen återkommande maxtemperatur på 90 °C är att det råkar vara ett sammanträffande att vätskan brann ut då käriltemperaturen nått 90 °C. Fler tester hade behövts för att se tydliga samband och kunna dra konkreta slutsatser om detta.

6.1.5 Förbränningsprodukter och laserreduktion

Att förbränningsprodukterna skiljde sig mellan metanol- och heptanbränderna kan till stor del förklaras av vätskornas olika ämnesuppsättningar. På grund av att de är olika ämnen brinner de med olika mängder av restprodukter, där inräknat CO- och CO₂ produktion.

Koldioxidproduktionerna ligger väldigt nära varandra i värden oavsett syrekoncentration vilket stämmer överens med resultaten Bray et al. (2023) kom fram till, nämligen att vitierade miljöer inte påverkar CO/CO₂-produktion i en nämnvärd utsträckning. Detta stämmer dock inte överens med vad Hersner & Nilsson (2021) kom fram till, vilket var att koldioxidproduktionen ändrade sig antingen uppåt eller nedåt för olika vätskor. Det kan dock upprepas att Hersner och Nilsson själva presenterade problem med reproducerbarhet i testerna, och att resultaten därför kan skilja sig från andra studier.

Kolmonoxidproduktionen har en ganska stor procentuell spridning, vilket nog beror på att mätningarna inte är tillräckligt exakta vid den nivå av kolmonoxid som det faktiskt handlar om. För ett av försöken (5B) blev produktionen negativ vilket är synnerligen osannolikt, och styrker att mätningar och mätinstrument inte varit helt korrekt anpassade för situationen. Att kolmonoxidproduktionen inte går att avläsa tyder på att inga större mängder kolmonoxid

producerades under försökets gång. Detta styrks återigen av resultaten från Bray et al. (2023).

Laserreduktionen var väldigt liten för samtliga heptantester som utfördes i 15 % X_{O_2} . En anledning är att flammen blev mindre sotande och tappade sin röda färg när X_{O_2} sänktes, vilket kan ses i figur 21 i avsnitt 5.4. En annan anledning till den låga nivån av sikttnedsättning kommer förmodligen av den stora utspädningsfaktorn från insuget. Hade closed CAC använts så utblandning med atmosfärsluft förhindrats hade siktpåverkan blivit högre då endast brandgaserna analyserats i kalorimetern.

6.1.6 Okulära observationer

Flammornas höjd, turbulens och färg varierade tydligt mellan de olika syrekoncentrationerna. Flamhöjden nådde sin högsta punkt för den specifika uppställning av vätska och kärldiameter när X_{O_2} var 21 % vilket var förväntat från vad litteraturen säger, se kapitel 3.3. För 21 % var flammorna enhetligt mindre turbulenta för båda vätskor och sotiga för heptanen. När X_{O_2} sänktes började flammen pulsera och flacka med högre frekvens, och den tydliga flambasen som fanns vid 21 % blev svår att se. För heptan bytte flambasen färg från att vara grumligt gul till att först bli genomsiktig och sedan blå, vilket kan observeras i figur 21. För metanol däremot beskrevs tidigare att flammen var blå men fick röda inslag under försökets gång. Detta gällde främst under de försök med 21 % syrehalt men även under försök 6 som hade en syrehalt på 15 %. Då den röda färgen kan ses oavsett syrekoncentration uppkommer den troligtvis av orenheter i kärlet, exempelvis sotrester, isolering eller små bitar av det papper som användes för att torka kärlet mellan försöken.

6.2 Avvikelser

I detta delkapitel diskuteras aspekter i arbetet som avvek från förväntat beteende och resultat. Exempel på detta är vätskans brinntid som översteg 15 minuter och isoleringen som bidrog till effektutvecklingen på oväntade sätt. Även delar som uteblivit från arbetet men som vanligtvis är med i liknande undersökningar tas upp, till exempel varför det ej användes en lastcell för att mäta massförlust.

6.2.1 Vätskans brinntid

Vid beräkning av massan vätska som behövdes för att erhålla en brinntid på 15 minuter användes beräkningsformler från Karlsson & Quintiere (1999). När korrekt massa vätska bestämts för den specifika kärldiameteren och ämnet användes denna för samtliga tester. Dock erhöles en brinntid som oftast översteg 15 minuter, men ibland även var kortare. Varför en brinntid på exakt 15 minuter inte erhöles trots att etablerade beräkningsformler och tabeller använts beror på ett antal faktorer. En starkt bidragande faktor är att brand sällan har ett linjärt och helt förutsägbart beteende, och bara mellan två till synes identiska försök kan resultaten skilja. En ytterligare faktor till att ekvationerna ej gav en korrekt vätskemassa kan vara att ekvationerna togs fram i andra förhållanden än vad bränderna i detta arbete hade. Formlerna presenterade av Karlsson & Quintiere (1999) har tagits fram från fritt brinnande bränder, vilket innebär andra rådande omständigheter för en brand än om den är instängd i en kammare som har fluktuerande syrekoncentration. Exempelvis blir den återstrålande faktorn från väggar större i små utrymmen då ett kortare avstånd leder till

större strålningsdos på en specifik yta. Luftflödet i kammaren påverkar också flammans temperatur och den konvektiva värmeöverföringen till vätskan. Detta illustreras i figur 26 där temperaturen kan ses sjunka enhetligt i hela rummet så fort flammen slocknar. Det finns alltså inte någon ansamling av varma gaser som dröjer kvar i rummet utan luftutbytet är relativt snabbt. Slutligen har värden för beräkningar hämtats från tabeller (Karlsson & Quintiere, 1999). Här har värden för n-heptan och metanol använts, men de tabulerade värdena för massflöde per kvadratmeter och förbränningsvärmets som fanns i tabellerna har tagits fram för pöldiametrar som är större än 1,2 meter. Detta arbete använder en kärldiameter som uppstiger till 0,2 meter och enligt tidigare resonemang observeras en stor skillnad i regressionshastighet och därmed effektutveckling vid just storleksövergången på 0,2 m. Detta leder till slutsatsen att de tabulerade värdena kanske inte är helt anpassade till mindre storlekar där strålningen inte har lika stor påverkan på förbränningen. Skillnader mellan beräkningar och faktiska förbränningstider är därför inte helt oväntade.

6.2.2 Isolering

Isoleringens användning i den empiriska undersökningen var något bristfällig. För samtliga tester som involverade isolering misslyckades uppgiften att låta isoleringen vara den enda variabeln som förändrades medan övriga parametrar hölls konstanta. För heptantesterna som presenteras i resultatdelen var utöver isoleringen också vätskemassan annorlunda mellan testerna, vilket påverkade brinntiden enligt figur 16. För metanoltesterna gjordes alla försök med isolering närvarande och inga tester utan isolering, så för dessa tester finns det ingenting att jämföra med för att konkret bedöma isoleringens effekter på branden.

Utöver att kontinuiteten i testerna ej upprätthölls påverkade isoleringen branden mer än förväntat. Som kan ses i figur 22 spred sig branden ut från kärlets kant och brann från isoleringen. Bilder tagna efter branden bekräftar att flammorna spridit sig genom isoleringen och tagit fäste i materialet. Orsaken till detta är oklar då stenuisolereringen användes i tro om att den skulle vara obrännbar. Spekulationer har gjorts att ett bindemedel i isoleringen bidragit i förbränningen och propagerat branden med en ytterligare brandlast utöver heptanen. Detta motbevisas dock då den effektiva förbränningen för heptan (kJ/g) var lägst för testerna med isolering. Det är dock svårt att bekräfta säkert vad som orsakat branden till att sprida sig över isoleringen då materialuppsättningen av denna är okänd och ingen dokumentation över materialinnehållet fanns tillgänglig. En annan hypotes om varför branden spred sig över isoleringen och propagerades är att oförbrända gaserna från heptanen spred sig över kärlets kant, sjönk ner i det porösa isoleringsmaterialet var det fanns större tillgång till luft varpå det antände där i stället. Vad som propagerat branden då kan ha varit att isoleringen bidragit med en ökad diameter för branden, vilket enligt litteratur ger en högre effektutveckling (Karlsson & Quintiere, 1999).

På grund av att mätmetod och data kring isoleringen är bristfällig kan inga definitiva utlåtanden göras kring isoleringens effekter på branden. Huruvida isoleringen påverkar brandeffekten olika i vanlig atmosfär och ORS kan ej fastslås. Det kan heller inte definitivt sägas om isoleringens effekt att innesluta värmen är den enda bidragande faktorn till att en ökad effektutveckling ses i resultaten. Detta eftersom isoleringen tydligt har deltagit i branden och propagerat den. Bekräftande beräkningar har ej gjorts för att se hur stor andel värme som isoleringen hjälpt behålla i kärlet och därmed värmt upp vätskan ytterligare. Däremot görs en ingenjörsmässig bedömning att det inte är rimligt att minskningen av

temperaturförluster från kärlet kan öka peak HRR från 21 kW till 36 kW, vilket motsvarar en ökning på 68 % (se figur 17 och tabell 5). Det anses inte orimligt att isoleringen bidragit med en viss isolerande effekt som ökat temperaturen i kärlet. En högre käriltemperatur leder till snabbare pyrolys av vätska vilket leder till en högre effektutveckling, men en ökning på 40-67 % i peak HRR anses orimligt högt för att endast komma från en snabbare uppvärmning.

Även om mätningarna för isoleringen är bristfälliga anses det ej påverka resultatet för arbetet negativt. Att undersöka effekterna för isoleringen låg inte i arbetets intresse och var främst ett sidospår som undersöktes eftersom tid och resurser fanns tillgängligt. Hade mätningarna planerats bättre hade även isoleringseffekterna varit ett ämne detta arbete kunnat presentera resultat för, men i stället blir det en aspekt som lämnas vidare att studeras i framtida undersökningar.

6.3 Svar till frågeställning

Resultaten som erhållits i detta arbete är en sorts sanning med modifikation. Storleken av bränder som använts är sannolik att förekomma i verkligheten, och även i större och mindre format. Det är naturen av en brinnande vätska. Men huruvida hela testuppställningen med en kammare med begränsad volym och manipulerat lufttillflöde är representativt för samtliga ORS-installationer går ej att fastställa. Varje installation av denna sorts brandskydd är unikt till varje fall, vilket också är varför frånvaron av tydliga standarder finns än idag. Hur detta examensarbete förhåller sig till verkligheten går att likna med många brandtester som görs runtom i forskningsvärlden. Det är sällan hela hus bränns ner för att undersöka hur branden beter sig i olika situationer. Vanligare är att modellera ner branden till hanterbar storlek och sedan hitta samband som kan hjälpa till att förutse hur större bränder beter sig. Detta är precis vad examensarbetet syftat till att göra, att skapa resultat som kan indikera hur större vätskebränder beter sig när storleken ökas i syrenedsatt miljö. Resultaten som erhålls från sådana försök i mindre skala är ej en 1:1 representation av hur större bränder beter sig utanför labbmiljön, men det ger bra riktlinjer att förhålla sig till. I verkligheten där bränder inte är under lika kontrollerade förhållanden blir det svårare att förutspå beteendet. Det är dessutom svårt att undersöka alla vitala variabler i ett fullskaligt brandförsök, var modellskalade bränder kommer väl till hands.

Rapportens frågeställning från inledningen löd som följande:

1. Hur påverkas mediumskalade heptan- och metanolbränders brandegenskaper av att man sänker syrekonzentrationen från 21 % till 15 %?
2. Hur påverkas mediumskalade heptan- och metanolbränders brandegenskaper av att man skalar ner diametern på branden i syrereducerad miljö på 15 % X_{O_2} ?
3. Kan hypoxic air ensamt utgöra ett tillfredsställande brandskyddssystem vid lagring och användning av heptan och metanol?

Här i slutet av rapporten kan dessa frågor besvaras:

1. Vätskebränderna ser en reduktion i följande brandegenskaper: HRR, peak HRR, HRRPUA, flamhöjd och avgiven temperatur. För heptan var minskningen mellan 30-

40 %. För metanol var minskningen mellan 20-40 %. Ingen förändring i CO/CO₂-produktion observerades för någon av vätskorna.

2. Vätskebränderna såg en reduktion i samma brandegenskaper som nämnda ovan. När en brand redan i en syrenedsatt miljö på 15 % X_{O₂} skalas ner är däremot den reducerande effekten av ORS lägre än om en brands kärstorlek skalas i 21 % X_{O₂}.
3. Hypoxic air i ett ORS kan ej vid 15 % X_{O₂} förebygga brand från att uppstå i heptan och metanol, då båda vätskorna har ett LOC under 15 % och fortfarande kan brinna. Det har en hämmande och retarderande effekt på brandens effektutveckling, tillväxt- och spridningsmöjligheter och dessa hämmande effekter tycks vara starkare för större bränder än små. Med dagens begränsningar på en lägsta syrenivå på 15 % X_{O₂} anses dock ORS inte kunna utgöra ett tillfredsställande brandskyddssystem vid lagring av heptan och metanol, då risk för brand, spridning och höga effekter kvarstår.

7 Förslag på fortsatta studier

Några intressanta observationer har gjorts i detta examensarbete som kan behöva vidare studier för att bekräftas; dessa är följande:

- Har olika kärlstorlek olika antändlighet- och brännbarhetsmöjligheter vid nedsatt X_{O_2} gentemot naturlig luft, samt vad det i så fall kan bero på?
- Hur förändras vätskebränders MLR vid olika kärlstorlekar i nedsatt X_{O_2} ?
- Finns det något samband att hitta mellan effektutveckling, kärlstorlek och nedsatt X_{O_2} ? Finns det ett "optimalt" storleksspann där ORS funkar bäst och har störst reducerande effekt av brandeffekter?
- Har vätskor med olika sothalt och färg i flammen (därmed olika stark strålning) annorlunda förmåga att värma upp kärlet?
- Hur påverkas kärlets uppvärmning när man använder isolering? Påverkar isoleringen brandeffekterna?

8 Slutsats

Nedan två tabeller sammanställer de summerade resultaten som presenterades tidigare för peak HRRPUA, flammhöjd och temperatur. Det som kan ses i tabell 11 är att den större av kärldiameterna såg en kraftigare sänkning av brandeffekter än den lilla storleken när X_{O_2} sänktes. ORS har alltså en starkare hämmande effekt när pölstorleken på branden är större. Det går även att utläsa att ORS gav en större procentuell minskning på samtliga brandeffekter för heptan än metanol.

Tabell 11. Visar med hur stor andel (%) eller temperatur (°C) brandegenskaperna minskades när X_{O_2} sänktes från 21 % till 15 %. Grön färg indikerar det högsta värdet i den mätta egenskapen.

Sänkt X_{O_2}	Heptan			Metanol		
	Peak HRRPUA	Flammhöjd	Temperatur	Peak HRRPUA	Flammhöjd	Temperatur
0,20 m	33 %	43 %	90 °C	24 %	38 %	30 °C
0,15 m	30 %	33 %	35 °C	18 %	33 %	15 °C

Tabell 12 undertill visar skalningseffekterna för pölbränderna när de för en given syrekonzentration fick kärldiametern reducerad. Här observeras en större procentuell minskning för samtliga brandeffekter när kärldiametern minskades i 21 % syrekonzentration än i 15 %. Detta betyder alltså att när brandens pöldiameter minskas i vanlig atmosfär är brandeffekternas reduktion större än om samma minskning gjorts i ORS. Detta indikerar återigen att ORS har högre effektivitet när det används på större bränder.

Tabell 12. Visar med hur stor andel (%) eller temperatur (°C) brandegenskaperna minskades när kärldiameter sänktes till 0,15 m. Grön färg indikerar det högsta värdet i den mätta enheten.

Sänkt kärldiameter	Heptan			Metanol		
	Peak HRRPUA	Flammhöjd	Temperatur	Peak HRRPUA	Flammhöjd	Temperatur
X_{O_2}						
21 %	17 %	14 %	125 °C	11 %	25 %	50 °C
15 %	13 %	0 %	70 °C	3 %	20 %	35 °C

Referenser

- Blinov, V.I., Khudyakov, G.N. (1961). *Diffusion burning of liquids*. US Army Engineer Research And Development Laboratories. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0296762.pdf>
- Boon-Ying, L. (u.å). *Why is candlelight yellow and gas-grill light blue?*. Hong Kong Observatory. <https://www.hko.gov.hk/en/education/earth-science/optical-phenomena/00354-why-is-candlelight-yellow-and-gasgrill-light-blue.html>
- Boverkets föreskrifter om ändring i verkets byggregler (2011:6) – föreskrifter och allmänna råd. (BFS 2011:26) Boverkets Författningssamling. <https://brandskyddskanalen.se/pdf/BBR19.pdf>
- Chen, Y., Fang, J., Zhang, X., Miao, Y., Lin, Y., Tu, R., & Hu, L. (2023). Pool fire dynamics: Principles, models and recent advances. *Elsevier Ltd*. DOI: 10.1016/j.pecs.2022.101070
- Chiti, S. (2010). *Test Methods for Hypoxic Air Fire Prevention Systems and Overall Environmental Impact of Applications*.
- Chiti, S. (2014). *A pilot study on hypoxic air performance in fire prevention*. *Fire Technology*, 51(2), 393–407. <https://doi.org/10.1007/s10694-014-0393-6>
- Drysdale, D. (2011). *An introduction to Fire Dynamics* (3 uppl.). John Wiley & Sons, Ltd. DOI 10.1002/9781119975465
- Hersner, M. & Nilsson, C. (2021). *Brandfarliga vätskor i syrereducerade miljöer*. [Examensarbete, Lunds Tekniska universitet]. Lund University Publications. <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9037114>
- Jensen, G., & Holmberg, J. G. (2006). *Hypoxic air venting for protection of heritage*.
- Karlsson, B., & Quintiere, J. (1999). *Enclosure Fire Dynamics* (1st ed.). CRC Press. DOI: 10.1201/9781420050219
- Klassen, M. & Gore, J.P. (1994). *Structure and radiation properties of pool fires*. National Institute of Standards and Technology. <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB94193802.xhtml>
- Kuchta, J.M. (1985). *Investigation of Fire and Explosion Accidents in the Chemical, Mining, and Fuel-Related Industries-A Manual* https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc12822/m2/1/high_res_d/Bulletin0680.pdf
- Li, M., Shu, Z., Chen, B., & Wang, C. (2020). Experimental study of temperature profile and gas-liquid heat transfer in flame spread over jet fuel under longitudinal air flow. *Elsevier Ltd*. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116320

Lundgren, P., Backström, S., & Chiti, S. (2014). *Fire prevention through oxygen reduction at Forsmark*. Nuclear Engineering International.
<https://www.neimagazine.com/features/featurefire-prevention-through-oxygen-reduction-at-forsmark-4271282/>

MacKinven, R., Hansel, J.G., & Glassman, I. (1970). *Flame spreading across liquid fuels at sub-flash point temperatures: measurements and techniques (the fuel surface tension, vapor pressure, flash point, viscosity and flame spread rate)*. Princeton University.
<https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA952005.pdf>

Hurley, M. J., Gottuk, D. T., Hall, J. R., Harada, K., Kuligowski, E. D., Puchovsky, M., Torero, J. L., Watts, J. M., & Wieczorek, C. J. (2016). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. In Springer eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>

NFPA. (2022). *Warehouse Structure Fires*
<https://www.nfpa.org/~media/Files/News%20and%20Research/Fire%20statistics%20and%20reports/Building%20and%20life%20safety/oswarehouse.ashx>

Nilsson, M., & Van Hees, P. (2014). *Advantages and challenges with using hypoxic air venting as fire protection*. Fire and Materials, 38(5), 559-575.
<https://doi.org/10.1002/fam.2197>

Scriven, R. *26% of Warehouses to be Automated by 2027*. Interact Analysis.
<https://interactanalysis.com/insight/26-of-warehouses-to-be-automated-by-2027/>

van Hees, P., Barton, J., Nilsson, M., & Meacham, B. (2018). *Review of Oxygen Reduction Systems for Warehouse Storage Applications*. Quincy: Fire Protection Research Foundation.

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 Mater., 38: 204-226. <https://doi.org/10.1002/fam.2175>

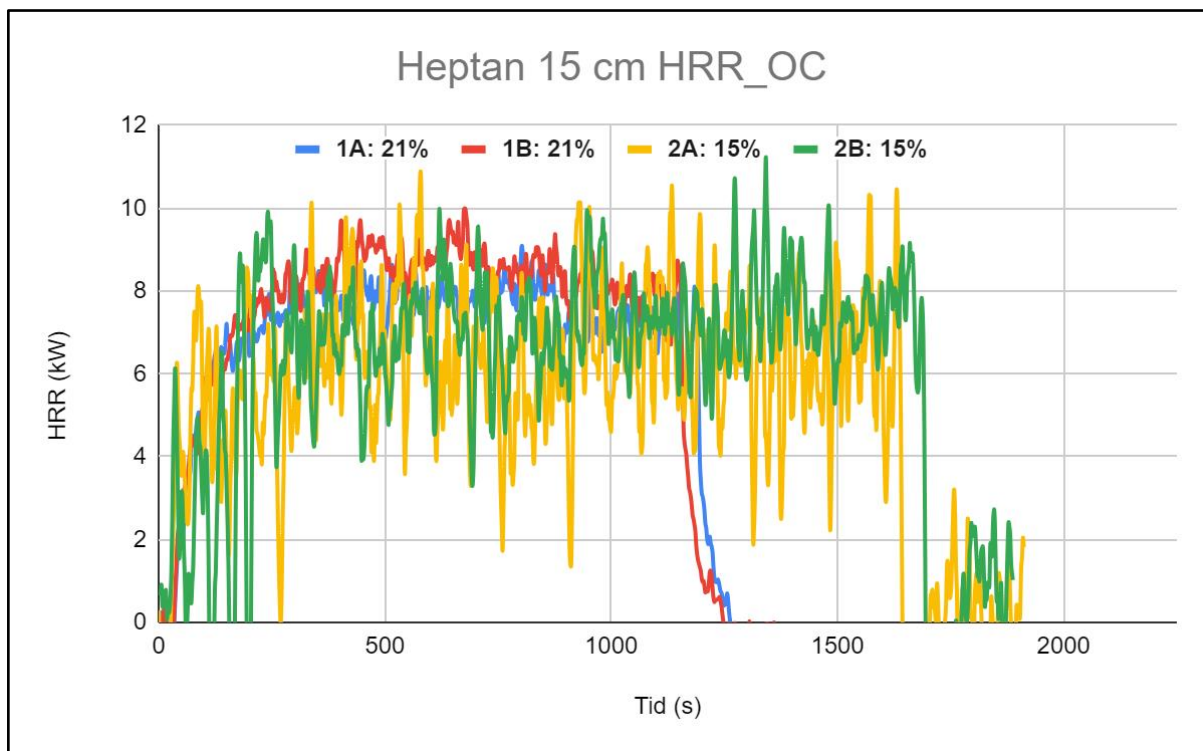
Xiong, G., Zeng, D., Panda, P.P., & Wang, Y. (2021). Laser induced incandescence measurement of soot in ethylene buoyant turbulent diffusion flames under normal and reduced oxygen concentrations. *Science Direct*. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111456

Yao, W., Hu, X., Rong, J., Wang, J., & Zhang, H. (2013). Experimental study of large-scale fire behavior under low pressure at high altitude. *Journal of Fire Sciences*. DOI: 10.1177/0734904113481326

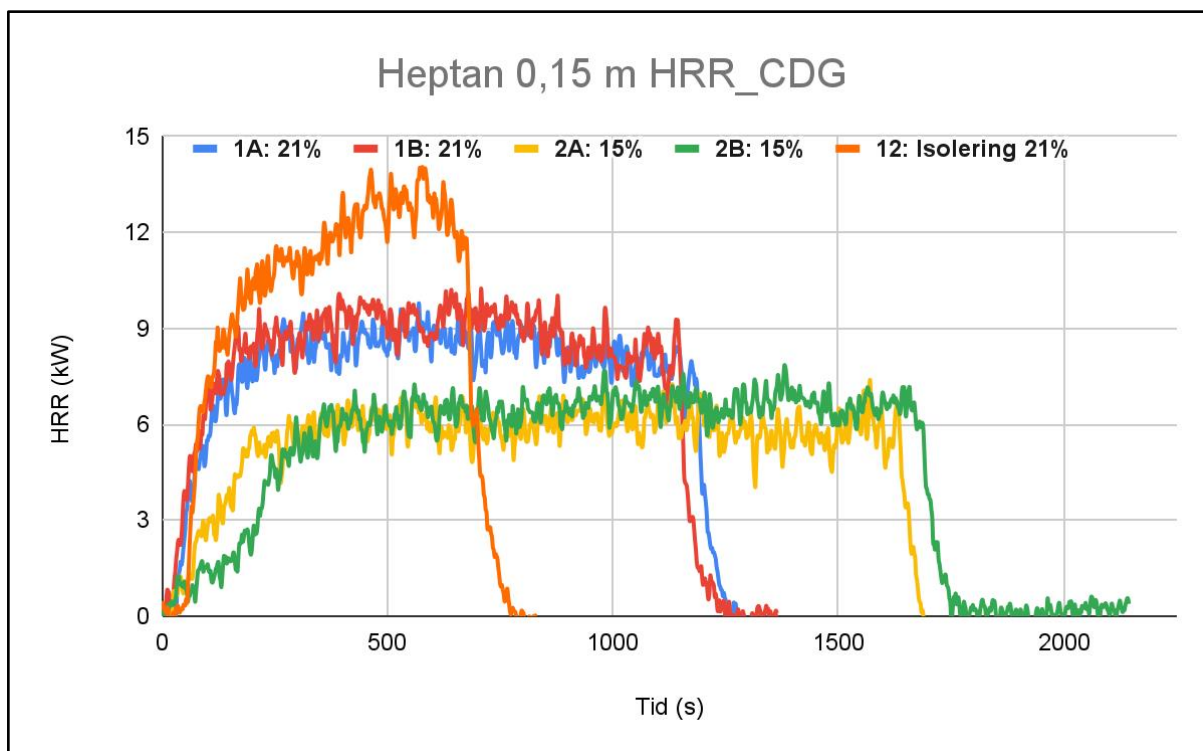
Yao, Y., Zhen, Y.L., Ingason, H., & Cheng, X. (2019). The characteristics of under-ventilated pool fires in both model and medium-scale tunnels. *Science Direct*. DOI: 10.1016/j.tust.2019.02.004

Bilaga A

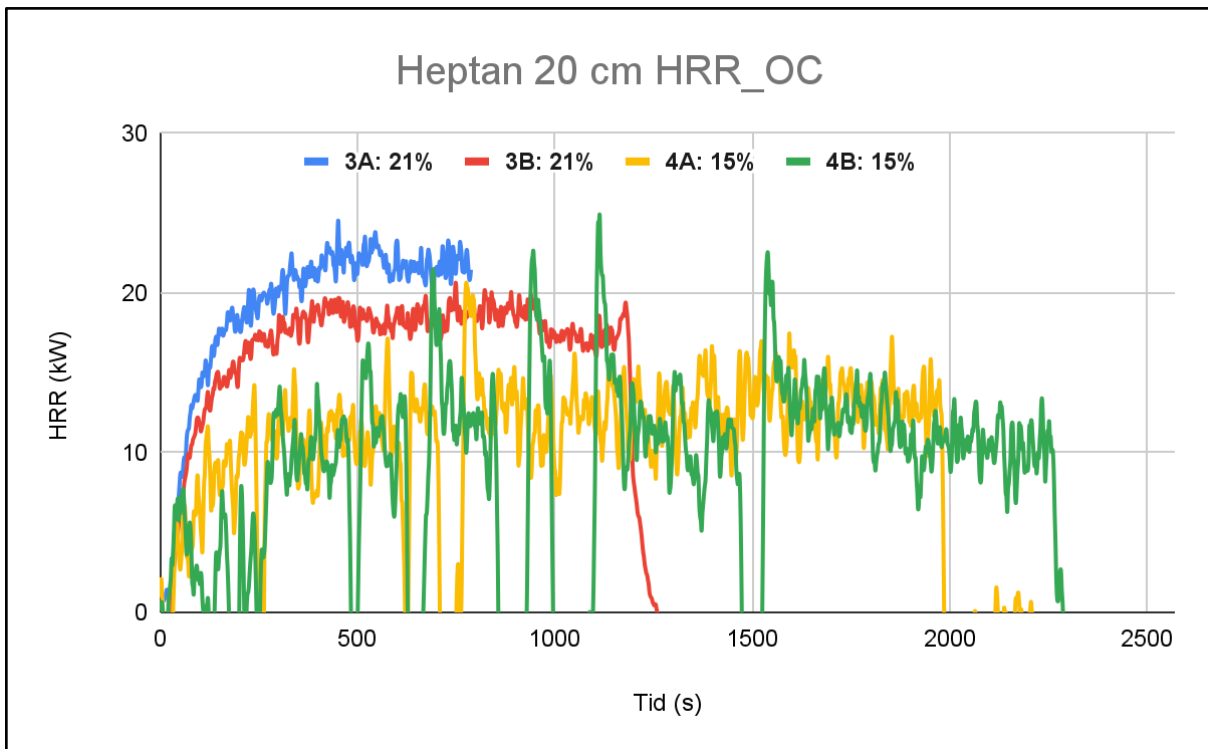
I detta avsnitt presenteras alla data som erhållits under försöken.



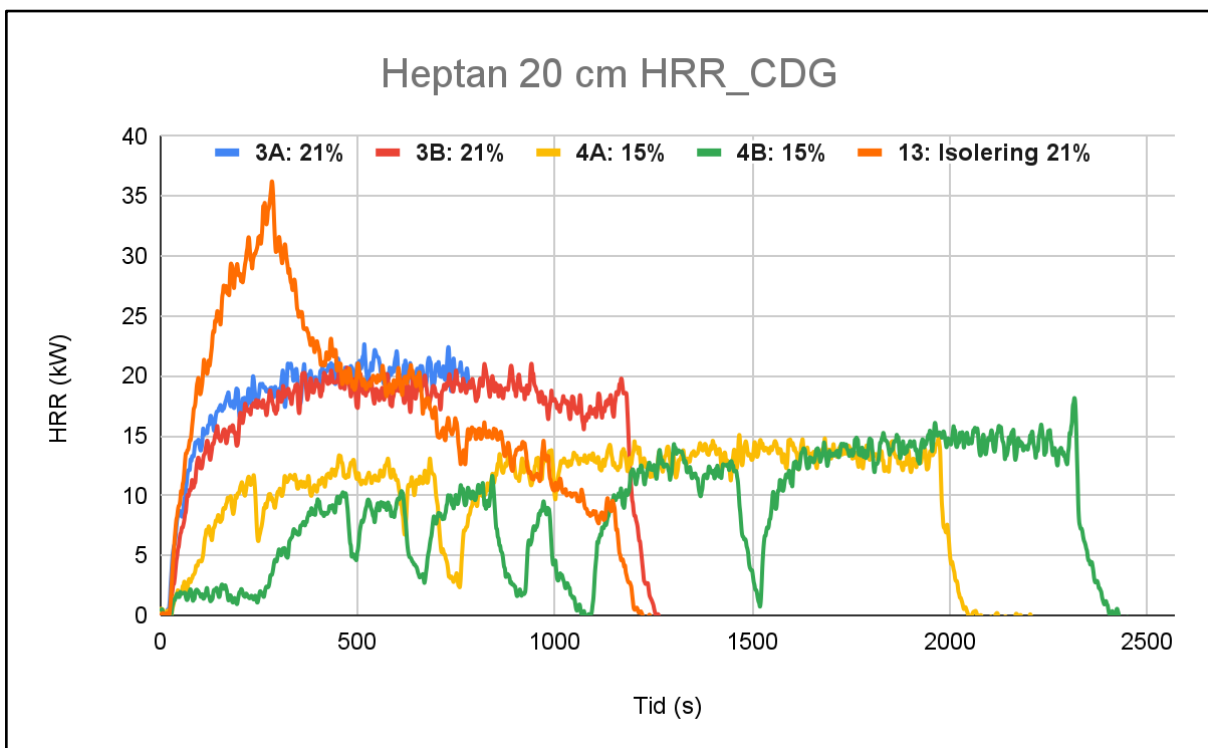
Figur 32. Effektutveckling för heptan i 15 cm kärl med varierande syrehalt i luften.



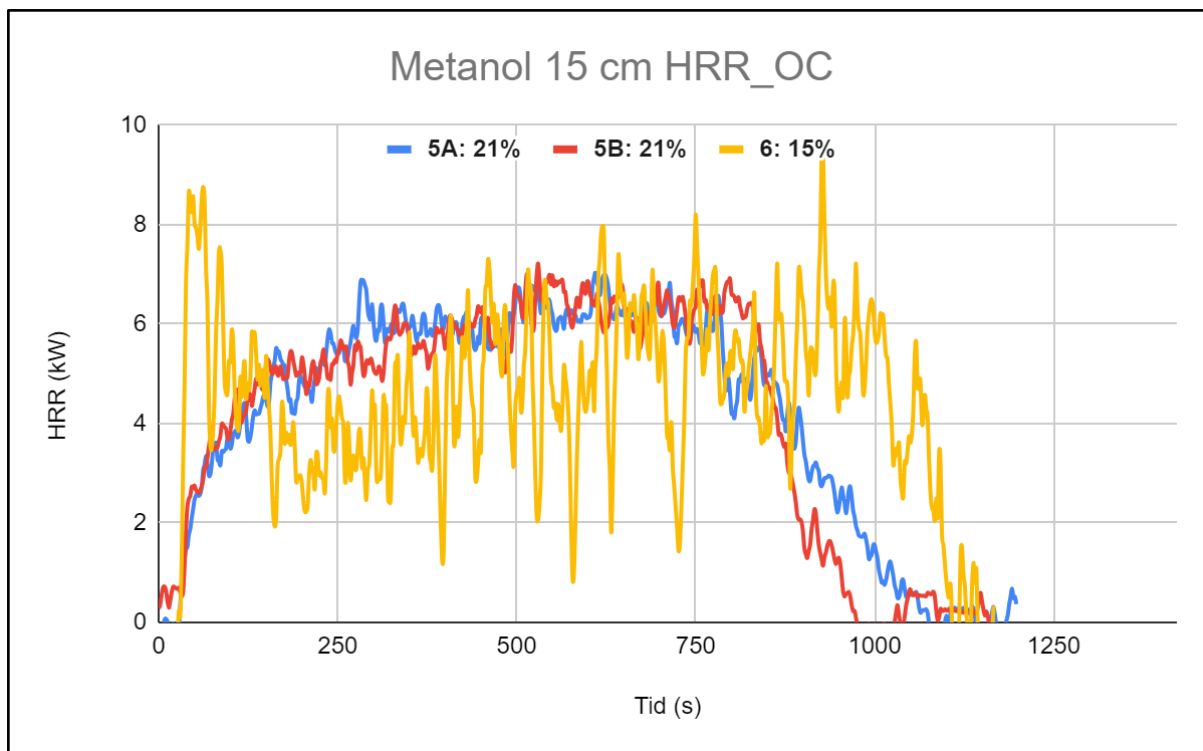
Figur 33. Effektutveckling för heptan i 15 cm kärl med varierande syrehalt i luften.



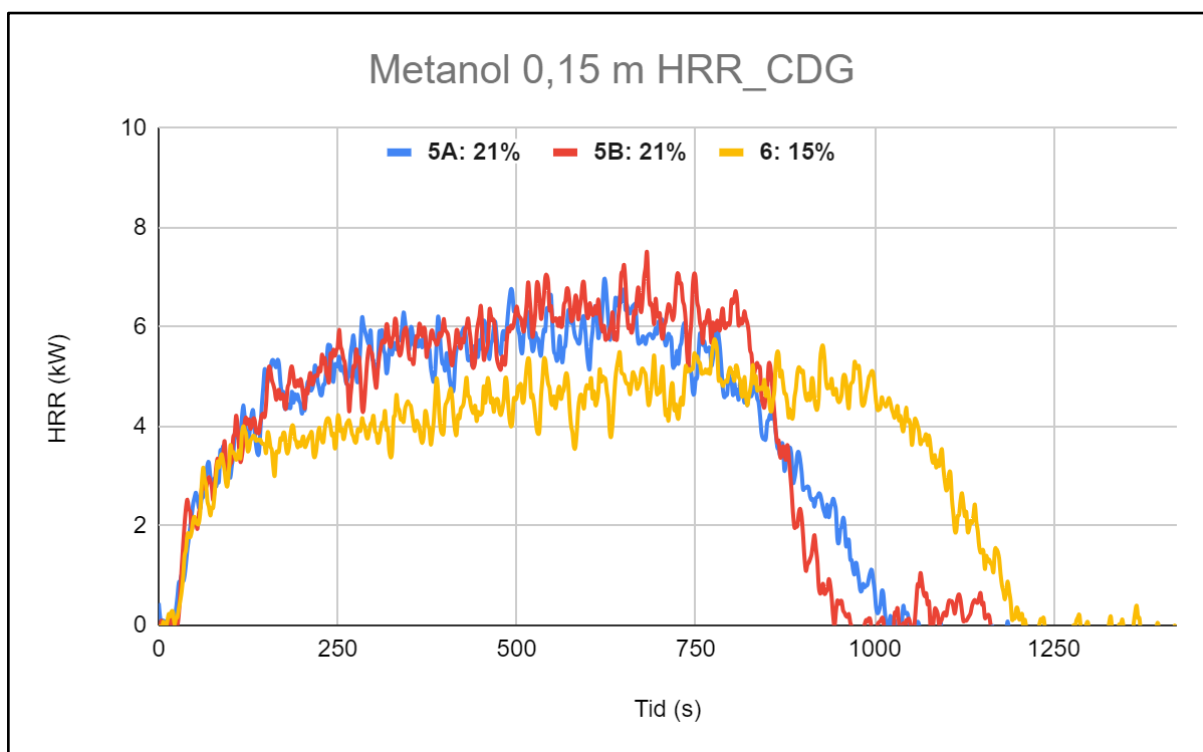
Figur 34. Effektutveckling för heptan i 20 cm kärl med varierande syrehalt i luften.



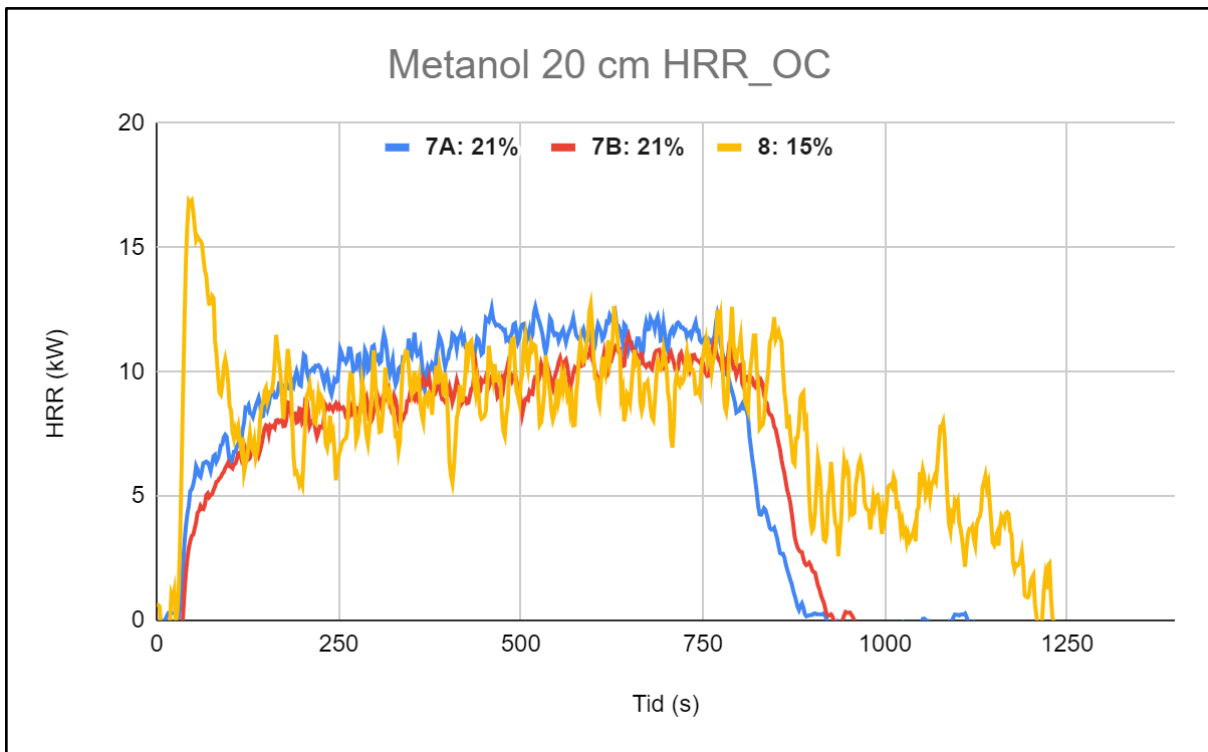
Figur 35. Effektutveckling för heptan i 20 cm kärl med varierande syrehalt i luften.



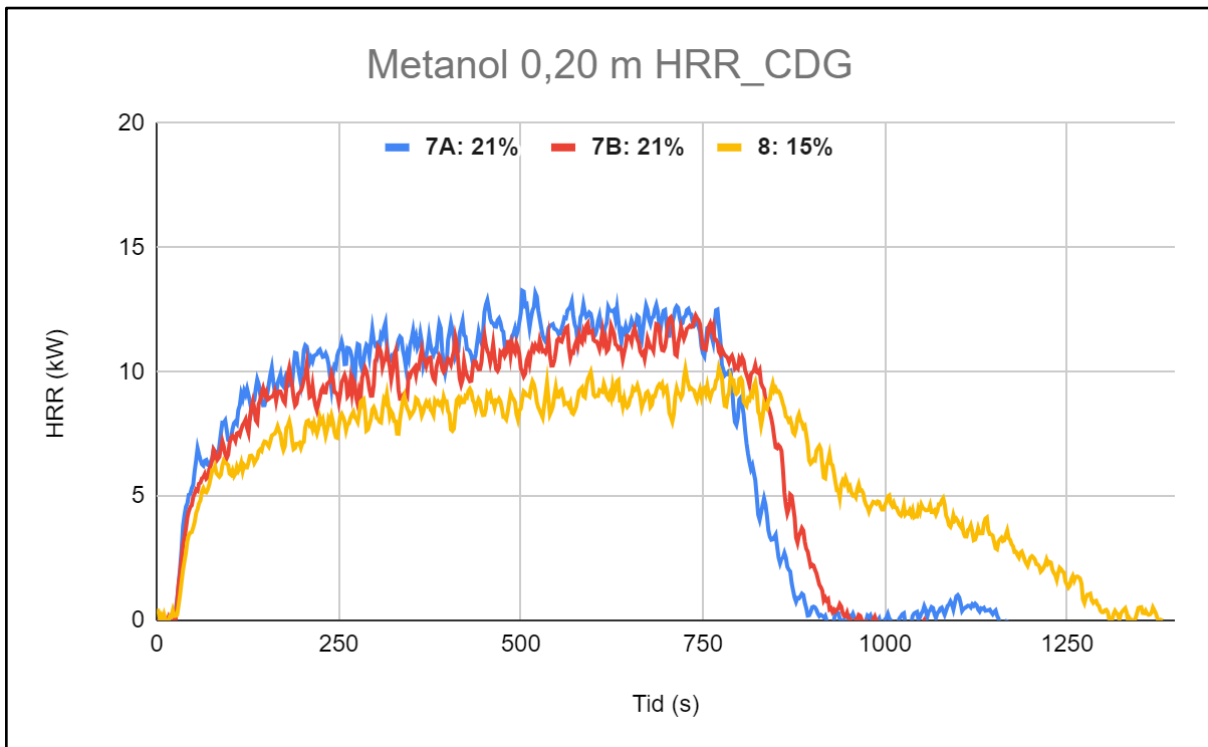
Figur 36. Effektutveckling för metanol i 15 cm kärl med varierande syrehalt i luften.



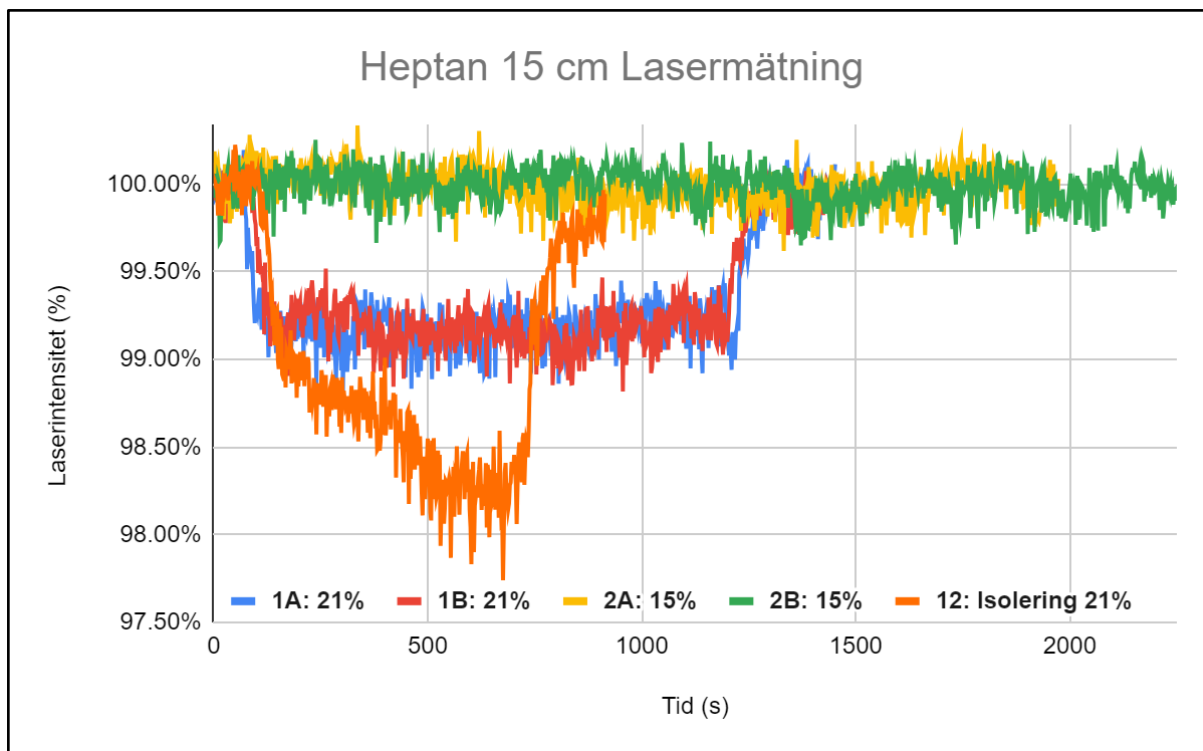
Figur 37. Effektutveckling för metanol i 15 cm kärl med varierande syrehalt i luften.



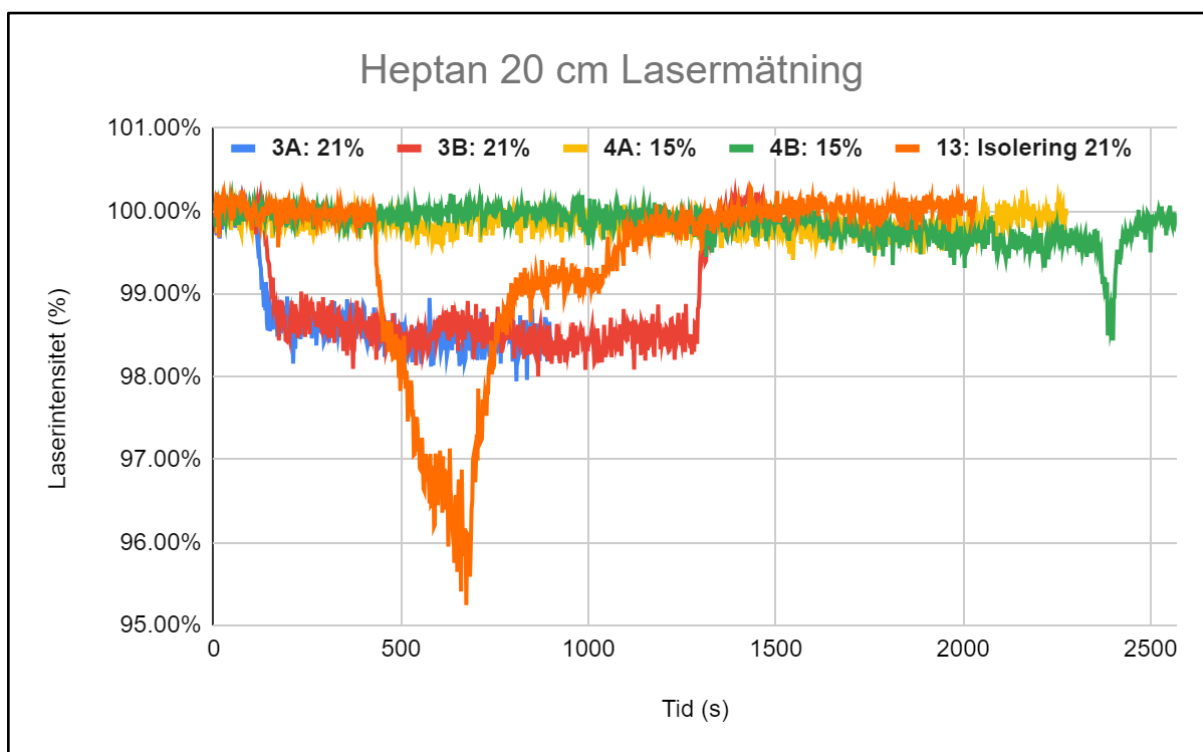
Figur 38. Effektutveckling för metanol i 20 cm kärl med varierande syrehalt i luften.



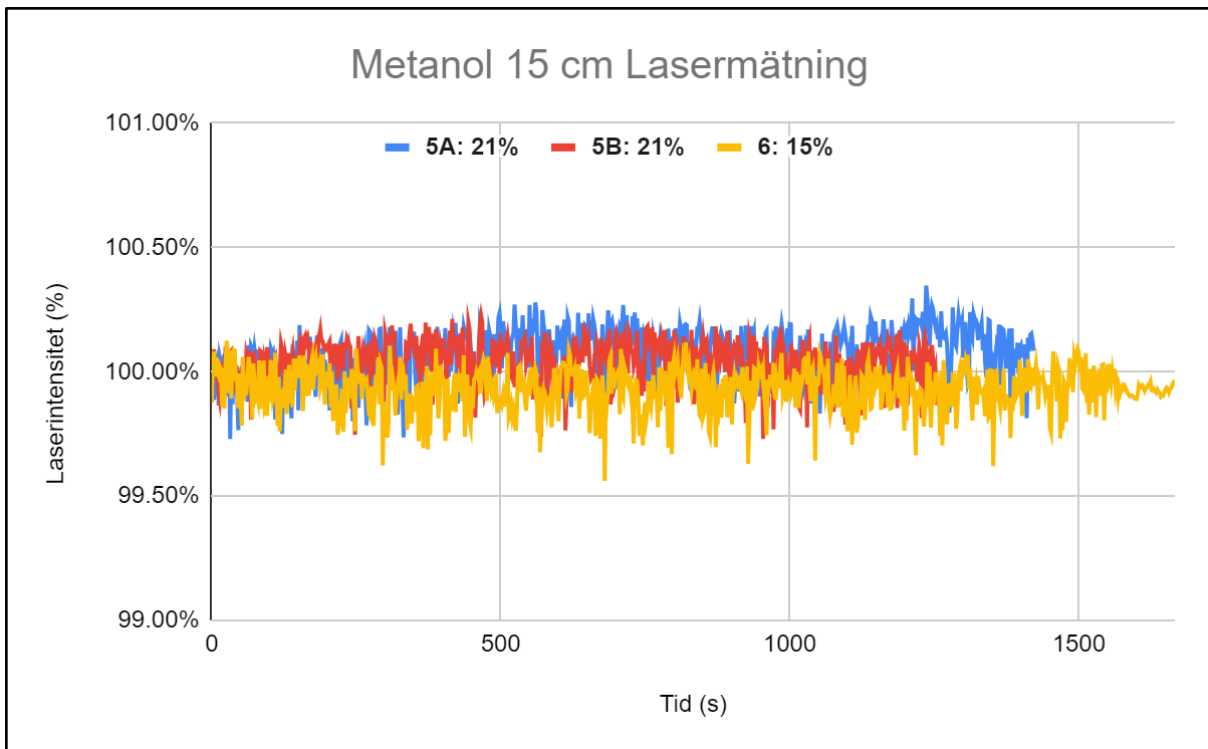
Figur 39. Effektutveckling för metanol i 20 cm kärl med varierande syrehalt i luften.



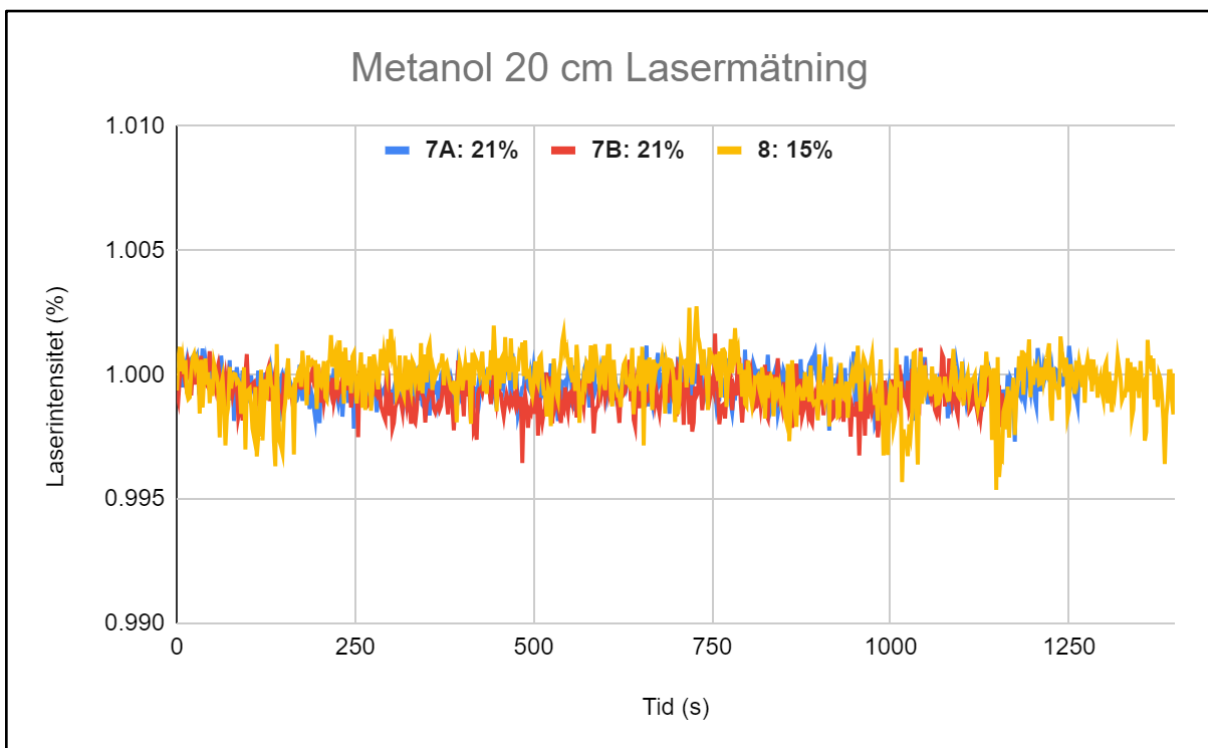
Figur 40. Laserintensitet för heptan i 0,15 m kärl vid olika syrekoncentrationer.



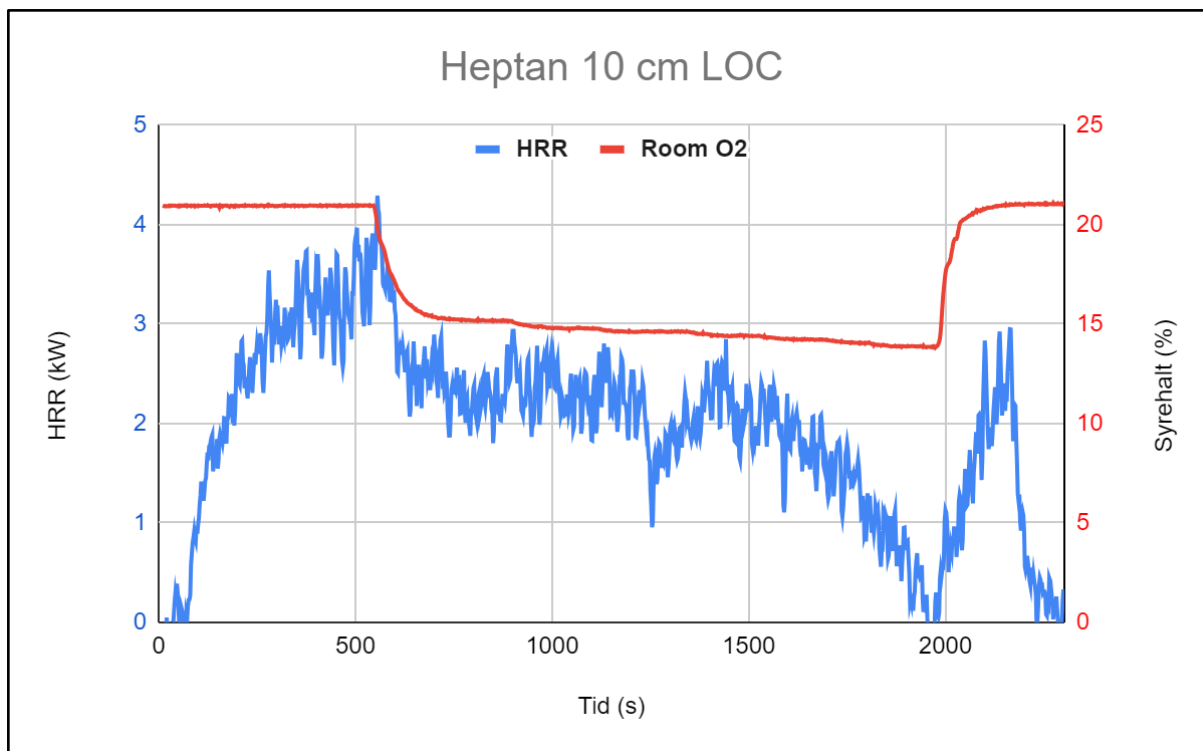
Figur 41. Laserintensitet för heptan i 0,20 m kärl vid olika syrekoncentrationer.



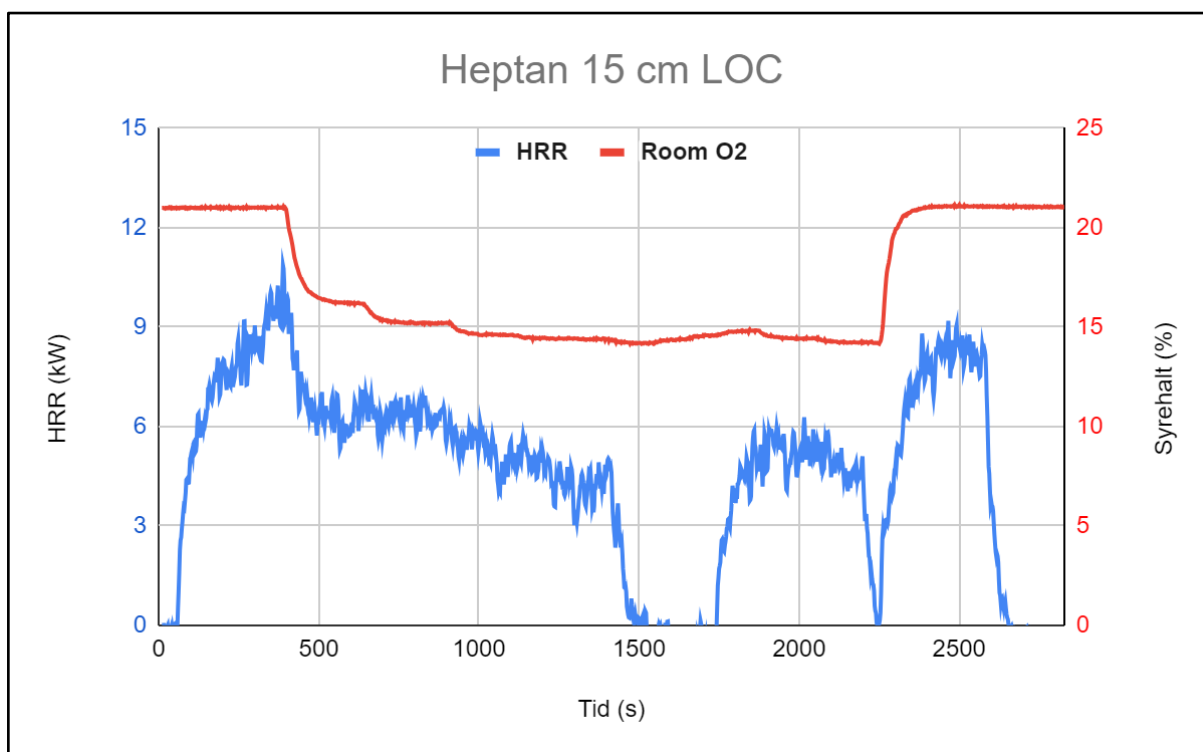
Figur 42. Laserintensitet för metanol i 0,15 m kärl vid olika syrekoncentrationer.



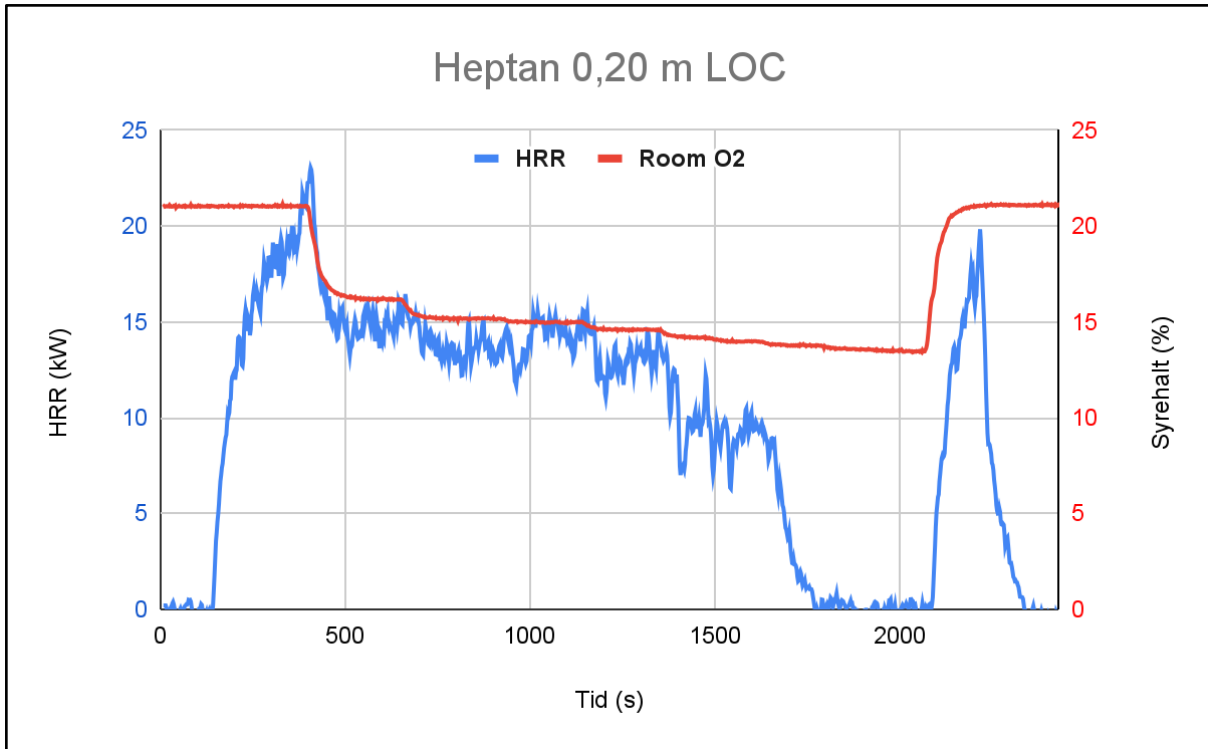
Figur 43. Laserintensitet för metanol i 0,20 m kärl vid olika syrekoncentrationer.



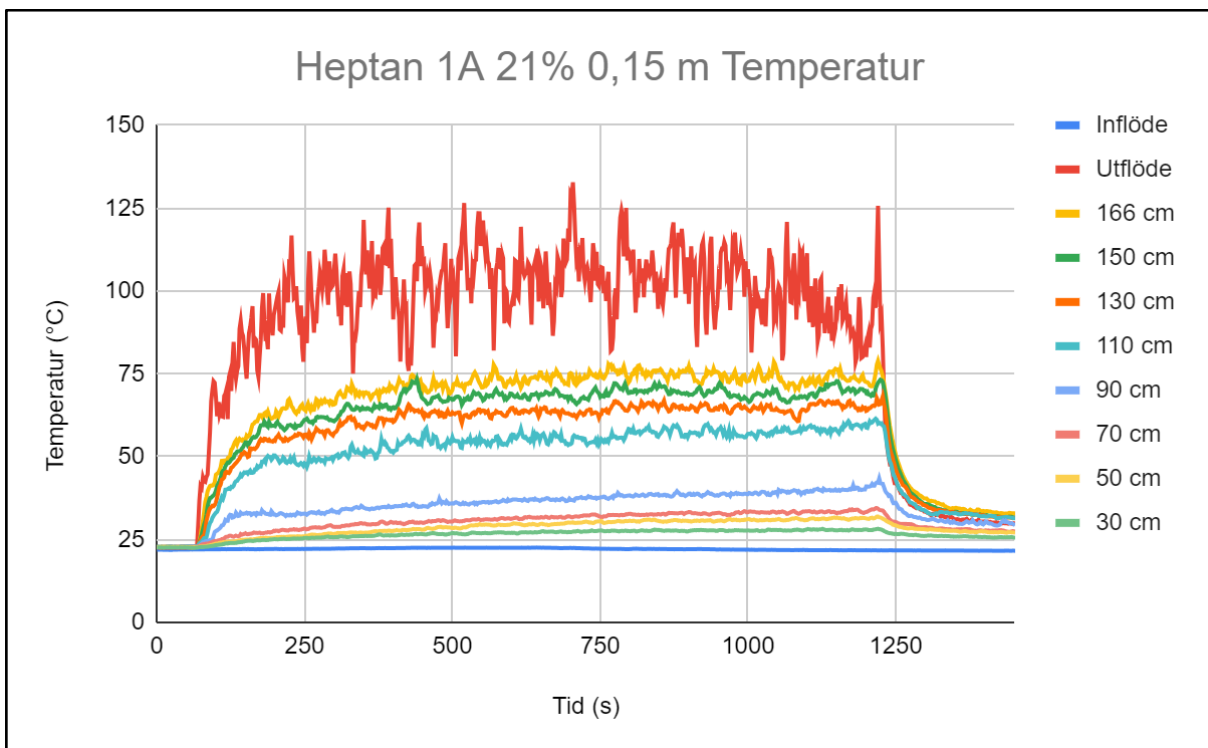
Figur 44. Effektutveckling och syrekoncentration i testkammaren under ett LOC-test.



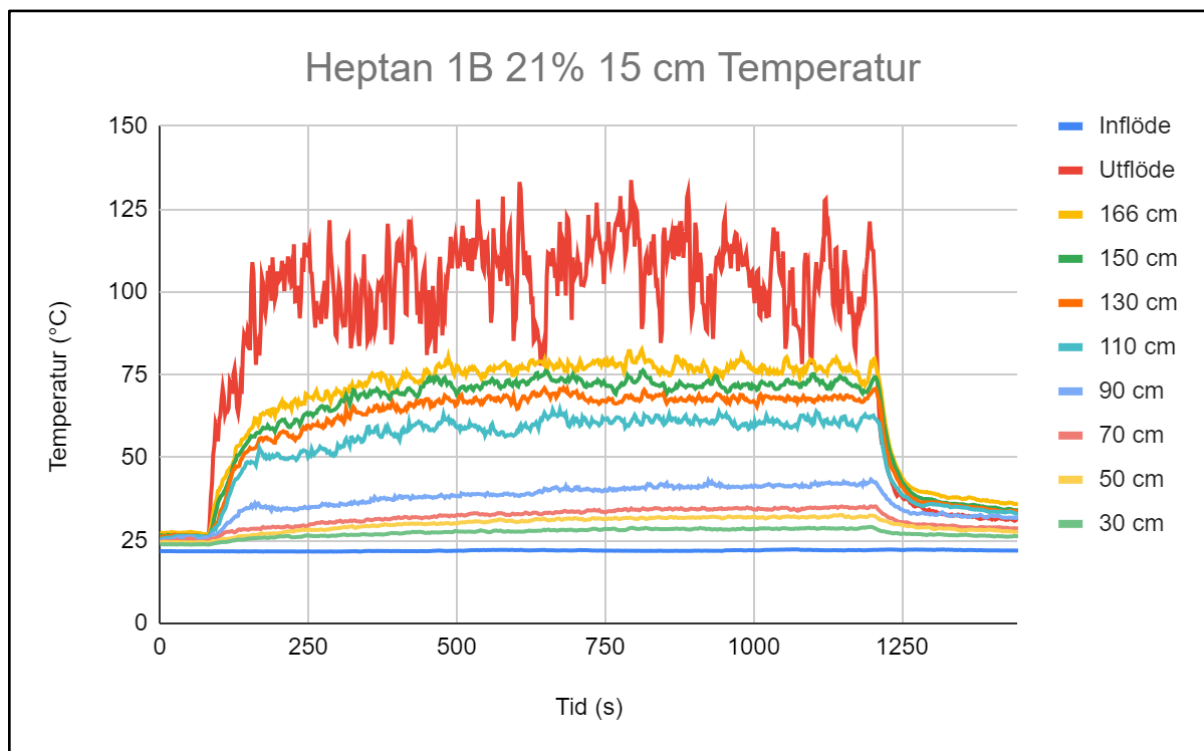
Figur 45. Effektutveckling och syrekoncentration i testkammaren under ett LOC-test.



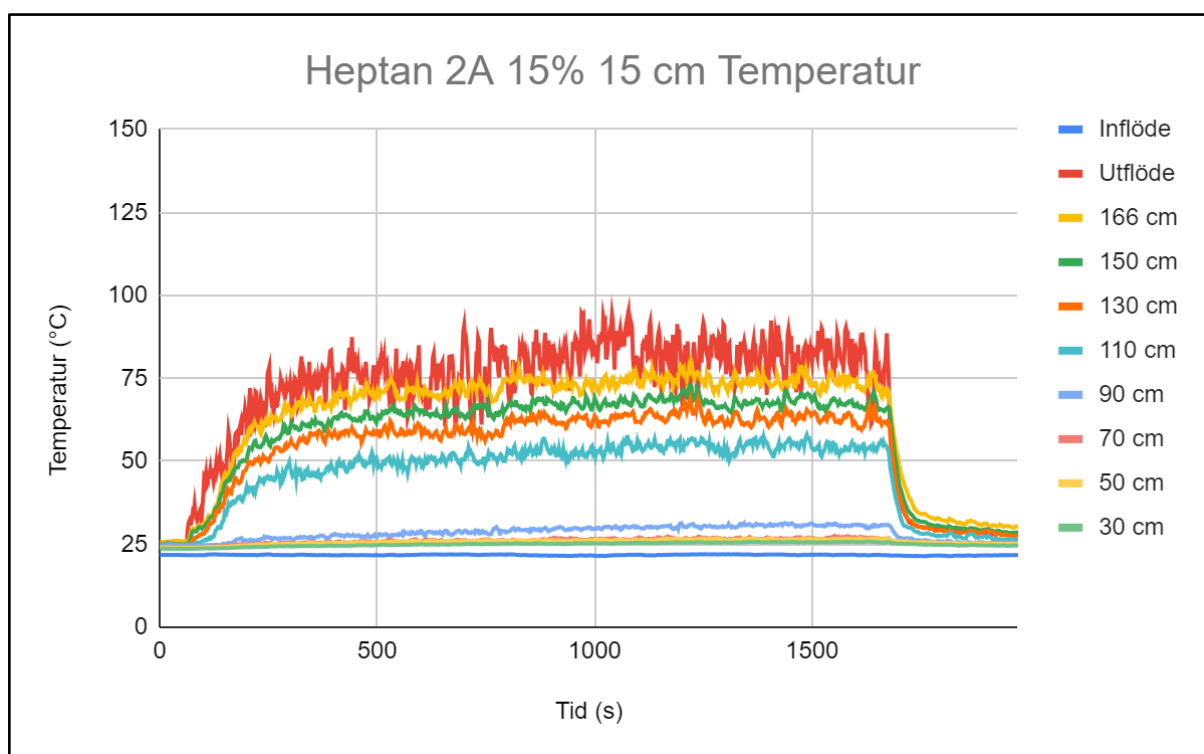
Figur 46. Effektutveckling och syrekonzentration i testkammaren under ett LOC-test.



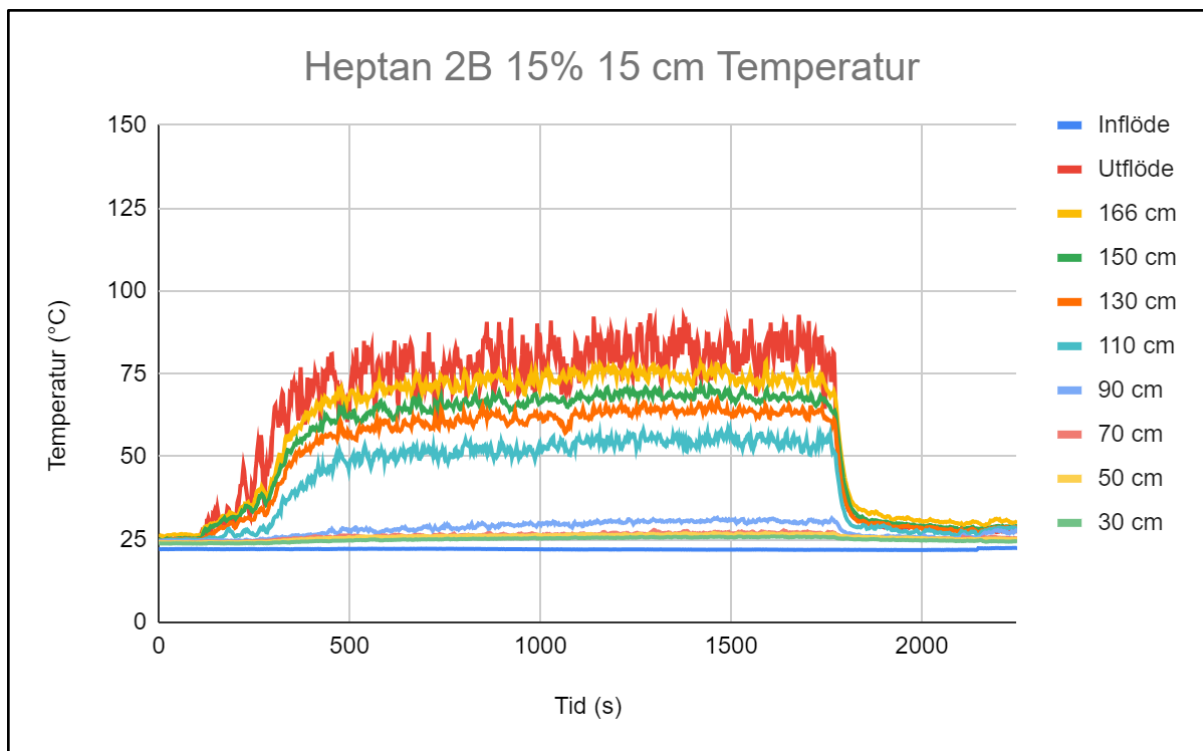
Figur 47. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.



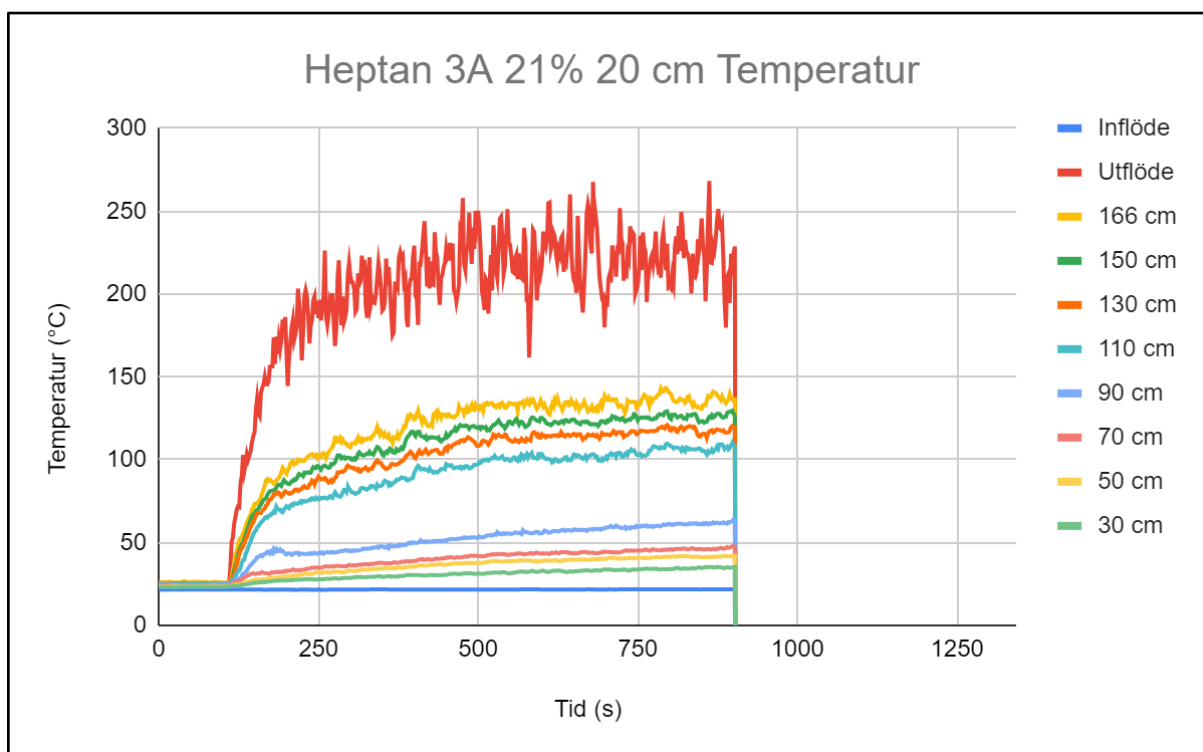
Figur 48. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.



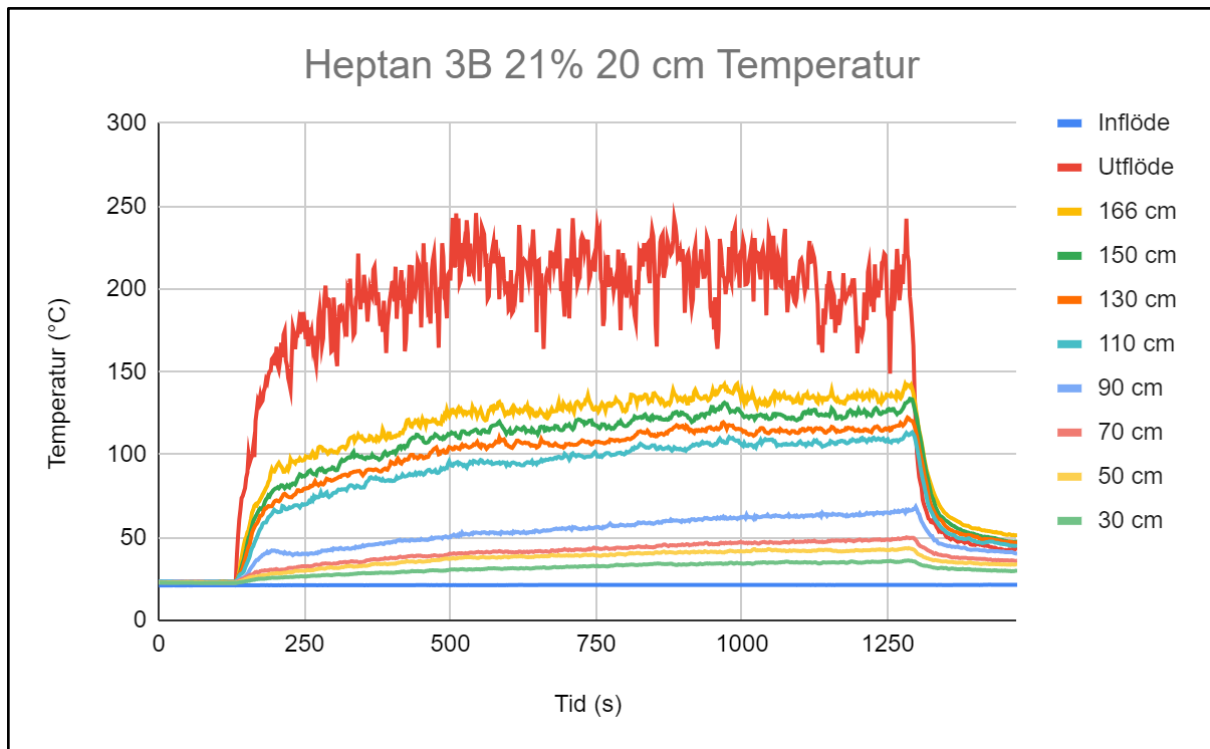
Figur 49. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.



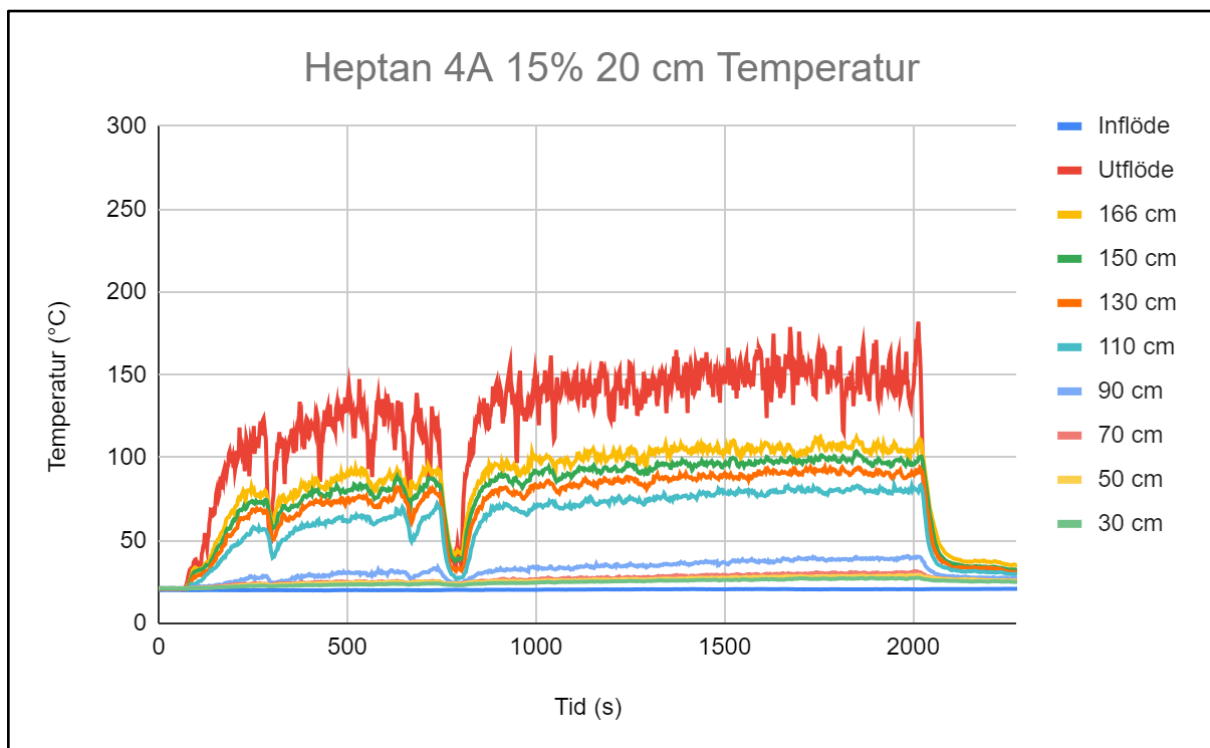
Figur 50. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.



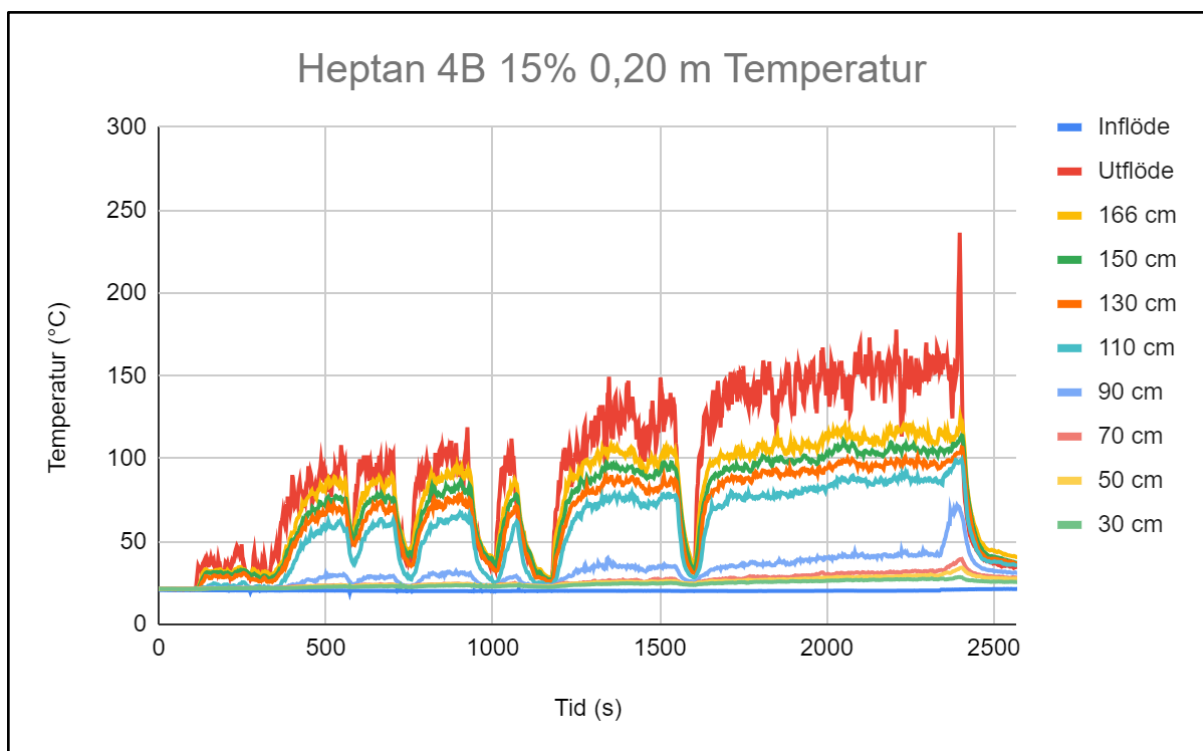
Figur 51. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.



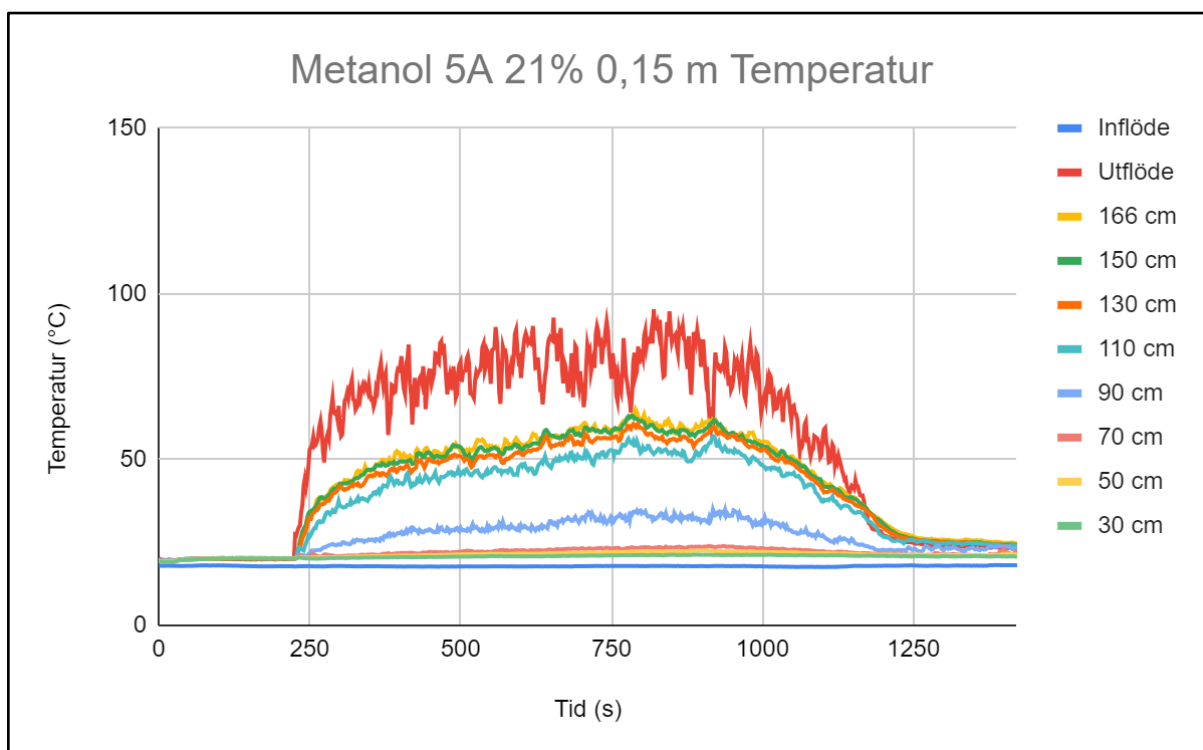
Figur 52. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.



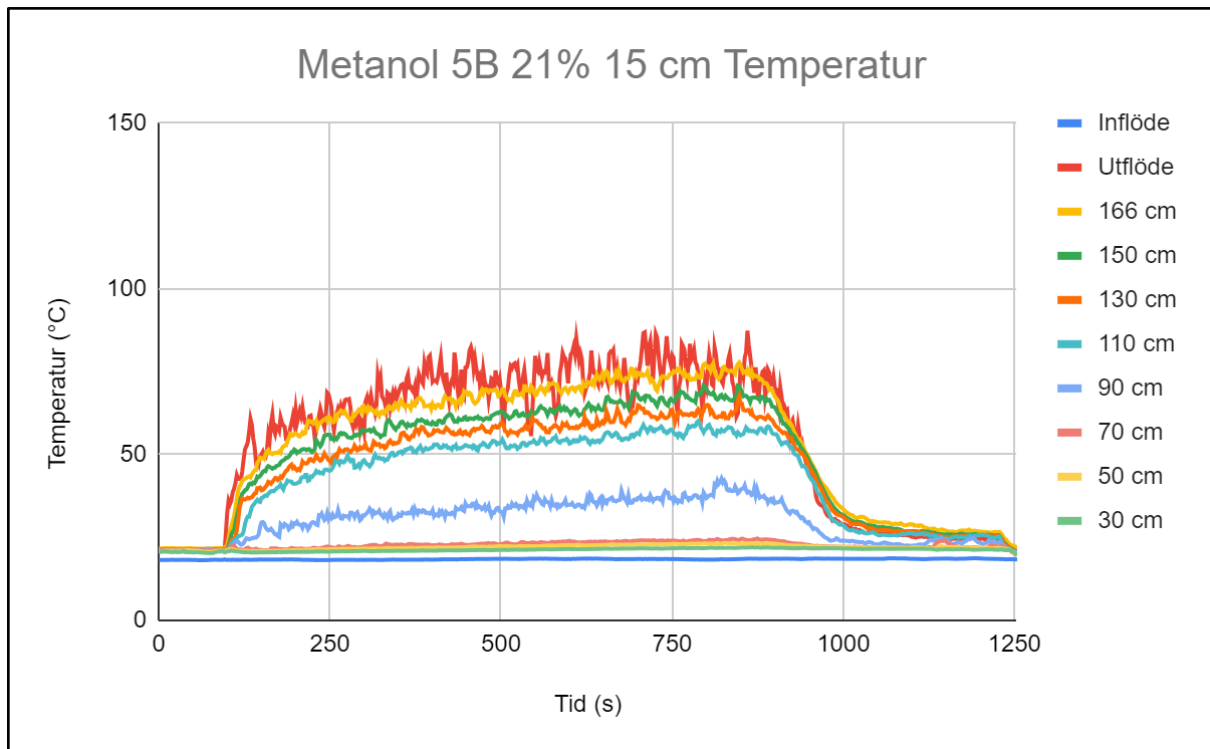
Figur 53. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.



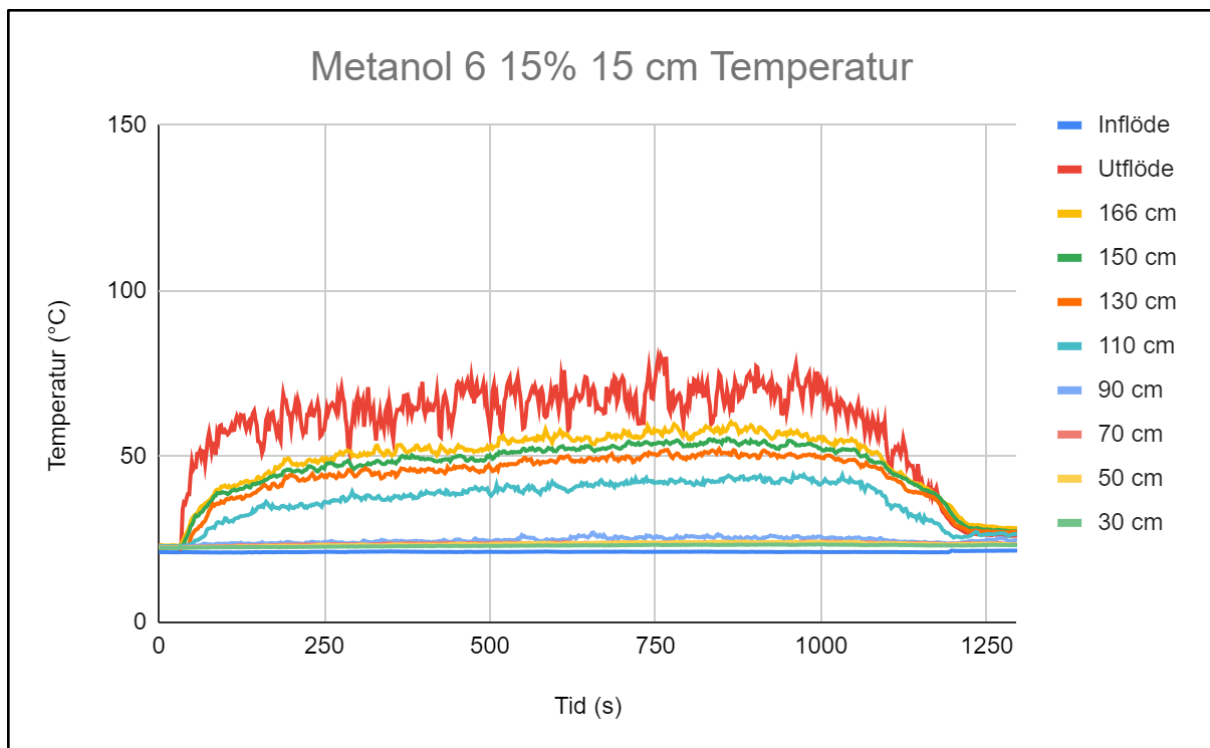
Figur 54. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.



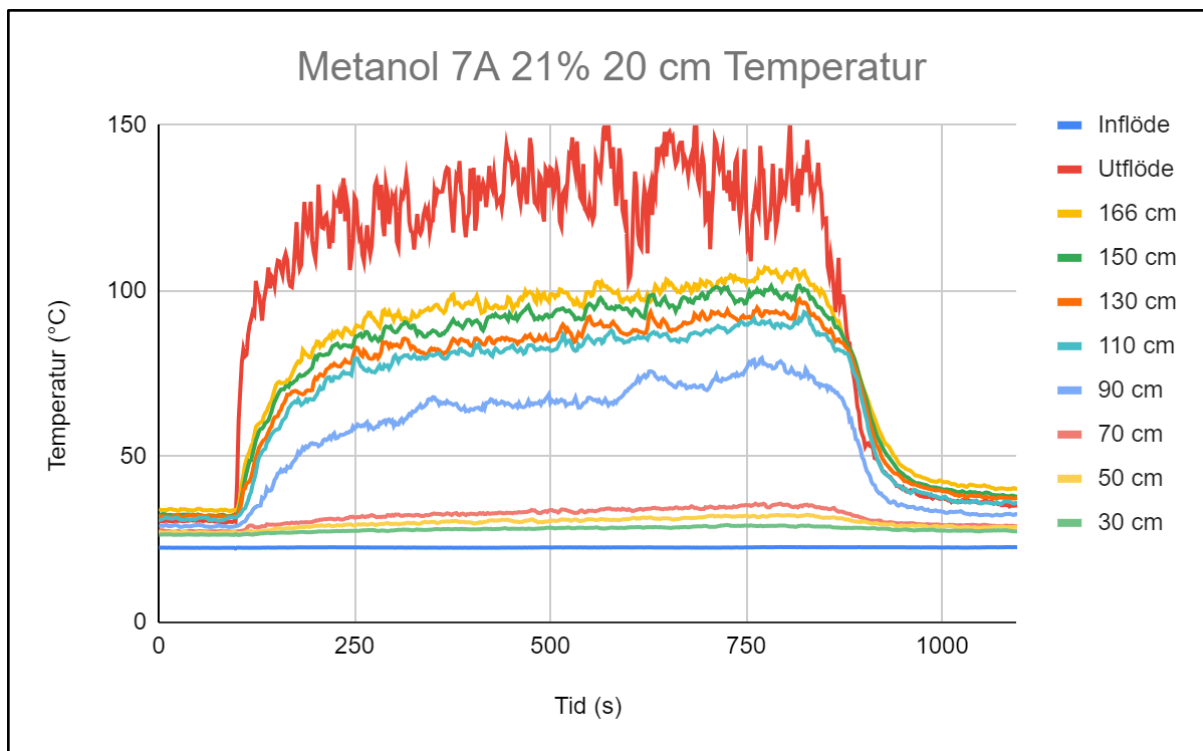
Figur 55. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.



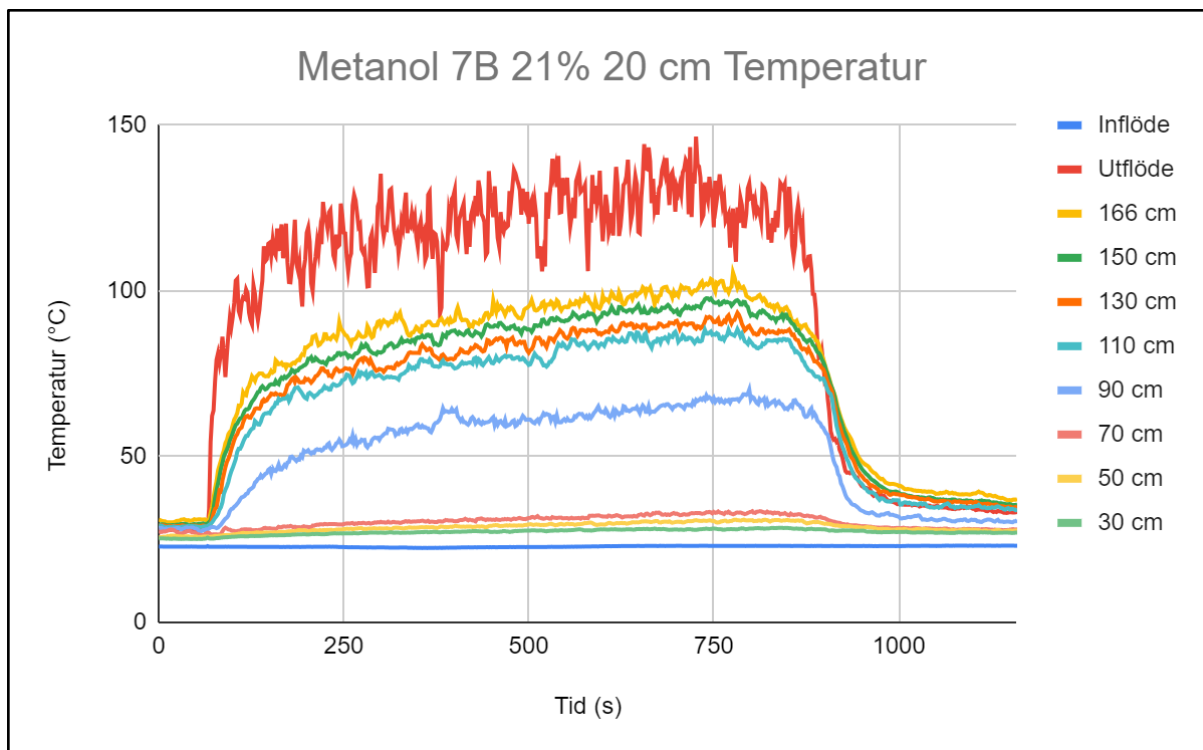
Figur 56. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.



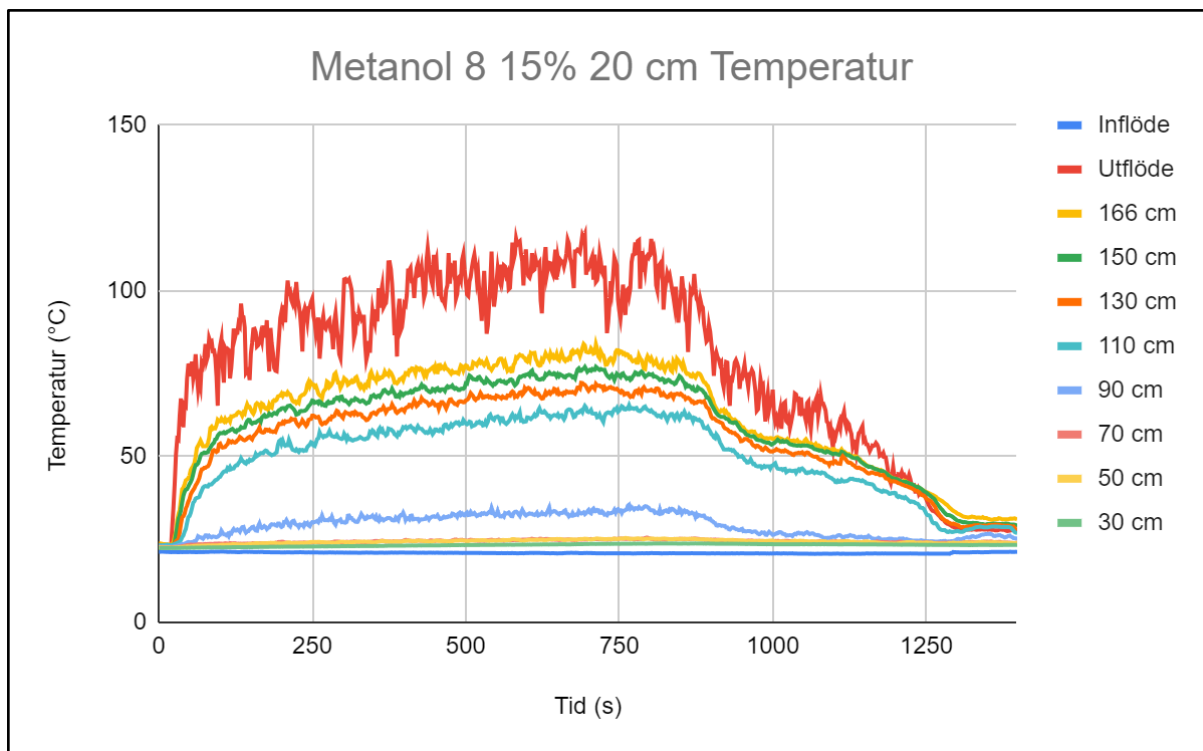
Figur 57. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.



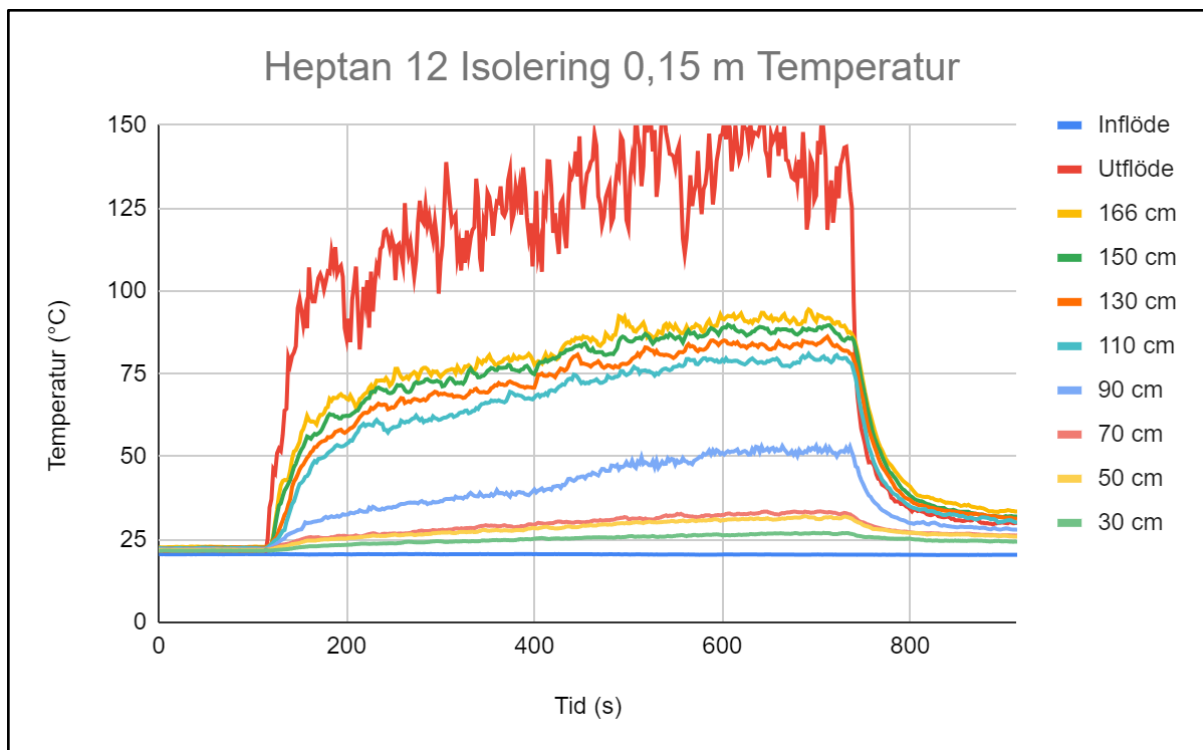
Figur 58. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.



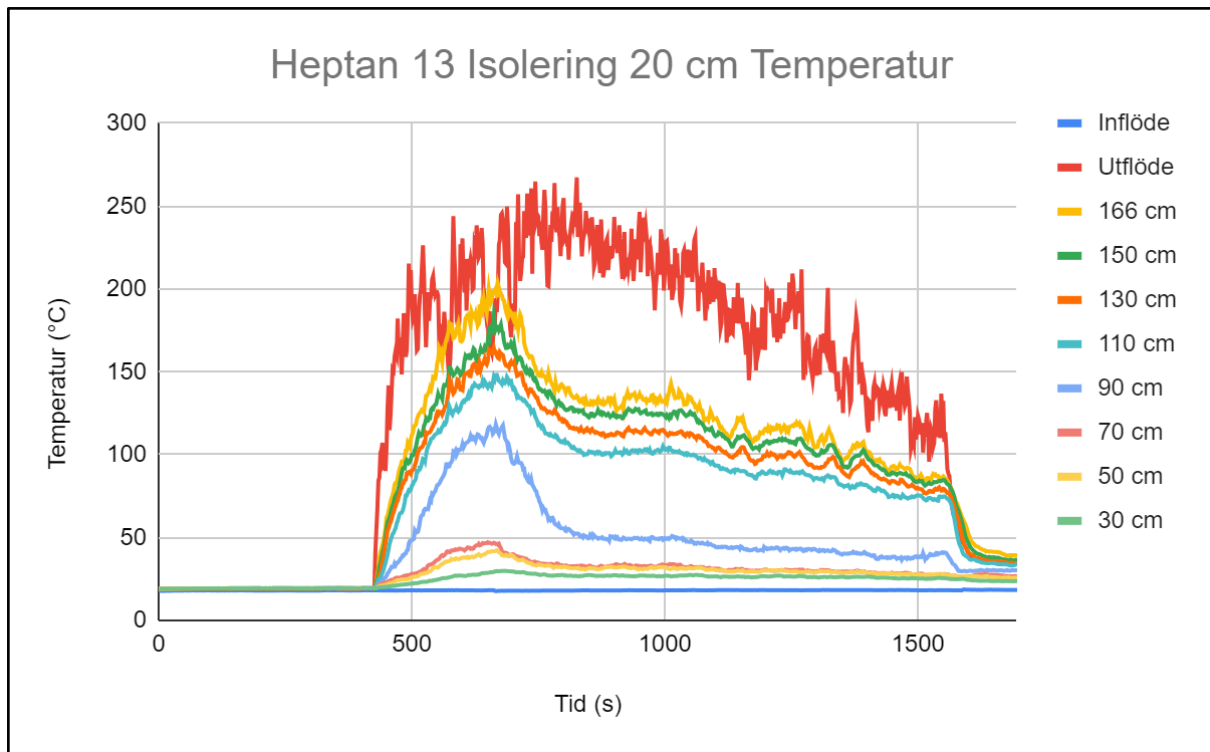
Figur 59. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.



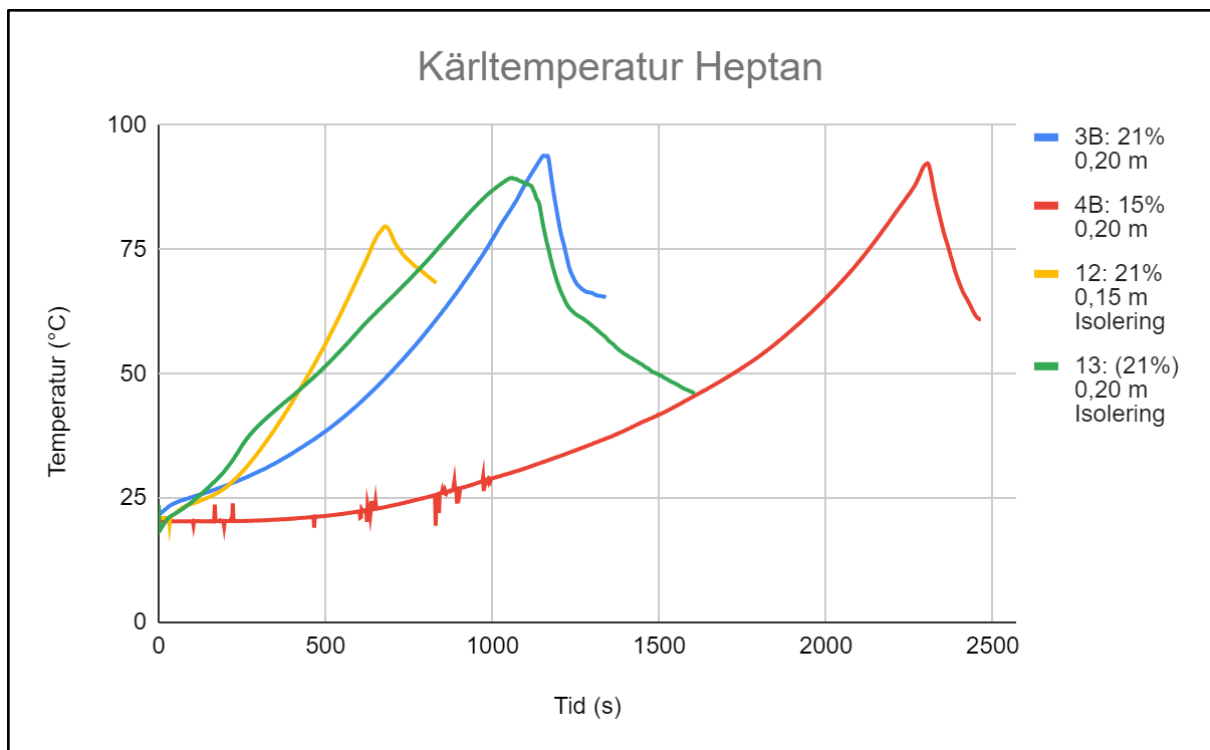
Figur 60. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.



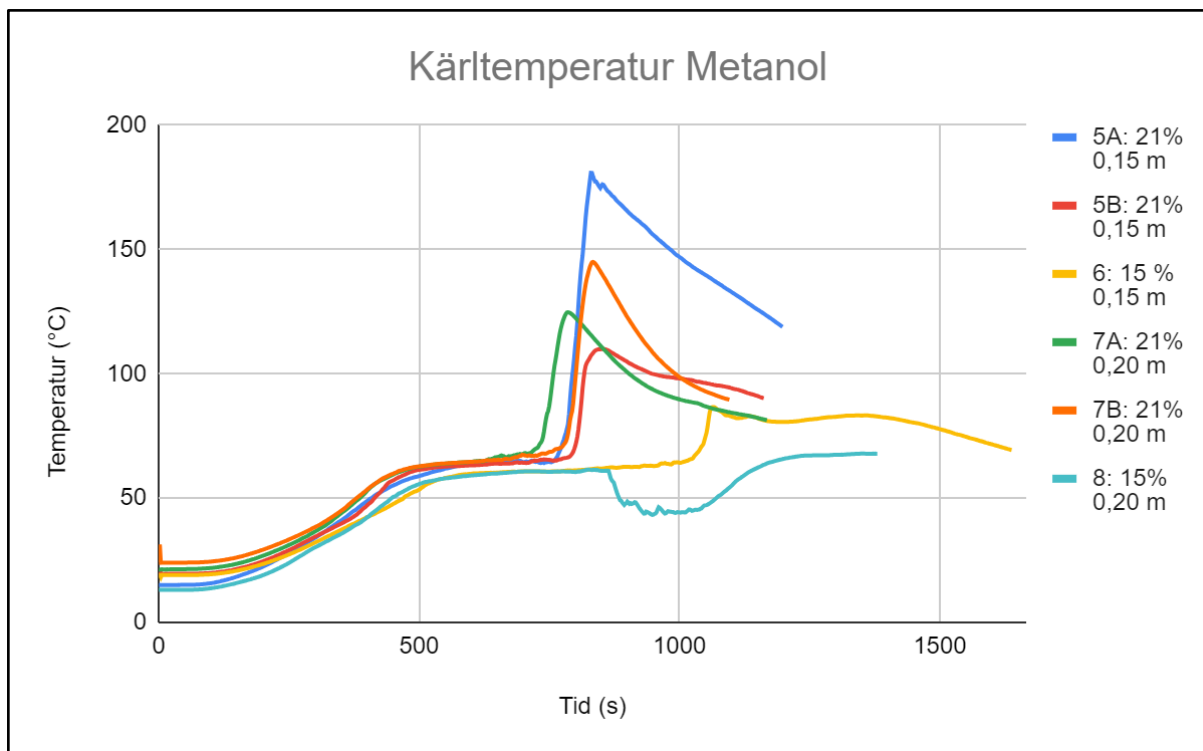
Figur 61. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.



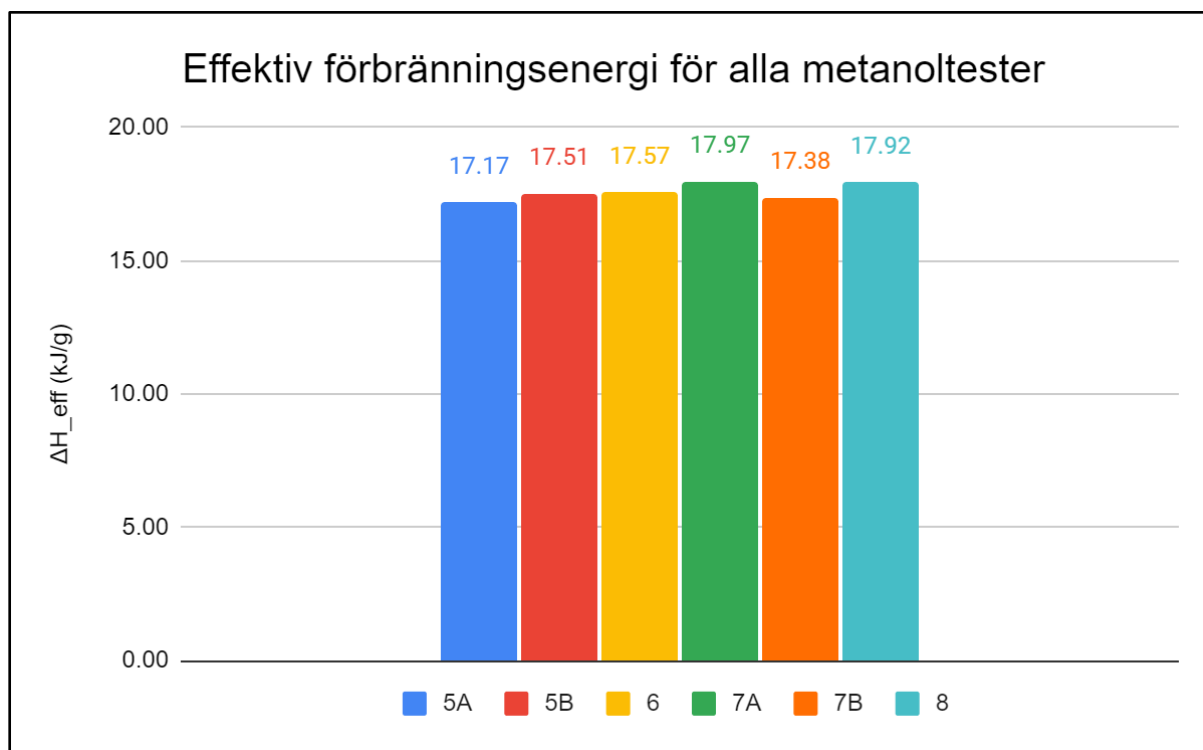
Figur 62. Temperatur på olika höjder vid väggen i kammaren, där höjderna är angivna i cm.



Figur 63. Kärntemperatur för vissa heptantester.



Figur 64. Kärntemperatur för vissa metanoltester.



Figur 65. Anger effektiv förbränningsenergi för metanoltesterna