

Antennelse av oksiderbar røykgass fra ulmebrann i et lukket miljø

Utvikling av eksperimentelt oppsett

Alexander Lie



Masteroppgave ved det matematisk-
naturvitenskapelige fakultetet

UNIVERSITETET I BERGEN

[01.06.2017]

Tittelblad

Antennelse av oksiderbar røykgass fra ulmebrann i et lukket miljø og utvikling av eksperimentelt oppsett.

© Alexander Lie

2017

Antennelse av oksiderbar røykgass fra ulmebrann i et lukket miljø

Sammendrag

Oppgaven er todelt; første del beskriver utformingen av det eksperimentelle oppsettet, andre del er eksperimentell og tar for seg antennelse av oksiderbar røykgass i et lukket miljø. Det var stilt følgende krav til forsøkets oppsett: Det må være i et lukket miljø hvor ulming kan oppstå, registrere data som; gasskonsentrasjoner i ppm og %, vekttap og temperatur samt å antenne en potensiell eksplosiv røykgass. Eksperimentet må kunne detektere gass kontinuerlig og oppsette må være gjennomiktig for å lettere observere eventuelle flammer og utstyret må kunne operere i et fuktig og røykfyllt miljø. Det var vesentlig for oppgaven å designe et oppsett som kan utføre repeterbare forsøk.

Resultatene fra forsøkene ga svar på hypoteser som; 16 av 21 forsøk ga positive resultater mht. antenning av røykgass fra ulmebrann i et lukket miljø, selv om en fraksjon av oksygenet ble forbrukt i selve ulmebrannen. Det ble påvist en klar sammenheng mellom temperaturutvikling og antennelse av oksiderbar røykgass. I de tilfellene temperaturen var høy i flere plan ble det ikke observert antennelse av røykgass. Derimot ble det oppnådd positive resultater mht. antenning av røykgass der temperaturutviklingen var lav.

Det ble registrert høyere konsentrasjoner av CO ved å redusere forholdet mellom luft/brensel enn tidligere forsøk beskrevet i kapittel 2.7, der det ble oppnådd konsentrasjoner opp imot 0,1 – 0,55 %. Det ble registrert mer enn 10000 ppm (1 %) CO som var toppen av deteksjonsområdet på sensoren og det spekuleres i at det ble oppnådd 2-3 ganger så høye verdier. CO har en eksplosjonsgrense på mellom 12,5 – 74 %, se kapittel 2.6.1. Ettersom det mest sannsynlig ikke ble oppnådd CO konsentrasjoner på over 12.5 %, indikerer det at det produseres også andre oksiderbare gasser / partikler i forsøket.

Forord

Jeg vil takke Bjarne Christian Hagen for god veiledning og tett oppfølging av oppgaven samt Gisle Yngvar Romslo Kleppe for elektroteknisk assistanse angående konstruering og kalibrering av sensorpakke. Det har oppstått mange utfordringer som både Bjarne og Gisle har vært høyst hjelpelige med. Jeg vil takke Arjen Kraaijeveld for lab assistanse. Til slutt vil jeg også takke UIB, spesielt Bjørn Johan Arntzen og HSH som ga meg anledning til å utføre og skrive oppgaven i Haugesund.

Bjarne Christian Hagen har vært bi-veileder i Haugesund, mens Bjørn Johan Arntzen har vært hovedveileder i Bergen.

Innholdsfortegnelse

1	Introduksjon	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Problemstilling / hypotese	1
1.3	Avgrensninger/ antagelser	2
2	Teori og tidligere forskning	3
2.1	Brann og røykgass som et samfunnsproblem	3
2.2	Ulmebrann	6
2.3	Potensielle faremomenter og tidligere ulykker i industrien	7
2.4	Faktorer som påvirker ulming	10
2.5	Overgang fra ulmebrann til flammebrann	12
2.6	Ulike gasser og blandingsforhold	12
2.6.1	Karbonmonoksid	12
2.6.2	Karbondioksid	13
2.6.3	Blandingsforhold	13
2.7	Tidligere forsøk	14
2.8	Termoelement	15
3	Eksperimentelt oppsett	16
3.1	Formålet med forsøkene	16
3.2	Røykkammeret og trykkavlaster	17
3.3	Tennkilde	18
3.4	Varmekilde	20
3.5	Brensel	21
3.6	Materialegenskaper	21
3.6.1	Akrylplast	21
3.6.2	Robax	22
3.7	Diverse utstyr	22
3.7.1	Datalogger	22
3.7.2	Spenningsregulator	22
3.7.3	Gassensorene	23
3.8	Sensorkpakke	30
3.9	Kalibrering av sensorkpakke	31
4	Preliminære forsøk	34
4.1	Oppsett 1: Loddebolt og Piezo tennkilde	34
4.2	Oppsett 2: Varmetråd og Piezo tennkilde	36
4.3	Oppsett 3: Varmetråd og piezo igniter	39

4.4 Oppsett 4: Varmetråd og spark igniter	40
5 Resultat	44
5.1 Eksperimentel prosedyre	44
5.2 Melforsøk	45
5.3 Pelletsforsøk	48
5.4 Sponforsøk	50
5.5 Bomullsforsøk	53
5.6 Samlede verdier	57
6 Diskusjon	61
6.1 Utforming av eksperimentelt oppsett	61
6.2 Resultat	62
6.2.1 Temperaturutvikling, gasskonsentrasjoner og relasjon til antenning av oksiderbar røykgass	62
6.2.2 Massetap	65
6.2.3 Antennelse av røykgass	66
6.2.4 Sammenligning av melforsøk 4 og 5	66
7 Konklusjon	70
8 Videre arbeid og forbedringspotensial	71
Kilder og litteratur	73
Vedlegg A - Melforsøk	76
Vedlegg B – Pelletsforsøk	80
Vedlegg C - Sponforsøk	84
Vedlegg D – Bomullsforsøk	87

Figur liste

Figur 1: Illustrerer antall brannofre per million innbyggere i ulike verdensdeler nasjoner [9].	4
Figur 2: Gjennomsnittlig data på antall brann i året pr 1000 innbygger i ulike land [10].	5
Figur 3: Illustrerer to ulike scenarioer der ulmefronten beveger seg med og mot luftstrømmen.	6
Figur 4: Illustrerer en ulmende masse inne i en silo som potensielt kan antenne en støvsky [1].	8
Figur 5: Illustrerer en voksende ulmeklump i en silo [1].	9
Figur 6: Illustrerer ødeleggelse av tak på silo i Stavanger i 1985 [1].	9
Figur 7: Illustrerer tiden det tar for at ulmingen når overflaten som funksjon av dybden til hvor ulmingen startet [1].	10
Figur 8: Forhold mellom produsert gass (y-akse) ved ulike blandingsforhold (-akse). Grå ruter indikerer støkiometriske verdier. [28].	14
Figur 9: Prinsippskisse for termoelement.	15
Figur 10: Skisse av tenkt oppsett.	16
Figur 11: Mål på kammer.	17
Figur 12: Trykkavlaster.	18
Figur 13: Tennkilde fra grill.	19
Figur 14: Spark igniter. Figuren er hentet fra sparkfun. [32]	19
Figur 15: T.V Loddebolt fra Meece, T.H Loddebolt fra biltema.	20
Figur 16: En demontert brødrister.	21
Figur 17: Datalogger	22
Figur 18: Spenningsregulator.	23
Figur 19: CO ₂ detektor av type CDM4160-H00. Pinn 1 – 5 er plassert nederst på figuren fra venstre til høyre [37].	24
Figur 20: CO detektor av type TGS5342 slik sensoren ble bestilt T.V. Montert på en trykt strømkrets med elektronisk nettverk for signaltilpassing T.H [37].	25
Figur 21: Bestemmelse av CO konsentrasjon grafisk [38].	25
Figur 22: Oksygen sensor montert på en trykt strømkrets [37].	26
Figur 23: Illustrerer forholdet mellom oksygenkonsentrasjon og spenning ut fra sensor [39].	27
Figur 24: VOC sensor montert på en trykt strømkrets med R1 og kontakter for Vh, VI og utgangssignalet Vvoc ut [37].	28
Figur 25: Grafisk framstilling av sammenheng mellom konsentrasjon av ulike organiske komponenter og den indre motstand Rs. Fabrikantens målte verdier plassert sammen med regresjonslinjen.	29
Figur 26: Sensorpakken montert på røykkasse.	31
Figur 27: Test av sensorpakke med kalibreringsgass.	32
Figur 28: Test av kalibreringsgass.	32
Figur 29: Kalibrering av oksygen sensor	33
Figur 30: Oppsett 1.	34
Figur 31: Illustrerer hypotesen om økt antenningsmulighet ved bruk av folie og trakt.	35
Figur 32: Oppsett 2.	36

Figur 33: Antenning av røykgass	37
Figur 34: Illustrerer ulming av mel som propagerer ujevnt på et horisontalt plan.....	38
Figur 35: Oppsett 3.Hull i topp av beholder indikeres med stiplet linje.	39
Figur 36: Varmetrådene til venstre er koblet til 3A, 50 volt. Varmetrådene til høyre er koblet til 5A, 110 volt.	40
Figur 37: Modifisert tennkilde	41
Figur 38: Oppsett 4, endelig oppsett.	42
Figur 39: Oppsett 4 med sensorpakke.	43
Figur 40: Temperatur som funksjon av tid for melforsøk 1 og 2. Observerte en defekt i termoelement 3 i melforsøk 2.....	46
Figur 41: Illustrerer massetap som funksjon av tid for melforsøkene. Tallene i parentes viser tid for antennelse av røykgass. Pil illustrerer vektforstyrrelse ved antenning av røykgass.	47
Figur 42: Temperatur som funksjon av tid for pelletsforsøk 1, 2, 4 og 6.	48
Figur 43: Illustrerer massetap som funksjon av tid for pelletsforsøk. Tallene i parentes viser tid for antennelse av røykgass.	49
Figur 44: Temperatur som funksjon av tid med ulik startmasse, 90 og 140 gram spon. Det er brukt ulik horisontal akse for å enklere observere kurvene.	51
Figur 45: Illustrerer massetap som funksjon av tid for sponforsøk. Tallene i parentes viser tid for antennelse av røykgass. Pilene indikerer forstyrrelser i vektresultatet. Klammeparentes illustrerer økt massetap i forsøk 2.	53
Figur 46: Antennelse av oksiderbar røykgass utviklet seg til flammebrann i bomullsforsøk 3. Bilde t.h. illustrerer røykstrålen.....	54
Figur 47: Temperatur som funksjon av tid i bomullsforsøk 2 og 3.....	55
Figur 48: Temperatur som funksjon av tid. Pil illustrerer at varmekilden ble slått av etter 420 sekund.....	55
Figur 49: Illustrerer massetap som funksjon av tid for bomullsforsøk. Tallene i parentes viser tid for antennelse av røykgass. Pilene indikerer vekt forstyrrelser i forsøk 1-3.....	56
Figur 50: Illustrerer massetap som funksjon av tid for alle bomullsforsøk.	59
Figur 51: Temperatur som funksjon av tid. Høy temperaturutvikling for forsøk uten antenning av oksiderbar røykgass.	63
Figur 52: Temperatur som funksjon av tid. Lav temperaturutvikling for forsøk som resulterte i antenning av oksiderbar røykgass	63
Figur 53: Gasskonsentrasjoner fra pelletsforsøk 6. Gasskonsentrasjonene avleses på venstre akse bortsett fra oksygenkonsentrasjonen som leses av på høyre akse. Pil indikerer antenningspunktet som gir et fall i oksygenkonsentrasjonen.....	64
Figur 54: Gasskonsentrasjoner fra melforsøk 4 og 5. Gasskonsentrasjonene avleses på venstre y-akse bortsett fra oksygenkonsentrasjonen som leses av på høyre y-akse. Figur C og D inkluderer VOC konsentrasjonene for melforsøk 4 og 5 som forskyver venstre y-akse.	67
Figur 55: Temperatur som funksjon av tid. Lav temperaturutvikling i melforsøk 4, høy temperaturutvikling i melforsøk 5.....	67
Figur 56: Illustrerer antenningstid i de ulike forsøkene.	68

Tabell liste

Tabell 1: Ulike stoff med forskjellige forbrenningsvarme.....	11
Tabell 2: Max anbefalt oppholdstid i forhold til konsentrasjon av CO [25].....	13
Tabell 3: Deteksjonsområdet for sensorene.	23
Tabell 4: Test av sensorene.	33
Tabell 5: Oppsett 4.....	45
Tabell 6: Resultat fra melforsøk.....	47
Tabell 7: Resultat fra pelletforsøk.....	50
Tabell 8: Resultat fra sponforsøk.....	52
Tabell 9: Resultat fra bomullsforsøk.....	56
Tabell 10: Samlede verdier uten sensorpakke.....	57
Tabell 11: Samlede verdier med sensorpakke.....	58
Tabell 12: Massetap per sekund. Gule linjer illustrerer forsøk uten observert antenning av røykgass.....	60

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Gjennom historien har det vært utfordringer ved lagring av organisk material over lengre perioder [1]. Et av faremomentene er eksoterm biologisk nedbrytning av organisk stoff som kan utvikle seg til en ulmebrann. En ulmebrann kan igjen gå over til en flammebrann, som kan medføre tap av menneskeliv samt tap av økonomiske verdier. Denne oppgaven har som mål å bidra til en bedre forståelse på hva som skjer under en ulmebrann; avdekke faremomenter i små skala i et laboratorium for å oppnå kunnskap om å forholde seg til en større ulmebrann i industrien mht. antenning av oksiderbar røykgass.

Det er ønskelig å analysere røykgass for å avdekke dens innhold og faremoment, ettersom det er røyken som tar flest liv i brann [2]. Parametere som er viktig å fokusere på er gasskonsentrasjoner: CO, CO₂, O₂, ulike organisk materie, temperatur og massetap. Hovedfokus i oppgaven vil være å utarbeide en prototype for eksperimentelt oppsett hvor ulming kan undersøkes. Prototypen skal på sikt kunne brukes til å besvare hypoteser, som for eksempel; ved redusert luft/brensel ratio vil konsentrasjonen av CO øke.

1.2 Problemstilling / hypotese

I oppgaven skal det undersøkes hvordan en ulmebrann oppfører seg i et tilnærmet lukket volum. Det skal designes et oppsett hvor ulming kan oppstå og hvor man kan registrere data som vekttap, temperatur og gasskonsentrasjoner samt klargjøre om det er praktisk mulig å antenne røykgassen. Oppsettet som designes vil bestå av elektronisk utstyr som varmekilde, antenningskilde, gassdetektorer, vekt og termoelement. Utstyret må ikke interferere med hverandre samt beherske temperatur og fukt påkjenninger som oppstår i en ulmebrann.

Det er ønskelig å bestemme hvilke oksiderbare gasser som dannes, deres konsentrasjoner samt se på hvilke signifikante faktorer som påvirker disse konsentrasjonene. Det skal også undersøkes om valg av brensel påvirker produsert røykgass og gasskonsentrasjoner.

En hypotese er at røykgass fra ulmebrann i et lukket volum kan antenne selv om en fraksjon av oksygenet er anvendt av ulmebrannen. En annen hypotese for oppgaven er at det vil bli

produsert mer CO ved å redusere luft/brensel ratio ved å enten øke brensel masse eller redusere volum luft inne i røykkammeret.

En praktisk problemstilling i oppgaven er å undersøke om bruk av trakt og folie vil øke antenningsmuligheten, se figur 31 i oppsett 1, kapittel 4. Problemstillingen går ut på at forsøket deles opp i ulike soner der sone 1 inneholder høy konsentrasjon av oksiderbar røykgass i et oksygenfattig miljø, mens sone 2 inneholder høyere verdier for oksygen. Lavere verdier for oksygen vil motvirke overgang til flammebrann som er ønskelig i eksperimentet ettersom det ønskes å produsere oksiderbare gasser og ikke CO₂. Utløpet av folie er plassert ved siden av tennkilden slik at høy konsentrasjon av oksiderbar røykgass blander seg med høyere konsentrasjon av oksygen som øker antenningsmulighetene.

Røykgass- og temperaturutvikling er ulik for flamme- og ulmebrann. Det forventes å observere trender mellom temperatur, oksygen konsentrasjon, produsert CO og CO₂ konsentrasjon og massetap. Der det spekuleres i at CO/CO₂ ratioen er større i en ulmebrann og temperaturutviklingen og massetapsraten vil være større i en flammebrann.

1.3 Avgrensninger/ antagelser

I oppgaven skal det testes i liten skala i et lukket miljø. Fra ulmingen skal det registreres gasskonsentrasjoner som CO, CO₂, O₂ og VOC. Det antas at røykkammeret er tett og at røykgassen er homogen. Det er antatt at det er lik tetthet av stoff i metallbeholder.

Det har blitt prioritert å skrive om ulmebrann, faktorer som påvirker ulmeforløpet og dems relasjoner. Teknisk virkemåte på elektronisk utstyr er mindre prioritert ettersom det er utenfor pensum.

Det antas at ingen andre gasser påvirker CO, CO₂ og O₂ detektor enn de gassene som hver enkel sensor skal detektere.

2 Teori og tidligere forskning

Kapittel 2 tar for seg generell brann og ulmeteori, deretter går oppgaven dypere inn i temaer knyttet til eksperimentelle forsøk og gasser produsert i ulmebrann.

2.1 Brann og røykgass som et samfunnsproblem

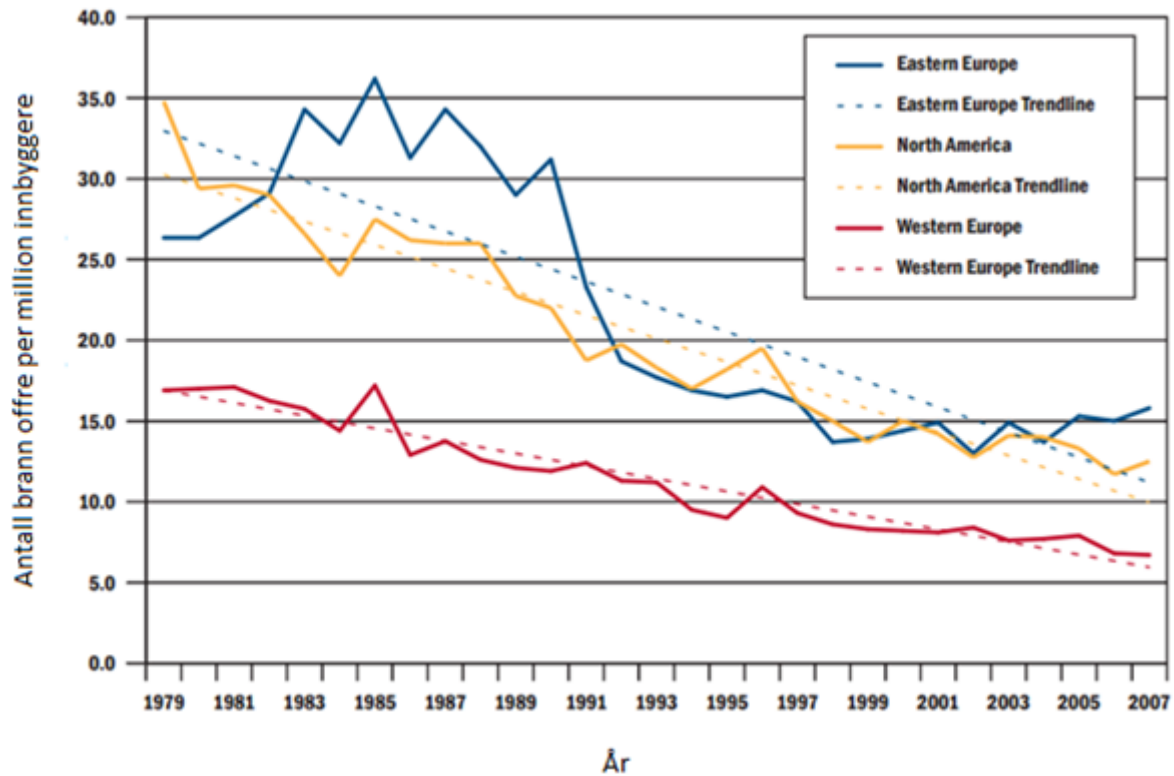
I de siste tiårene har det blitt registrert 350 000 – 700 000 branner i året i USA [3]. Hvilke stoffer som blir generert i en brann avhenger av brenselet, men generelt produseres det CO₂, CO, tjærestoffer, vann og energi som gir høye temperaturer. Karbonmonoksid utgjør en risiko som følge av dens toksikologiske og eksplosive egenskaper [4], [5]. Tall fra forskning viser at 75 % av de som omkommer i brann dør som følge av røykinhalering. Videre viser tallene at 80 % av de 75 % som dør skyldes CO forgiftning [2]. Røykgassen kan oppnå temperaturer som ødelegger lungene rent termisk, men det er de kjemiske egenskapene til gassen som dreper [2].

Generelt er CO₂ harmløs i normale omstendigheter, men kan være dødelig i høye konsentrasjoner, dvs. over 15 % [6]. Høye konsentrasjoner av CO₂ kan forekomme naturlig der det eksisterer vulkansk aktivitet. En av de dødeligste CO₂ ulykkene fant sted 21 august 1986 ved Lake Nyos i Cameroon. Enorme mengder CO₂ steg opp fra innsjøen og tok livet av over 1700 mennesker i løpet av en natt [6]. Innsjøen er lokalisert nær en vulkan, men den var ikke aktiv under ulykken.

Røykgassen kan også inneholde andre giftstoffer som cyanid, et kjent giftstoff fra 2. verdenskrig. Så lite som 60 mg kan være en dødelig dose via fordøyelsessystemet [7]. Cyanid i gassform blir omtalt som blåsyregass og i likhet med CO er den også eksplosiv [7]. Cyanid dannes sjeldnere ettersom det krever at brannen oppstår i et oksygenfattig miljø, samt ha karbon- og nitrogeninnholdige kjemikalier tilstede. Materialer som potensielt kan generere cyanider er ull, polyuretan eller ammoniakk blandet med organisk materialet [8].

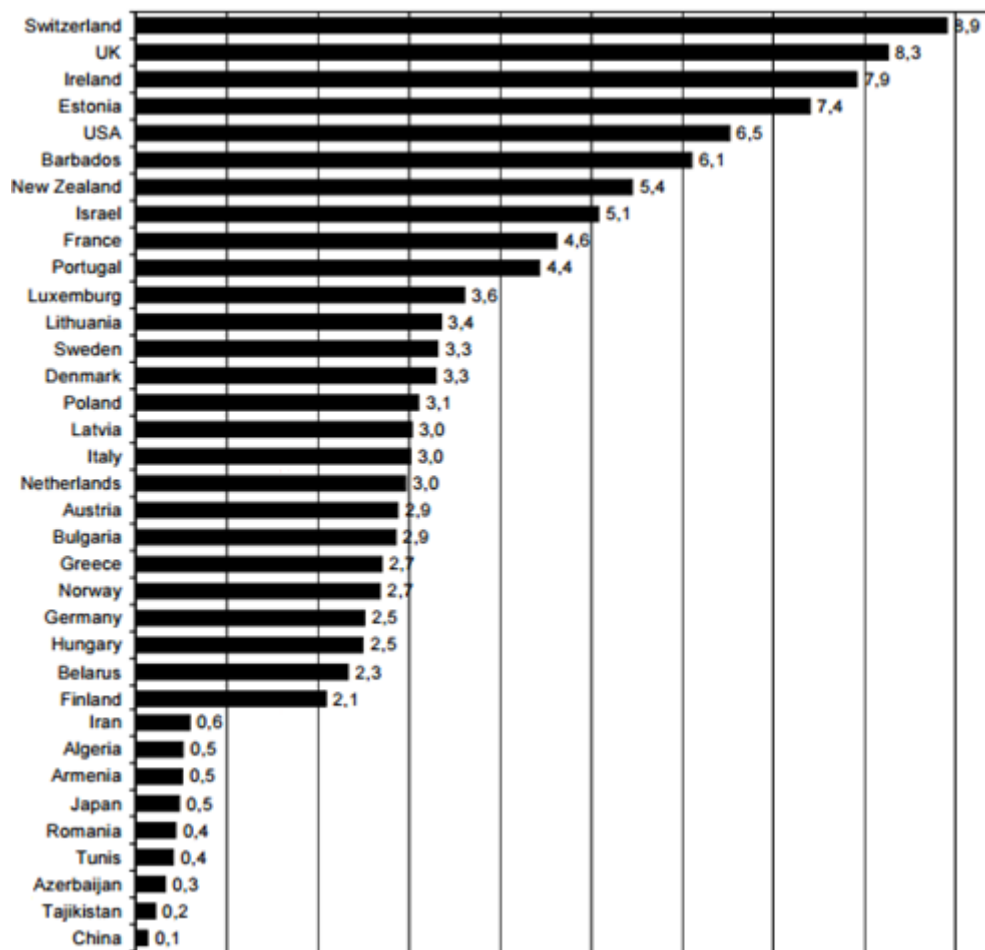
Et annet samfunnsproblem angående brann og er at mennesker omformer skog til jordbruksområder ved bruk av ild. Denne praksisen er mest ekstrem i Indonesia som består av tropiske landområder med et kullag nær overflaten. Det resulterer i at underjordiske kullag ulmer i lengre perioder og det har forårsaket rundt 3000 kullbranner siden 1982. Både hus, skoler og moskeer har gått tapt. Store områder har blitt røyklagte og avlinger ødelagt eller redusert av blokkert

sollys. I tillegg rapporteres det om en oljetankerkollisjon samt implikasjoner på en astmaepidemi [9].



Figur 1: Illustrerer antall brannofre per million innbyggere i ulike verdensdeler nasjoner [9].

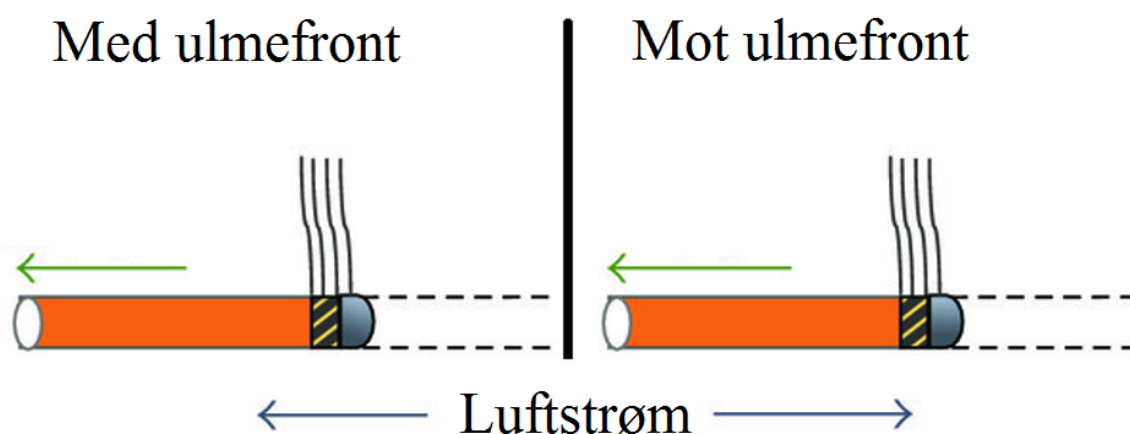
I dag er antall dødsbranner per innbygger redusert, se figur 1. Det kan skyldes bedre fokus på brannsikkerhet; rømningsvei, bygningsstruktur, materialvalg, risikostyring samt innføring av barrierer etc. Derimot illustrerer figur 2 at hyppigheten av branner i ulike land og at vestlige land topper listen. Det konstaterer behovet for forskning og videreutvikling av brannsikre løsninger i moderne samfunn.



Figur 2: Gjennomsnittlig data på antall branner pr 1000 innbygger i ulike land i 2005 [10].

2.2 Ulmebrann

Ulmebrann er en flammeløs, eksotermisk brann som brenner ved både lav temperatur og lav hastighet. Ulmefronten brenner generelt i en hastighet på 5-50 cm/timen, men den kan også propagere langsommere [1]. Det er en forbrenning som opprettholder seg selv ved en eksotermisk reaksjon med oksygen og fast stoff som lar seg forkulle. Overføring av varme og tilgang på oksygen har stor betydning for ulmingen. En ulmefront kan propagere mot en luftstrøm (i revers), når oksygen diffunderer til reaksjonssonen gjennom ytre lag av det uforbrente materie og mot reaksjonssonen, dvs. oksygenet beveger seg motsatt av ulmefronten [11], se figur 3. Figur 3 illustrerer et rør hvor ulmefronten beveger seg mot venstre i begge scenarier, derimot varierer luftstrømmen og de ulike metodene klassifiseres henholdsvis: Med ulmefronten og revers / mot ulmefronten.



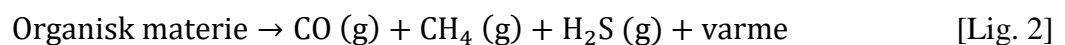
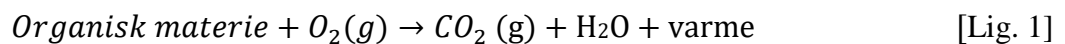
Figur 3: Illustrerer to ulike scenarier der ulmefronten beveger seg med og mot luftstrømmen.

Stoff som lar seg ulme er for eksempel: bomull, tre/spon, kull, mel, papir, tekstiler og lær [12]. En ulmebrann kan utvikle seg videre til både en flammebrann og støveksplasjon, samt produsere toksikologiske og eksplosive gasser [1], [4], [5], [8], [12].

Ulmebrann er en type brann som kan oppstå på flere måter. I USA oppstår det gjennomsnittlig 8300 branner i avfallsdeponier hvert år, og hvor de fleste forekommer i vår og sommer månedene [13]. Det kan starte med en eksoterm dekomponering av organisk materiale der det dannes oksiderbar røykgass. Temperaturen stiger under dekomponeringen og det kan oppstå ulming [14]. Dette fenomenet kan også oppstå i siloer dersom organisk stoff dekomponerer som følge av dårlig utskiftingen av materie. Ulmebrann kan også oppstå rent termisk ved at en

gjenstand i et prosessanlegg utsettes for høy friksjon slik at temperaturen stiger og materie rundt gjenstanden starter å ulme [1].

Biologisk nedbrytning av organisk materie kan forekomme på to ulike måter, aerob og anaerob. Aerobe reaksjoner innebærer at det er oksygen til stedet, der oksygenivåer over 5 % betegnes som aerob [15]. Dette gir en raskere nedbrytningen samt påvirker hvilke gasser som produseres i nedbrytningsprosessen, se ligning 1 [16]. Temperaturene kan komme opp imot 75 °C for begge reaksjonene, men de er optimale rundt 65 °C. Anaerobisk miljø betegnes som oksygenfattig og det dannes andre gasser i disse reaksjonene som metan og hydrogensulfid, se ligning 2 [17]. De biologiske mikroorganismene påvirkes av: temperatur, fukt, oksygentilgang, fosfat- og nitratinnhold [17].

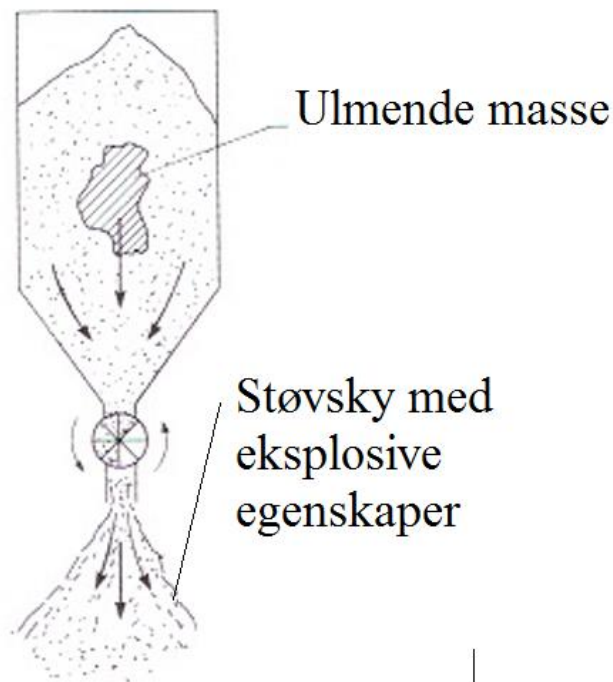


Ulmebrann er en langsom forbrenningsprosess, likevel destruktiv og farlig. Ulmingen kan oppstå under overflaten og ulme opptil måneder uten å bli oppdaget dersom det ikke er termiske sensorer eller gassdetektorer tilstede. Det er påvist at verdens eldste ulmebrann har pågått i 6000 år og er fortsatt aktiv i dag [18]. Det er et underjordisk kull-lag som ulmer 30 m under bakken i New South Wales i Australia og ulmer med en hastighet på 1 m i året [18].

2.3 Potensielle faremomenter og tidligere ulykker i industrien

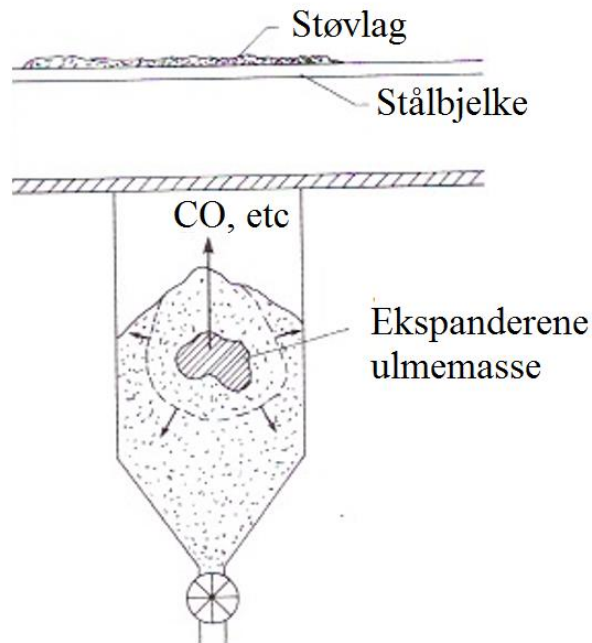
Ulmebrann i en silo kan utvikle seg til en støvekspløsjon under rette forhold. Figur 4 illustrerer volum av ulmende masse inne i en silo som beveger seg nedover mot uttaket hvor en støvsky av mel befinner seg i en konsentrasjon på 100 – 1000 g/m³ (eksplosiv) [1]. Når ulmemassen kommer i kontakt med støvskyen kan den antenne. I 1986 utførte Pinkwasser eksperimenter der han lot en ulmende masse på 700 °C falle fritt 1 m i en sky hvor mel var suspendert i luft med en konsentrasjon på 100-1000 g/m³ [1]. Pinkwasser observerte aldri antenning av støvet under selve fallet, derimot ble det observert antenning når ulmemassen traff bunn av siloen dersom

massen var større enn 25 mm i diameter og veide over 15 gram. Disse resultatene korrelerer med funnene til Alfert, Eckhoff og Fuhre i 1989 [1].



Figur 4: Illustrerer en ulmende masse inne i en silo som potensielt kan antenne en støvsyke, Eckhoff [1].

Under ulming produseres det CO som er både er eksplosiv og giftig [4], [5]. Figur 5 illustrerer en ulmende masse som ekspanderer i en silo. Over siloen befinner det seg en stålbjelke med et støvlag. Dette scenariet er hentet fra en ulykke i Stavanger i 1985 og er beskrevet av Braaten [1]. Siloen inneholdt pellets av kanadisk rapsmel som var lagret over lengre tid. Det ble oppdaget en kompakt ulmende masse i siloen og noen timer senere ble det observert flammer. Det ble utført slukningsarbeid med skum, uten suksess. Like etter slukningsarbeidet antente røykgassene og den påfølgende eksplosjonen ødela taket på siloen. Det spekuleres i at ulmemassen eller flammene antente røykgassen.



Figur 5: Illustrerer en voksende ulmeklump i en silo, Eckhoff [1].

Figur 6 illustrerer skadeomfanget av eksplosjonen, siloen mangler tak. Det er usikkert om støvlaget over bjelken forsterket eksplosjonen i en form av sekundær eksplosjon, se figur 5. For å danne en sekundær eksplosjon må første eksplosjon suspendere støvet i luft med en konsentrasjon på 100-1000 g/m³ samt antenne støvskyen. Ingen menneskeliv gikk tapt ettersom ulykken fant sted på natten [1].

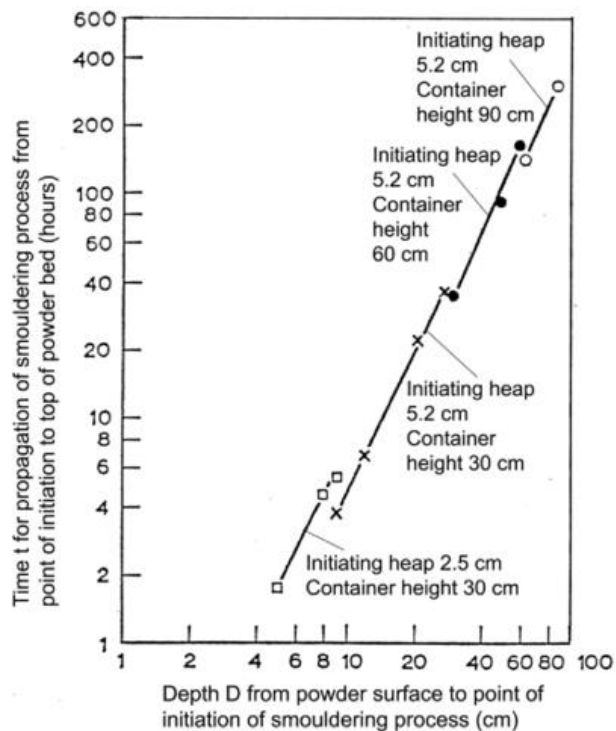


Figur 6: Illustrerer ødeleggelser av tak på silo i Stavanger i 1985, Eckhoff [1].

2.4 Faktorer som påvirker ulming

Ulmebrann påvirkes av flere faktorer. De mest sentrale faktorene er oksygen tilgang, tetthet og partikkelstørrelse, fukt og lagtykkelse [12]. Oksygen må være til stedet for at ulming skal kunne oppstå. Derimot kan ulming forekomme med lavere oksygenkonsentrasjoner enn det som kreves for en flammebrann. Oksygentilgang korresponderer med temperaturutvikling, redusert tilgang på oksygen reduserer både ulmehastighet samt energifrigjøring [12].

Små partikler har en tendens til å ulme raskere enn store partikler ettersom mindre partikler har større overflate/volum forhold. Det resulterer i økt tilgang av oksygen til forbrenningssonen som kontrollerer utviklingen av ulmebrannen. Derimot har større partikler oppnå høyere ulmehastighet når det er luftstrømmer tilstede. Det er fortsatt uvisst hvorfor det er slik, men det spekuleres i at varmetapet er større i mindre partikler ved høyere vindhastighet. En annen forskjell mellom små og store partikler er små partikler kan ulme i tynnere lag [12].



Figur 7: Illustrerer tiden det tar for at ulmingen når overflaten som funksjon av dybden til hvor ulmingen startet, Eckhoff [1].

I 1973 utførte Parlmer forsøk der han undersøkte tiden/hastigheten på ulmefronten [1]. Han fant at tiden korrelerte med en materialbestemt konstant multiplisert med startdybden til ulmingen, se ligning 3. Figur 7 illustrerer at ulming 85 cm under overflaten vil bruke ca. 350 timer til å nå toppen [1].

$$t = \beta * L^2$$

[Lig. 3]

t = tiden i timer

β = materialbestemt konstant

L = dybden i cm

Stoffets fuktinnhold påvirker ulmehastighet og antenningstemperatur. Vann absorberer termisk energi fra brann og reduserer forbrenningsprosessen. Palmer viste at en økning i fuktinnhold fra 0-19 % reduserte ulmehastigheten med 21 %. Vann er lagret i porer (fuktinnhold) samt kjemisk bundet i selve stoffet og det frigjøres under forbrenning. Det kan også migrere fra luft [12].

Stoff har forskjellige egenskaper som forbrenningsvarme og energifrigjøringstid som kan påvirke om stoffet ulmer, brenner eller eksploderer. Tabell 1 illustrerer at TNT har en lav forbrenningsvarme selv om stoffet er eksplosivt. Det indikerer at forbrenningsvarme må ses i sammenheng med tiden det tar for å frigjøre energien i en brannsammenheng. Samtidig påvirker andre egenskaper som partikkelstørrelse og fuktinnhold [12].

Tabell 1: Ulike stoff med forskjellige forbrenningsvarme.

Stoff	Forbrenningsvarme
Kull	29 MJ/kg [19]
Bomull	19,4 MJ/kg [19]
Ris	15.5 MJ/kg [19]
Hvetekorn	18.9 MJ/kg [19]
Maiskorn	18.2 MJ/kg [19]
Trepellets	16,9 MJ/kg / 4,7 kWh/kg [20]
Ull (keratin)	4,2 kWh/kg [21]
Rørsukker	19.0 MJ/kg [19]
TNT	4.7 MJ/kg [19]

2.5 Overgang fra ulmebrann til flammebrann

Ulmefronten kan utvikle seg til en flammebrann ved høy temperatur dersom det er tilstrekkelig med oksygen tilstedte [12]. Tre forhold er viktig for overgang til flammebrann; raten av produsert oksiderende gass som kan opprettholde en flamme, ratio av luft/oksygen og høy temperatur [22], [23]. Palmer og Ohlemiller har utført forsøk der sagspon ulmer i horisontale lag hvor det ble observert flammer når det ble brukt en luftstrøm over 4 m/s [24].

2.6 Ulike gasser og blandingsforhold

2.6.1 Karbonmonoksid

Karbonmonoksid utgjør en risiko som følge av dens toksikologiske og eksplosive egenskaper [4], [5]. Karbonmonoksid er en luktfri gass som dannes ved ufullstendig forbrenning av organisk materiale. CO har en 200-240 ganger større tiltrekningsgrad til hemoglobin enn oksygen og vil danne karboksyhemoglobin (COHb). Dersom CO inhaleres vil den fortrenge oksygen og binde seg til hemproteiner som igjen hemmer oksygentilførsel til kroppens celler [5].

Giftigheten av CO avhenger av konsentrasjonen til både CO og O₂, samt eksponeringstid. Andre vesentlige faktorer på dem som blir påvirket er alder, allmentilstand og tidligere sykdommer. En høy konsentrasjon på kort tid kan være like skadelig som en lav konsentrasjon over lang tid. En normal konsentrasjon av COHb i blod er på 0,3-0,7 %, mens røykere kan oppnå en konsentrasjon oppimot 10 %. Verdier over 10 % ses på som akutt CO forgiftning ut i fra det norske helsebiblioteket. [5]

Det amerikanske forskningsinstituttet National Research Council har klare retningslinjer på hvor lenge man maksimalt bør oppholde seg i et område ved ulike konsentrasjoner av CO, se tabell 2.

Tabell 2: Max anbefalt oppholdstid i forhold til konsentrasjon av CO [25].

Oppholdstid	10 min	30 min	60 min	24 timer
Konsentrasjon CO	1500 ppm	800 ppm	400 ppm	50 ppm

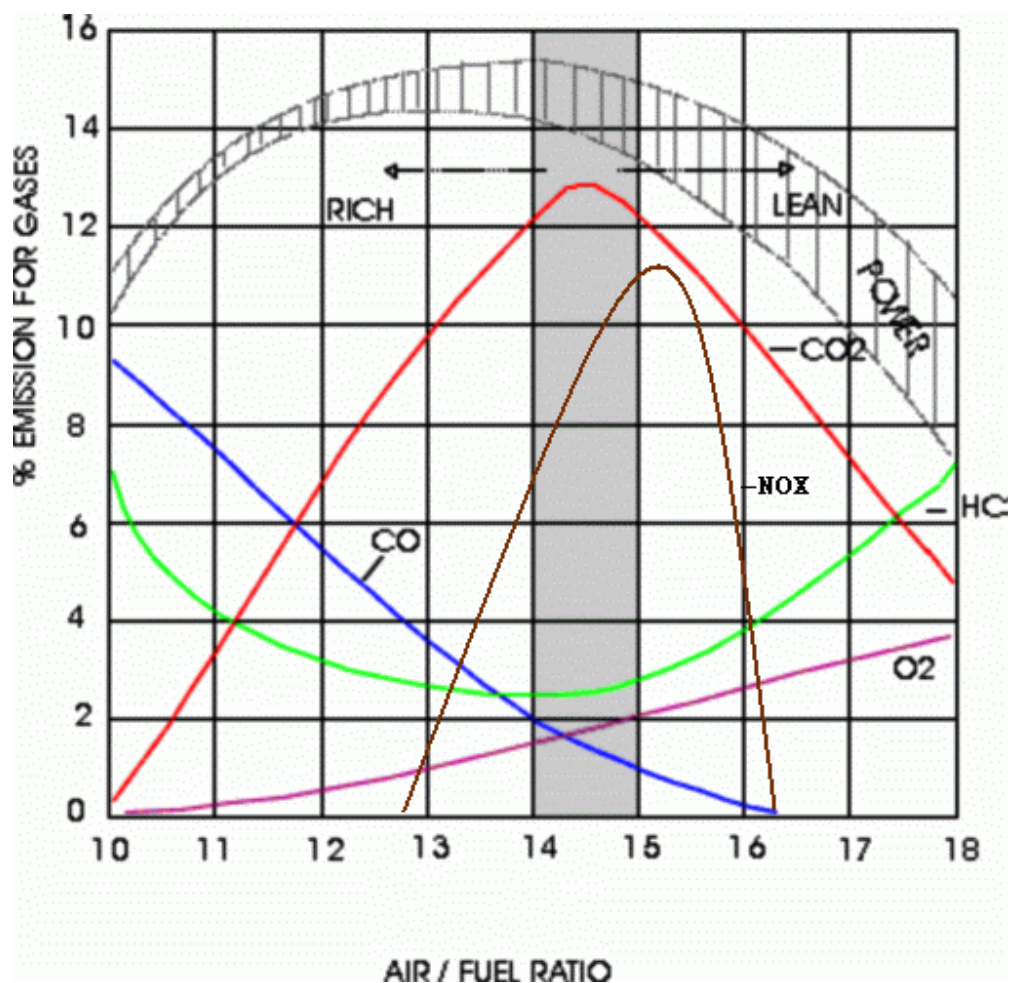
Karbonmonoksid eksplosjonsgrense går fra 12.5 % til 74 % [4], som betyr at gassen har eksplosive egenskaper mellom 12.5 og 74 % dersom den blir utsatt for en tennkilde. 12.5 % CO er en høy konsentrasjon, til sammenligning produserer et bål ca. 5000 ppm som tilsvarer 0.5 % [26].

2.6.2 Karbondioksid

Karbondioksid er en fargeløs gass med svak syrlig lukt og smak. Den er lett løselig i vann og danner karbonsyre H_2CO_3 . Ved 15 °C og 1 atm. løser en liter vann en liter CO_2 (g), ved 0 °C løser det 1,7 liter [27]. CO_2 er tyngre enn luft og den har en molar masse på 44.01. Ved temperaturer over 2000 °C spaltes CO_2 til CO og oksygen [27]. CO_2 er fullstendig oksidert og kan derfor brukes som brannsløkningsmiddel [27].

2.6.3 Blandingsforhold

Blandingsforhold mellom reaktant og oksygen har innvirkning på sluttproduktene, stoffenes konsentrasjoner og temperaturutvikling. Figur 8 beskriver en forbrenning i en bensinmotor der HC står for uforbrent reaktanter. Bensin har en støkiometrisk konsentrasjon når forholdet mellom luft og bensin er mellom 14-15 %. I teorien reagerer alle reaktanter ved denne konsentrasjonen. «Rich» indikerer et høyt forhold mellom bensin og oksygen (oksygenfattig blanding), «lean» vice versa. Resultatene illustrerer at rik blanding gir høy konsentrasjon av CO. «Lean» (oksygen rik) gir en lav CO produksjon ettersom CO består av bare et oksygenatom mens CO_2 består av 2. Det dannes høyest konsentrasjon av CO_2 og NOX rundt støkiometrisk blanding. Nitrogen binder seg med oksygen og danner NO og NO_2 som har fellesbetegnelsen NOX. Denne reaksjonen forekommer ved høye temperaturer og interfererer ikke med forbrenningen av bensin foruten om at reaksjonen trenger oksygen og temperatur. Høyest temperatur oppnås rundt støkiometrisk blanding [28].



Figur 8: Forhold mellom produsert gass (y-akse) ved ulike blandingsforhold (-akse). Grå ruter indikerer støkiometriske verdier [28].

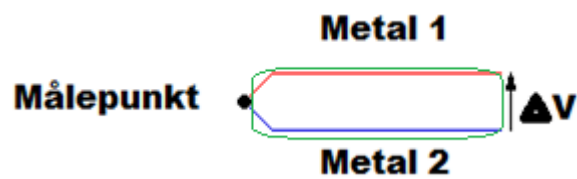
2.7 Tidligere forsøk

I july 1982 utførte J. Quintiere, M Birky, F. McDonald og G. Smith ulmebranneksperimenter som beskrevet i rapporten «An Analysis of Smoldering Fires in Closed Compartments and Their Hazard Due To Carbon Monoxide». Målet var å gjenskape en brann i bolig for å observere CO konsentrasjoner. Forsøkene foregikk i et delvis lukket rom med en høyde på 2.44 m og en grunnflate på 8.83 m². Det var en liten åpning ved gulvet: 76 cm langt og 2.5 cm høyt. Brenselet besto av 10 – 15 cm bomull høyt bomullslag eller 15 cm polyuretan. De høyeste observerte verdiene av CO ble lokalisert under taket og målt fra 0.1 til 0.55 % [29].

Deres forsøk legges til grunn for plassering av sensor i endelig oppsett og det gir en indikasjon på hvilke produserte verdier det forventes av CO i en mindre ulmebrann.

2.8 Termoelement

Termoelement består av en positiv ledning med 90 % nikkel og 10 % krom samt en negativ ledning med 95 % nikkel, 2 % aluminium, 2 % mangan og 1 % svovel [30]. Ledningene ligger beskyttet inni en kabel, se figur 9. Metallet i ledningene reagerer ulikt på temperatur og det skaper en spenningsforskjell som er proporsjonal med temperaturen. Måleområdet på termoelement type k er fra -270 til 1372 °C og den fungerer i et oksiderbart miljø [30].



Figur 9: Prinsippkisse for termoelement.

3 Eksperimentelt oppsett

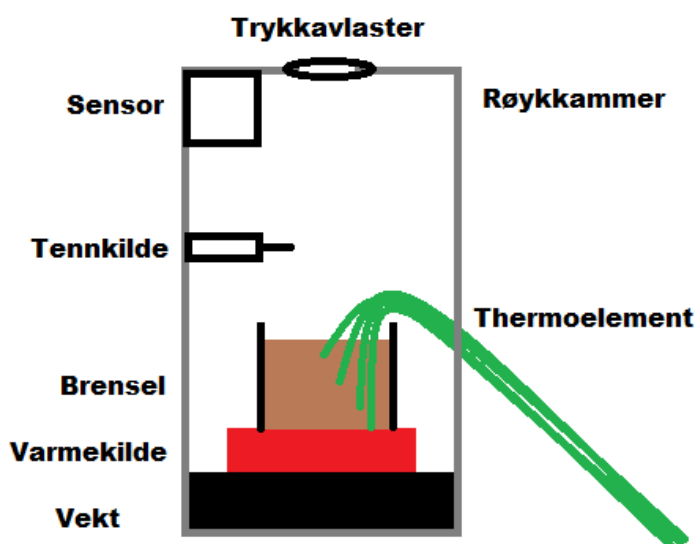
Kapittelet tar for seg formålet med forsøkene og beskriver hvorfor det var nødvendig med gitt eksperimentelt utstyret. Kapittelet tar også for seg bruk av utstyr med samme virkemåte ettersom det ble påvist behov for nytt utstyr. Utvikling av prototyper er beskrevet mer detaljert i kapittel 4.

3.1 Formålet med forsøkene

Formålet med å utvikle dette eksperimentelle oppsettet er å undersøke om det er mulig å antenne røykgass fra en ulmebrann. Det er stilt følgende krav til forsøkets oppsett: Det må være i et lukket miljø hvor ulming kan oppstå, registrere data som; gasskonsentrasjoner i ppm og %, vekt tap og temperatur samt antenne en potensiell eksplosiv gassblanding. Eksperimentet må kunne detektere gass kontinuerlig. Oppsette må være repeterbart samt være gjennomiktig for å lettere detektere eventuelle flammer. Utstyret må kunne operere i et fuktig og røykfylt miljø. Et godt oppsett kan gi svar på hvilke signifikante faktorer som påvirker de målte gasskonsentrasjonene. Brenslet skal kunne varieres og ved hjelp av sensorene kan man få et bedre bilde av røykens eksplosjonsområde.

Oppsettet er skissert i figur 10 og består av:

- Røykkammer
- Tennkilde
- Varmekilde
- Trykkavlaster
- Brensel
- Detektorer
- Vekt
- Termoelement
- Beholder for brensel

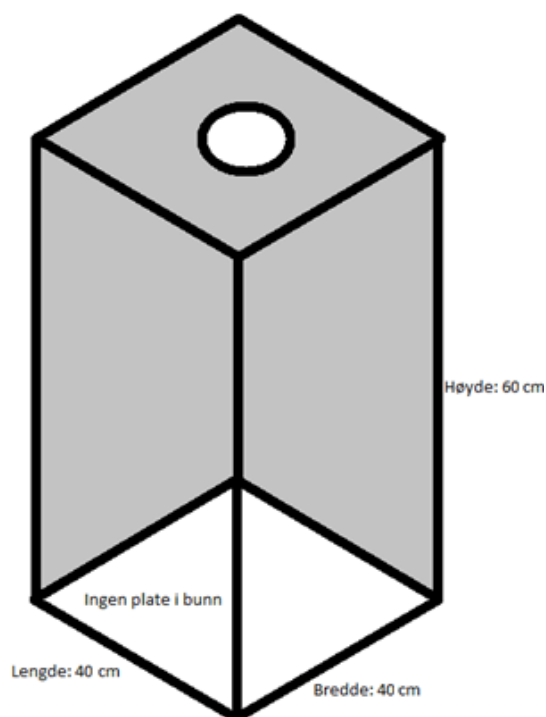


Figur 10: Skisse av tenkt oppsett.

3.2 Røykkammeret og trykkavlaster

Det er utformet et røykkammer som samlet den produserte røykgassen. I kapittel 2.7 er det beskrevet at J. Quintiere, M. Birky og F. McDonald oppnådde en CO konsentrasjon på 0.1 – 0.55 % i et rom. Det er ønskelig å produsere en høy konsentrasjon av CO for å oppnå en potensiell eksplosiv blanding. Se på hypotesene for oppgaven der det spekuleres i at det vil bli produsert mer CO ved å redusere luft/brensel forholdet ved enten å øke brenselmasse eller redusere volum luft inne i røykkammeret. I dette eksperimentelle oppsette vil volumet til luft reduseres ved å bruke et relativt lite og tett røykkammer for å fremme CO produksjonen. Størrelsen på vekt vil bestemme grunnflaten, mens høyden til resterende utstyr legges til grunn for høyden på røykkammeret. Dermed ble mål på røykkammeret satt til 40 cm × 40 cm × 60 cm, se figur 12.

Det ble valgt å utforme røykkammeret i pleksiglass/akryl ettersom det er et materiale som er enkelt å håndtere, robust, kan bores i og limes. Det var fordelaktig å bore hullene først. Kammeret er åpent i bunnen slik at det kan tres over eksperimentet.



Figur 11: Mål på kammer.

Kammeret trenger en trykkavlaster for å lede ut trykket som oppstår ved en potensiell antennelse. Figur 12 viser trykkavlasteren montert på toppen av kammeret. Den består av en treklosse, en o-ring, og en tynn membran av papir og plast. Hensikten er å holde kammeret tett under ulming, men dersom det oppstår trykkoppbygging vil membranen sprekke og ventilere ut overtrykket. Bak papiret på figur 12 befinner det seg et tynt lag med plastfolie. Treklossen er montert med fem 5 mm skruer samt skiver og hullet i midten har en diameter på 3 cm.



Figur 12: Trykkavlaster.

3.3 Tennkilde

Under ulmingen produseres det røykgass som er oksiderbar. Det skal gjøres forsøk hvor røykgassen vil bli utsatt for en tennkilde for å undersøke mulighet for antenning. Det er foretrukket å ha en tennkilde som ikke interferer med forsøket i den forstand at tennkilden forbruker oksygenet i kammeret. Det ble derfor ikke vurdert å bruke åpen flamme. Det ble valgt å bruke en gnist som tennkilde og under designet av prototypene (se kap. 4) ble det testet ut to typer gnistgeneratorer. Den første antenningskilden var en Piezo igniter. Tennkilden er produsert av det amerikanske selskapet Channelproducts, se figur 13. Den gjør om trykkenergien om til en gnist. Den består av en kvartskrystall som deformeres når en knapp presses inn, deretter gjenoppretter krystallen sin indre struktur og det resulterer i en spenningsforskjell som føres ut til en elektrode. Elektroden er plassert ved siden av en metallflate og gnisten dannes mellom disse [31].



Figur 13: Tennkilde fra grill.

Det ble undersøkt om det var mulig å forlengede ledningene til elektrodene fra 10 cm til 5 m for å kunne oppholde seg på avstand av sikkerhetsmessige årsaker. Det viste seg at energien i gnisten ble redusert med økt motstand i lengre kabel, og en lengde på 5 cm måtte opprettholdes for å gi tilstrekkelig energi, se figur 13.



Figur 14: Spark igniter. Figuren er hentet fra sparkfun [32].

I forbindelse med utvikling av prototypene og preliminnære forsøk ble det observert at piezo igniteren ikke antente røykgassene i kammeret. Det ble derfor bestemt å skifte ut piezo igniteren med en gnistgenerator fra Sparkfun. Det er en type transformator som kan generere gnist opp til 1.27 cm lang. Generatoren kan brukes i en «taser» og må håndteres forsvarlig. Den røde og hvite kabelen nederst på figur 14 kobles til en strøm kilde (maks 5V, 3A), gnisten dannes mellom de røde ledningene [32]. Det har ikke vært ønskelig å teste MIE (minimum ignition energy) ettersom det er satt mål på å oppnå antennelse. Derfor har det vært fokusert på å ha en kraftig gnist.

3.4 Varmekilde

Varmekilden vil bli brukt for å starte ulmingen og plasseres i bunn av forsøket. Antennelsestemperaturen avhenger av partikkelstørrelse i brenselet, fuktinnhold, luftgjennomstrømning og hvor dypt varmekilden ligger [1]. I alt ble det utprøvd 4 forskjellige varmekilder. Først ble det brukt en 150 W loddebolt fra Meec, se figur 15. Sikringen i loddebolten utløste ettersom loddebolten ble overopphetet når den ble plassert i brenselet. Deretter ble det utprøvd loddebolt med en effekt på 30 W, som viste seg å ha for liten effekt til å danne ulmebrann. Den tredje varmekilden var en motstandstråd tvunnet rundt en glassbit. Tråden ga ønsket temperatur, men var tynn og knakk i stykker ved høy temperatur over lengre tid.



Figur 15: T.V Loddebolt fra Meec, T.H Loddebolt fra biltema.

Til slutt ble det brukt varmetråder fra en brødrister, se figur 16. En brødrister som besto av tre vegger med varmetråder ble demontert og koblet til en spenningskilde. Det ble målt temperaturer opp imot 400 °C på overflaten ved en spenning på 60 V / 3 A. En kraftigere spenningskilde ga 110 V, 5.1 A og temperatur opp imot 600 °C. Ved bruk av enda høyere spenning / strøm gikk varmetrådene i stykker. Varmetrådene var pålitelige, enkle å bruke og startet ulmingen relativt fort. De ble først koblet til med plastklyper, men ble senere byttet ut med robuste «krokodilletenner» i metall.



Figur 16: En demontert brødrister.

3.5 Brensel

Det er ønskelig å teste ulike brensel for å se om det påvirker resultatene. Stoff har forskjellige forbrenningsvarme, samtidig er det andre egenskaper som spiller inn som partikkelstørrelse, fuktinnhold og overflate [12]. Det ønskes å bruke dagligdagse stoffer for å øke bevisstheten om deres brannfarlige egenskaper. Dermed skal det gjøres forsøk med:

- Spon
- Bomull
- Trepellets
- Mel

3.6 Materialelegenskaper

Oppsette består av materialer som metall, akrylplast og robax som egner seg for høy temperatur og fukt.

3.6.1 Akrylplast

Akrylplast er et samlebegrep for plast laget av akrylsyrepolymerer og metakrylsyrederivater [33]. Det går også under navnet pleksiglass. Plasten er gjennomsiktig, hard, kan limes og bores i, samt tåler en konstant temperatur på opptil 93 °C. Ved en temperatur på 126 °C kan den bøyes. Akrylplasten kan antenne og det kan dryppe brennende dråper ved 293 °C [34].

3.6.2 Robax

For å unngå kortslutning ved bruk av varmetråder fra brødristeren er det plassert et 15 cm × 15 cm robaxglass over varmekilden slik at utstyr som leder strøm ikke skal komme i kontakt med varmetrådene. Vanlig glass er ikke egnet for høy eller varierende temperatur. Robax er et spesialbehandlet glass som brukes i varme omgivelser, ofte i peiser. Robax tåler temperatur opp imot 825 °C med en eksponeringstid på opptil 5 timer. Robax er designet for å tåle temperaturforskjeller bedre enn vanlig glass [35].

3.7 Diverse utstyr

Forsøkene tar i bruk diverse utstyr som datalogger, spenningsregulator, termoelementer og gassensorer.

3.7.1 Datalogger

Forsøkene skal registrere temperaturen kontinuerlig. I denne oppgaven ble det valgt å bruke termoelement av type K. Termoelementene og sensorene er koblet til dataloggeren. Dataloggeren, se figur 17, konverterer analoge signaler om til digitale. Loggeren er koblet til en datamaskin som behandler de digitale signalene i et program. Programmet kan bestemme «datainnsamlingsfrekvens» og det lagrer all data i dat-filer.



Figur 17: Datalogger.

3.7.2 Spenningsregulator

Varmekilden ble koblet til en spenningsregulator som kan regulere valgfri spenning og strøm, se figur 18. Ved bruk av høy spenning/strøm vil utstyret bli ødelagt, derimot oppnås det ingen

ulmebrann ved lav spenning/strøm. Det viste seg at en strøm på 5.1 A og en spenning på 110 V var ideell for utstyr og ulmeforhold.



Figur 18: Spenningsregulator.

3.7.3 Gassensorene

Det er ønskelig å detektere CO, CO₂, O₂ og VOC under forsøkene. Sensorene ble bestemt ut ifra pris, deteksjonsområde og størrelse. Sensorene er bestilt fra FIGARO. Sensorene skal monteres øverst i kammeret ettersom det ble detektert høyest verdi av CO rett under taket i en boligbrann, se kapittel 2.7. Det viste seg å være få leverandører som kunne levere sensorer med høyt deteksjonsområde for CO.

Tabell 3: Deteksjonsområdet for sensorene.

Sensor	Type	Deteksjonsområdet (PPM)
CDM4160-H00	CO ₂	400 - 45,000
TGS5342	CO	0 - 10,000
SK-25F	O ₂	0 – 300,000

CO₂ – Sensor

Figur 19 illustrerer CO₂-detektoren montert på et integrert kretskort. Gitteret på selve detektoren er detektoråpningen der eksponering av røykgass detekteres. Detektoren trenger en forsyningsspenning på +5 V på pinn 1 i forhold til referansen 0 V på pinn 5. Utsignalet V_{CO₂} ut

sitter på pinn 2 og er proporsjonal med den eksponerte CO₂ verdien [36]. Se ligning 4 for bestemmelse av CO₂ konsentrasjon ut ifra spenningssignal.

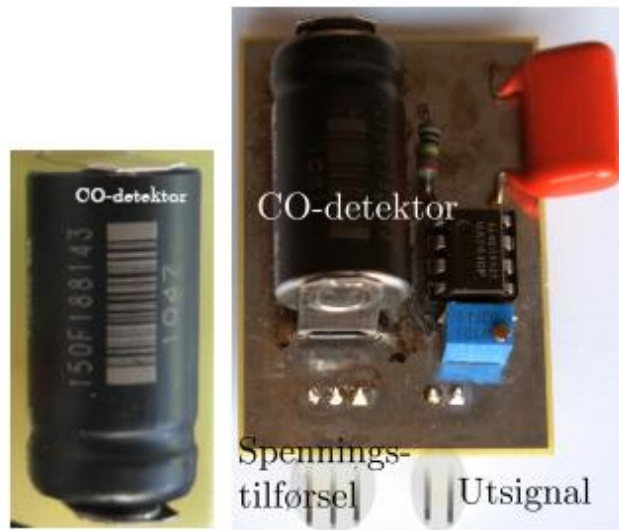


Figur 19: CO₂ detektor av type CDM4160-H00. Pinn 1 – 5 er plassert nederst på figuren fra venstre til høyre [37].

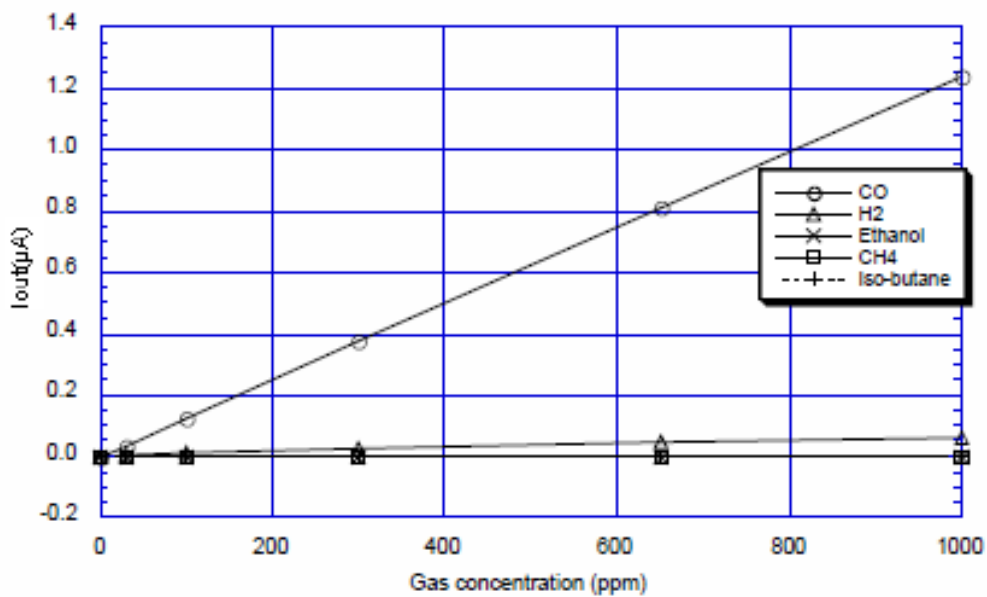
$$\text{CO}_2 \text{ [ppm]} = \frac{10000 \text{ ppm}}{v} \times V_{\text{CO}_2 \text{ ut}} \quad [\text{Lig. 4}]$$

CO – Sensor

CO detektoren er en elektrokjemisk detektor, se figur 20. Den gir en elektrisk strøm som er proporsjonal med eksponert konsentrasjonen CO ved konstant temperatur. CO konsentrasjonen kan bestemmes ved hjelp av regresjonsligning eller grafisk [38]. Figur 21 illustrerer at strømmen ut korrelerer med konsentrasjonen av CO. Gasser som H₂, etanol, CH₄ og isobutan påvirker også sensoren, men det antas at disse gassene ikke oppstår under ulmeforsøkene. Produsent har oppgitt ligning 5 for bestemmelse av CO konsentrasjon. Ved å løse ligningen med h.h.t. CO [ppm] og sette inn verdiene for a og b, kan en bestemme CO konsentrasjonen. Temperaturen påvirker utgangssignalet og det korrigeres for ut ifra ligning 6.



Figur 20: CO detektor av type TGS5342 slik sensoren ble bestilt T.V. Montert på en trykt strømkrets med elektronisk nettverk for signaltilpassing T.H [37].



Figur 21: Bestemmelse av CO konsentrasjon grafisk [38].

$$I_{ut} [A] = a [\mu A/PPM] * konsentrasjon CO[PPM] + b [\mu A]$$

[Lig. 5]

$$a = 0,001234 \mu A/PPM$$

$$b = 0,007445 \mu A$$

$$R2 = 0,9999$$

Dette gir følgende:



$$CO [PPM] = \frac{I_{ut}[\mu A] + 0,007445[\mu A]}{0,001234 [\mu A/PPM]}$$

Ved temperaturkorrigering:

↓

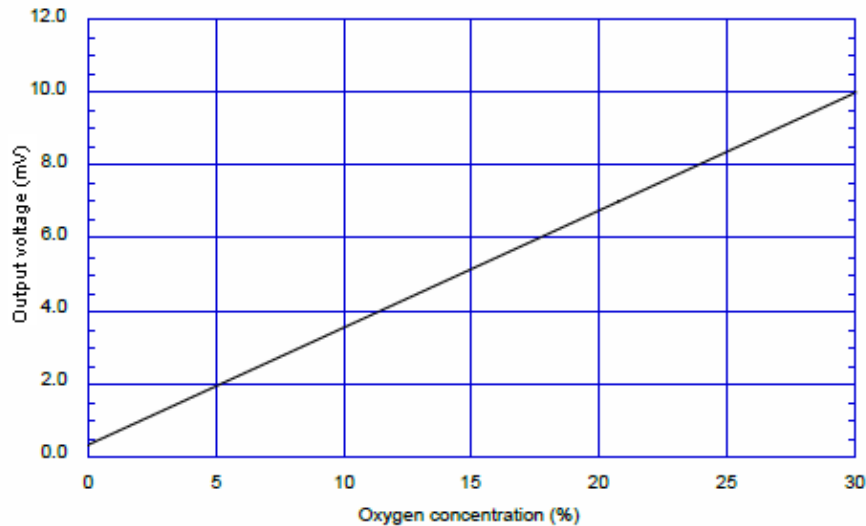
$$CO[ppm] = \frac{I_{korrigert}[\mu A]/I_{ut}}{4,845 \times 10^{-5} [^{\circ}c^{-2}] \cdot (T [^{\circ}c])^2 + 6,245 \times 10^{-3} [^{\circ}c^{-1}] \cdot T [^{\circ}C] + 0,8878} \quad [Lig. 7]$$

O₂ – Sensor

Oksygendektoren illustrert på figur 22, opererer som en galvanisk celle. Oksygenet oksiderer en blyelektrode og det oppstår en spenning mellom en anode og katode som driver en strøm. Ved å registrere spenningen kan en bestemme oksygenkonsentrasjonen ut ifra figur 23 eller ligning 7 [39].



Figur 22: Oksygen sensor montert på en trykt strømkrets [37].



Figur 23: Illustrerer forholdet mellom oksygenkonsentrasjon og spenning ut fra sensor [39].

$$O_2[\%] = \frac{V_{ut} - 0,3091 \text{ [mV]}}{0,3205 \frac{\text{[mV]}}{\%}}$$

[Lig. 7]

VOC – Sensor

Det tas i bruk flere ligninger for å bestemme VOC konsentrasjonen, der de mest sentrale er beskrevet i oppgaven. VOC sensoren illustrert på figur 24, er konstruert slik at dens indre motstand varierer med konsentrasjonen av organiske komponenter i luft, R_s . Motstanden er koblet i serie med en konstant motstand R_1 dermed danner disse motstandene en spenningsdeler og det måles spenning i punktet der motstandene er koblet sammen. Se ligning 8 for den målte spenningen $V_{VOC\ ut}$ [37].



Figur 24: VOC sensor montert på en trykt strømkrets med R_l og kontakter for V_h , V_l og utgangssignalet $V_{voc\ ut}$ [37].

$$V_{VOC\ ut} = \frac{R_l}{R_s + R_l} V_c$$

↓

$$R_s + R_l = \frac{R_l}{V_{VOC\ ut}} V_c$$

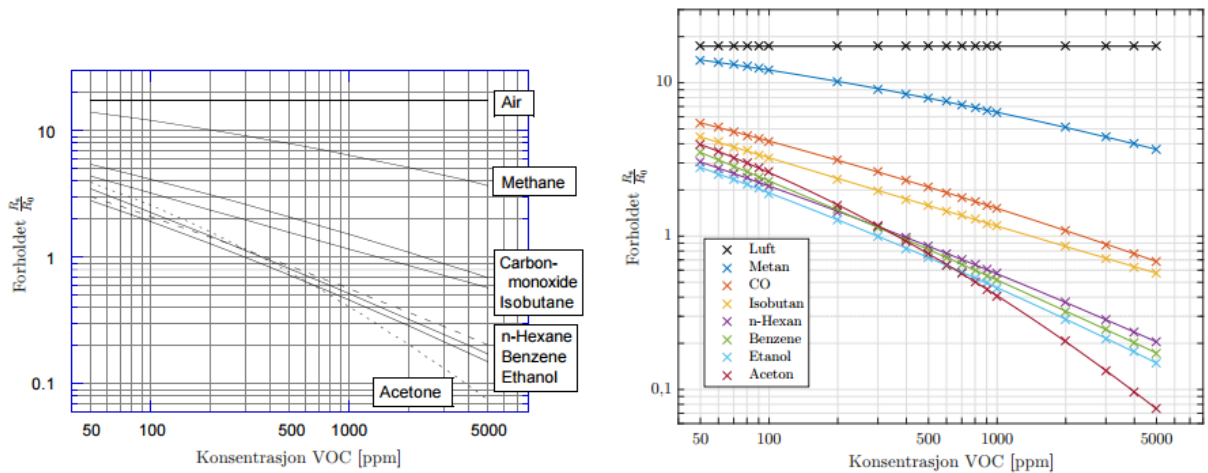
↓

$$R_s = \frac{V_c}{V_{VOC\ ut}} R_l - R_l$$

↓

$$R_s = \left(\frac{V_c}{V_{VOC\ ut}} - 1 \right) R_l \quad [\text{Lig. 8}]$$

I figur 25 er x og y-aksen på logaritmisk form og det kan observeres at kurven synker med økende konsentrasjon. Dette kan løses med et 2. ordens polynom:



Figur 25: Grafisk framstilling av sammenheng mellom konsentrasjon av ulike organiske komponenter og den indre motstand R_s . Fabrikantens målte verdier plassert sammen med regresjonslinjen.

$$\log_G \left(\frac{R_s}{R_0} \right) = a(\log_G(\text{konsentrasjon [ppm]}))^2 + b \log_G(\text{konsentrasjon [ppm]}) + c \quad [\text{Lig. 9}]$$

↓

$$\frac{R_s}{R_0} = G^{\log_G \left(\frac{R_s}{R_0} \right)}$$

↓

$$\frac{R_s}{R_0} = G^{(a(\log_G(\text{konsentrasjon [ppm]}))^2 + b \log_G(\text{konsentrasjon [ppm]}) + c)}$$

Konsentrasjonen er ukjent og skal bestemmes med å måle forholdet R_s/R_0 ved bruk av spenning ut fra sensor. Ligning 9 kan derfor skrives om:

$$\log_G \left(\frac{R_s}{R_0} \right) = \log_G \left(G^{(a(\log_G(\text{konsentrasjon [ppm]}))^2 + b \log_G(\text{konsentrasjon [ppm]}) + c)} \right)$$

↓

$$= (a(\log_G(\text{konsentrasjon [ppm]}))^2 + b \log_G(\text{konsentrasjon [ppm]}) + c) \log_G(G)$$

↓

$$= (a(\log_G(\text{konsentrasjon [ppm]}))^2 + b \log_G(\text{konsentrasjon [ppm]}) + c) \times 1$$

↓

$$= a(\log_G(\text{konsentrasjon [ppm]}))^2 + b \log_G(\text{konsentrasjon [ppm]}) + c$$

↓

$$a(\log_G(\text{konsentrasjon [ppm]}))^2 + b \log_G(\text{konsentrasjon [ppm]}) + c - \log_G\left(\frac{R_s}{R_0}\right) = 0$$

Dette er en 2. gradsligning som kan løses via abc-formelen som gir at:

$$\text{Konsentrasjon [ppm]} = G \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4a \left(c - \log_G\left(\frac{R_s}{R_0}\right) \right)}}{2a}$$

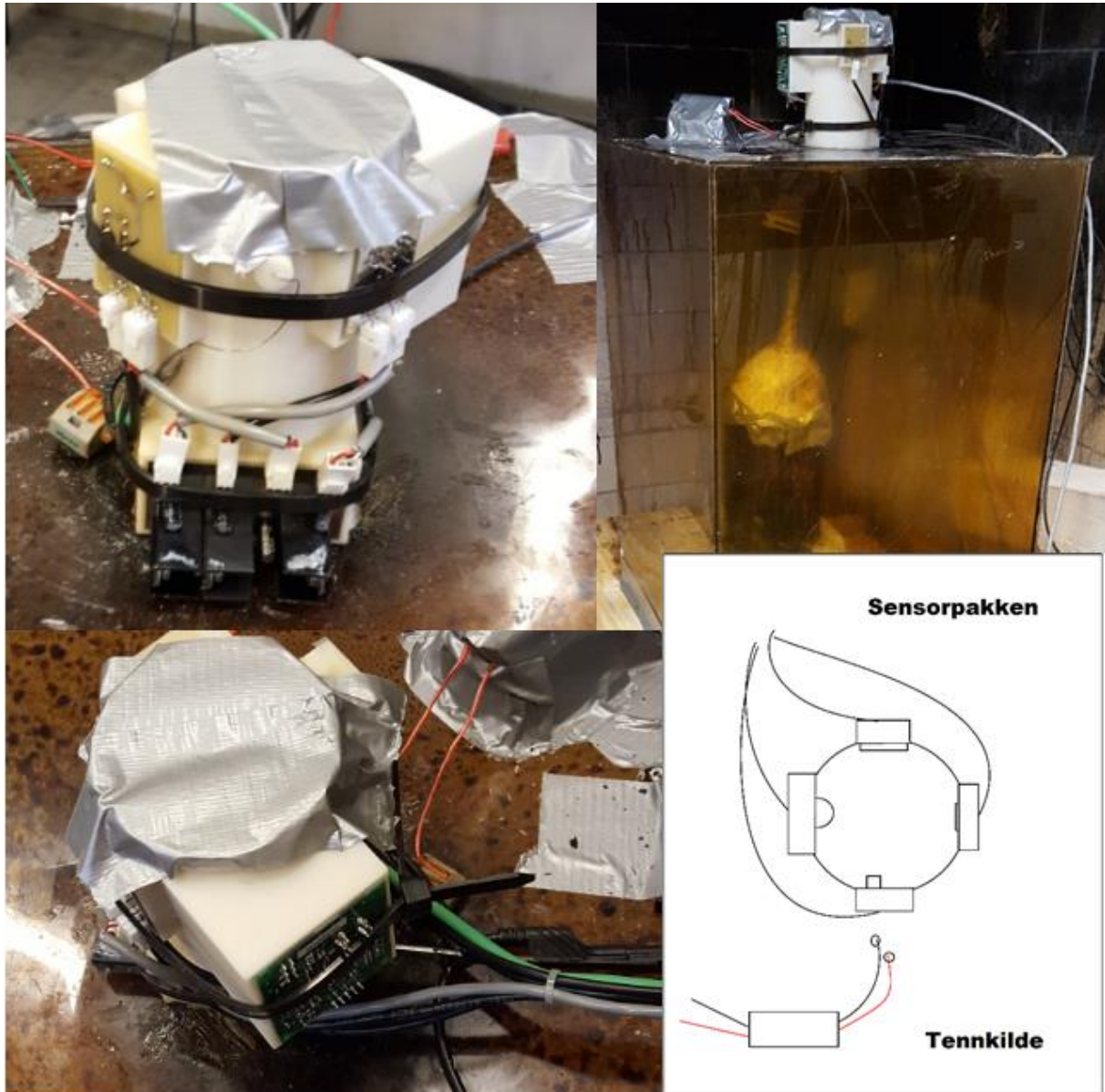
[Lig 10]

Videre ble verdiene for temperatur og fukt korrigert. Det ble også bestemt en middelvei for R_0 ved å registrere utsignal og temperatur i luft.

VOC sensoren kan detektere konsentrasjonene til ulike hydrokarboner i luft dersom det er homogene tilstander. Ettersom det er flere organiske komponenter i røykgass påvirker det sensoren. Dermed brukes VOC konsentrasjonen kun som en indikasjon på ulmeforløpet i en sammenheng med andre gasskonsentrasjoner.

3.8 Sensorpakke

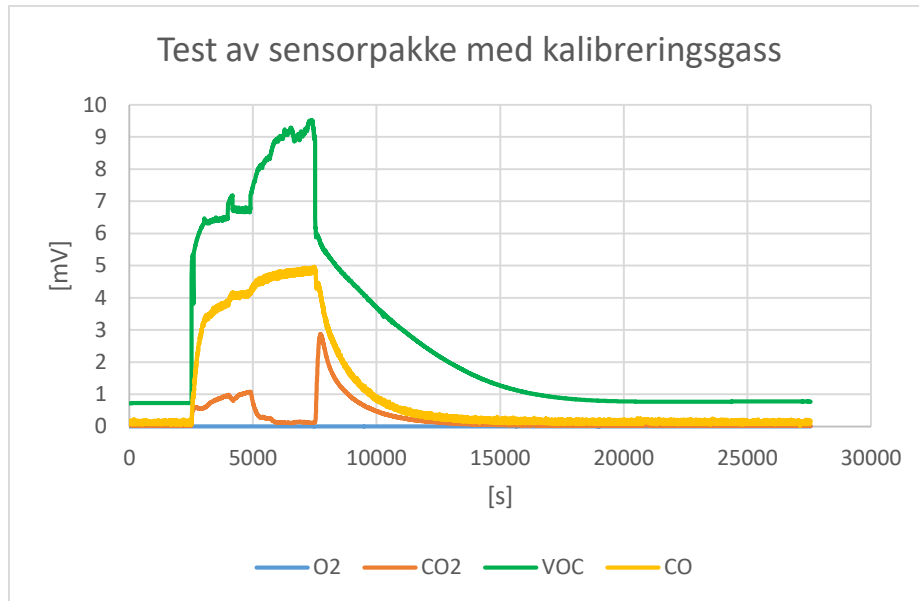
Sensorpakken består av en O_2 , CO_2 , CO og VOC sensor. De ble loddet på kretskort med gitte motstander, det ble oppnådd en ut-spenning som kan brukes for å estimere gasskonsentrasjonen. Ved bruk av feil motstand vil ligningene være ugyldige og gasskonsentrasjonene ukorrekte. Dette var en tidkrevende prosess som ble utført av Gisle Kleppe. Elektronikken er montert utover slik at den ikke eksponeres for røykgass/tjærestoffer, se figur 26. Det er plassert et termoelement i sensorpakken for å temperatur korrigere gasskonsentrasjonene. Pakken er koblet til en strømkilde og sensorene trenger to timers oppvarmingstid før de kan registrere data. Signalene ut fra sensorene kobles til samme datalogger som termoelementene. Det hvite skallet som sensorene er festet i ble 3d-printet på skolen. Toppen av sensorpakken fungerer som trykkavlaster ettersom den er hul.



Figur 26: Sensorpakken montert på røykkasse.

3.9 Kalibrering av sensorpakke

Sensorene var ferdig kalibrert av produsent, men det ble bestemt å teste sensorene opp mot en kjent kalibreringsgass. Kalibreringsgassen besto av 0.252 mol % CO, 3.01 mol % CO₂ og resterende nitrogengass. Figur 27 illustrerer resultatet fra test av sensorpakke med kalibreringsgass. Kalibreringen viste at det ikke ble oppnådd stabile utgangssignal fra sensorene. Det ble utført flere kalibreringer med tilnærmet likt resultat som figur 27, der det ble brukt ulike beholdere, volum gass og strømningshastighet for å teste om det påvirket stabiliteten. CO₂ sensoren ga høyest utslag når gasstrømmen var avslått. Det kan skyldes at gasstrømmen er kaldere og tørrere enn luft og det kan påvirke sensorens oppførsel.



Figur 27: Test av sensorpakke med kalibreringsgass.

Ut fra kalibreringsforsøkene ble det utarbeidet nye kalibreringsverdier for oksygen sensor ettersom oksygen sensoren hadde et avvik på 19.9 % i luft, dette ble korrigert for. Figur 28 illustrerer test av kalibreringsgass. Sensorpakken ligger i bunn av sylinderen og kalibreringsgassen fortrenger luften ut. Gassen ble stoppet på ca. 7500 sekund. Tabell 4 illustrerer resultatene med kalibreringsgass.

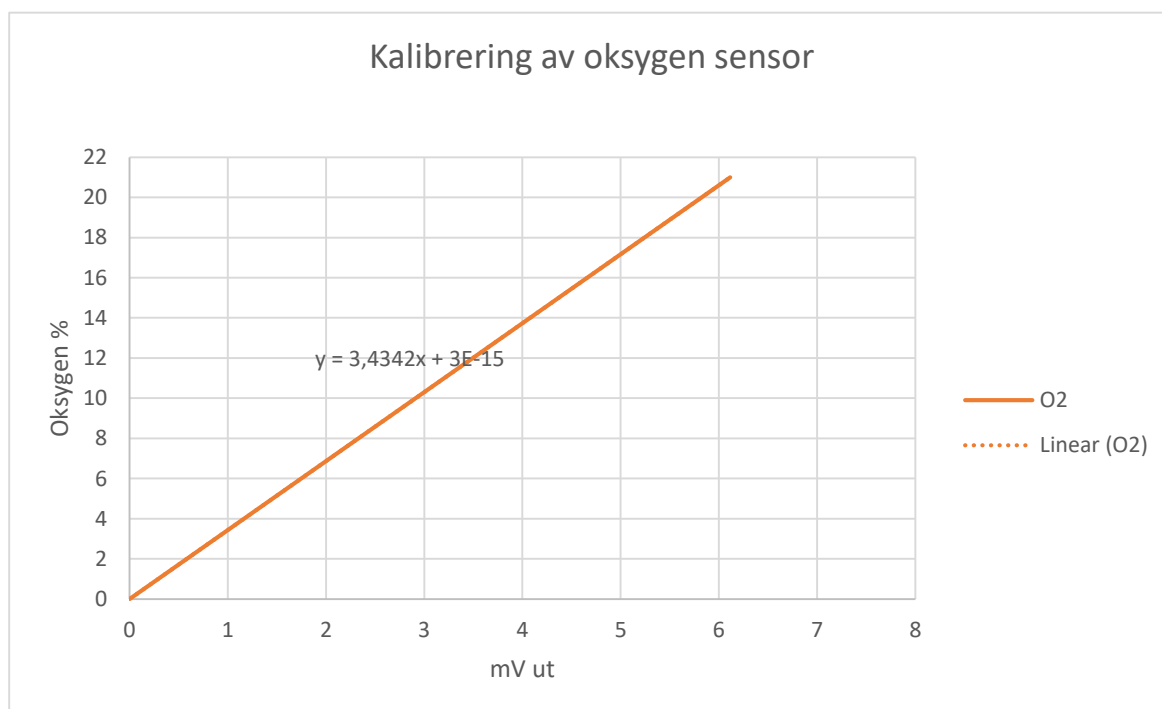


Figur 28: Test av kalibreringsgass.

Tabell 4: Test av sensorene.

Sensor	Avlesning i luft	Avlesning i kalibreringsgass	Kalibreringsgassen oppgitte innhold	Avvik [%]
CO [PPM]	64	2420	2520	3,96
O2 [%]	16,82 %	0	0	19,9
Co2 [PPM]	436	28680	30100	4,7
VOC [PPM]	3	1150000	N/A	

Oksygensensoren registrerte 6,1149 mV i luft og 0 mV i kalibreringsgass (uten oksygen). Punktene [0;6,1149] og [0;21] ble plottet i excel, ettersom det er 21 % oksygen i luft. Lineær regresjon ble bestemt grafisk, se figur 29. Ved å multiplisere 6,1149 med stigningstallet fra kurven (3,4342) gir det 21 % oksygen i luft. For å omgjøre enheten om til ppm multipliseres det med 10000. VOC sensoren ble ikke kalibrert ettersom flere gasser i kalibreringsgassen påvirker sensoren.

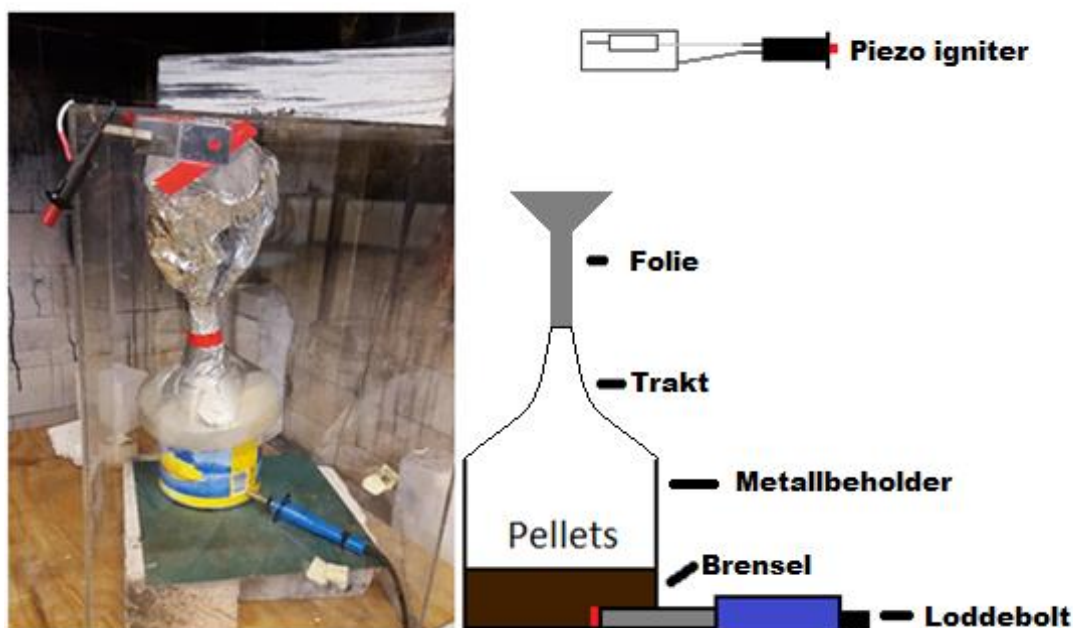


Figur 29: Kalibrering av oksygen sensor.

4 Preliminære forsøk

Dette kapittelet tar for seg utformingen av eksperimentelt oppsett. Utviklingen av forsøksoppsettet har gått via flere prototyper på grunn av forhold som er oppdaget i løpet av de preliminare forsøkene. Det har blitt utført flere preliminare forsøk der de med interessante resultat er tatt med i oppgaven. I alt er det utviklet 4 prototyper til forsøksoppsett.

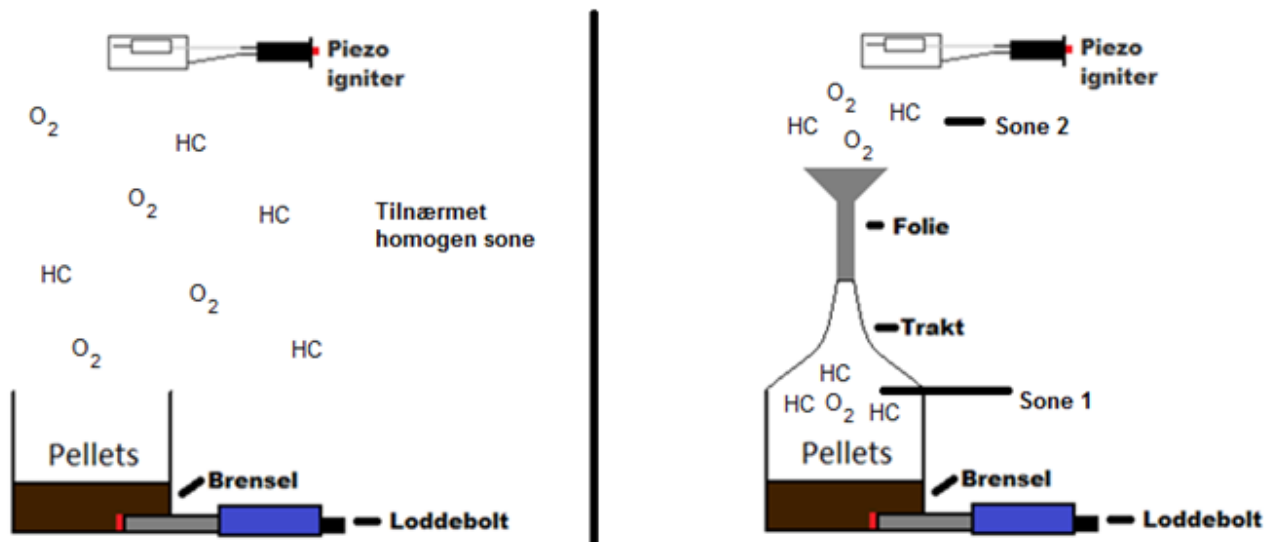
4.1 Oppsett 1: Loddebolt og Piezo tennkilde



Figur 30: Oppsett 1.

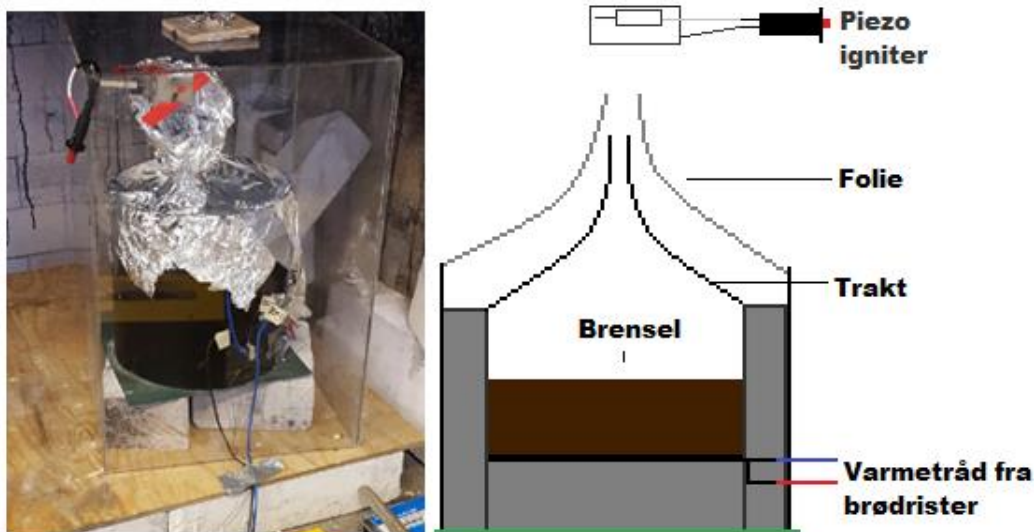
Oppsett 1 besto av en trakt, metallbeholder, trepellets, loddebolt, aluminiumsfolie samt piezo igniter, se figur 30. Det ble observert kraftig røykproduksjon men det ble ikke påvist antenning av oksiderbar røykgass. Det ble brukt en loddebolt på 150 W som varmekilde, men den ble ødelagt pga. dårlig nedkjøling. Det ble senere brukt en loddebolt på 30 W som ikke i stand til å starte ulmebrannen. Det ble derfor bestemt å endre type varmekilde. Under forsøket ble det brukt 800 gram pellets som produserte store mengder vann og det ble observert betydelig mengder uforbrent materie. Av den grunn ble mengde brensel redusert til mellom 60-570 gram og varierte for de ulike brenselstypene.

En hypotese for oppgaven er at bruk av trakt og folie vil øke antenningsmuligheten slik figur 31 illustrerer. Designet har som mål å påvirke blandingsforholdet til røykgassen slik at den er i eksplosjonsområdet, se figur 8 i kapittel 2.6.3. Hypotesen går ut på at forsøket deles opp i ulike soner der sone 1 inneholder høy konsentrasjon av oksiderbar røykgass i et oksygenfattig miljø (rich), mens sone 2 inneholder høyere verdier for oksygen (lean). Lavere verdier for oksygen vil motvirke overgang til flammebrann som er ønskelig i eksperimentet ettersom det ønskes å produsere oksiderbare gasser og ikke CO₂. Utløpet av folie er plassert ved siden av tennkilden slik at høy konsentrasjon av oksiderbar røykgass blander seg med høyere konsentrasjon av oksygen som øker antenningsmulighetene.



Figur 31: Illustrerer hypotesen om økt antenningsmulighet ved bruk av folie og trakt.

4.2 Oppsett 2: Varmetråd og Piezo tennkilde



Figur 32: Oppsett 2.

Oppsett 2 besto av varmetråder fra brødrister, trakt, pellets, aluminiumsfolie og piezo igniter, se figur 32. Inne i beholderen var det plassert murblokker for å redusere bruken av brensel, samt skille metallflater fra varmekilden for å hindre kortslutning. Pelletsene var plassert på en 10 cm × 10 cm grunnflate stablet i en høyde på 9 cm. På toppen av murblokkene var det plassert en trakt som skulle samle og føre gassen ut til tennkilden ved hjelp av aluminiumsfolie. I metallbeholderen var det plassert 4 termoelement på henholdsvis 0.5, 3, 6 og 9 cm fra varmekilden. Varmetrådene var koblet til en spenningsregulator med maks 3 A og en spenning på 50 volt. Det var en risiko for at termoelementene kom i kontakt med varmetrådene.

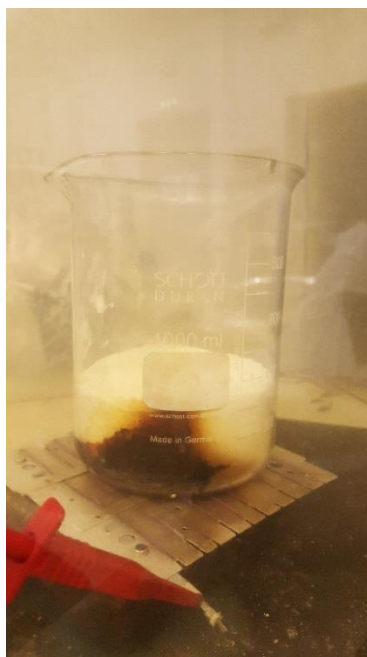
Det ble observert røykproduksjon etter 10 minutter og etter 15 minutter var det tykk hvit røyk i hele kammeret. Det ble oppnådd antenning/puff etter 18 minutter, deretter brant det videre i 2 minutter. Ved å oppnå puff betraktes det som å oppnå et lite smell der flammen propagerer gjennom røykkammeret. Brannen måtte slukkes for å bevare utstyret, se høyre bilde på figur 33 der kammeret buler ut. Dette oppsettet ga den første antenningen av oksiderbar røykgass.



Figur 33: Antenning av røykgass.

Figur 33 illustrerer flammen fra åpning på aluminiumsfolie. Gassen brant helt tett opp under kammeret og det ble registrert knitrelyder fra brannen. Det ble tilført frisk luft til kammeret og forsøket fortsatte. Det ble observert seks antenner mens forsøket pågikk, etter tilsatt frisk luft. Antennene ble tent i bunn og topp med både lighter og piezo igniter. Det første puffet ble iverksatt av selve ulmingen og trengte ikke en ekstern tennkilde.

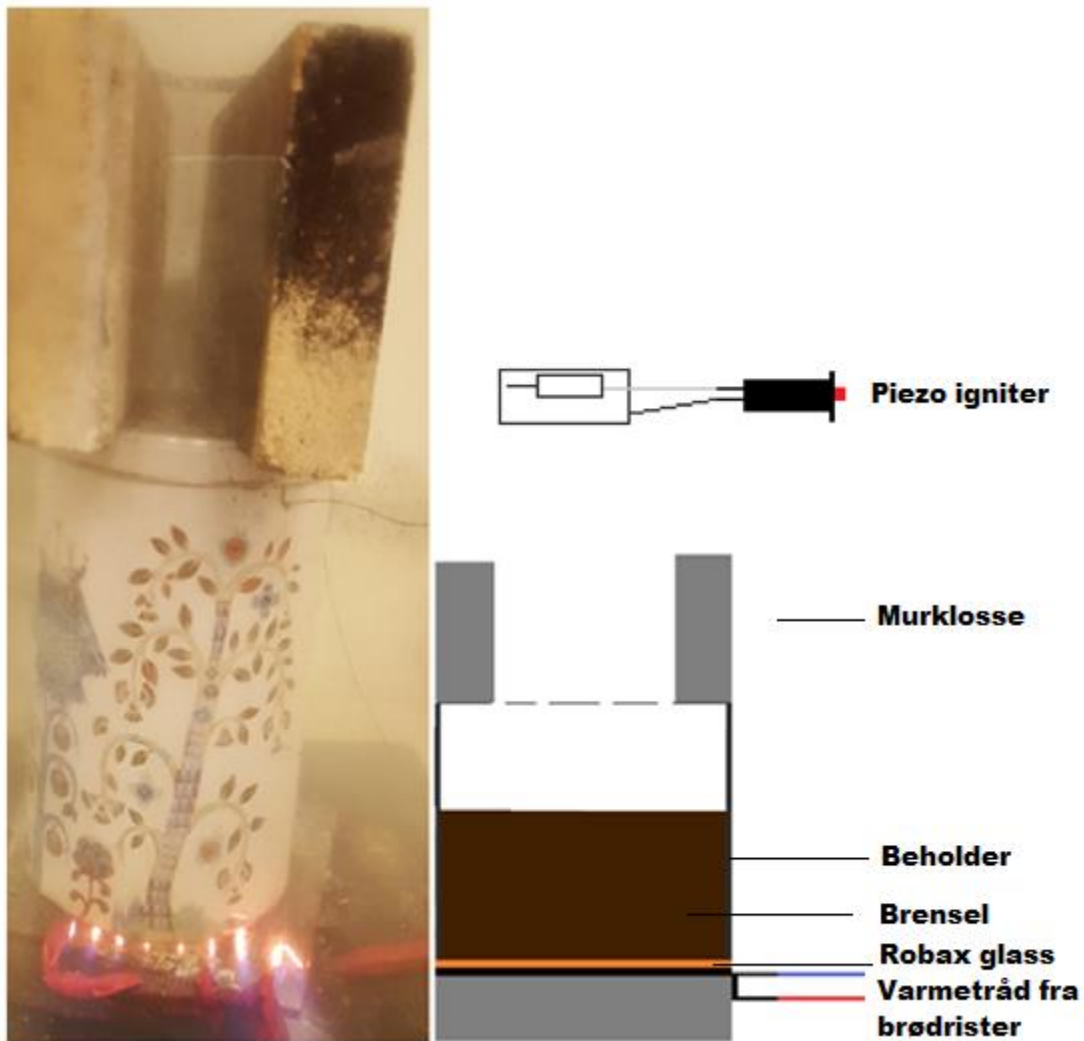
Det viste seg at trykkavlasteren var overdimensjonert ettersom en bit med sølvteip var tilstrekkelig. Piezo igniteren var delvis vellykket, mens varmekilden fungerte utmerket. Det nye oppsettet medførte et nytt problem, fare for kortslutning. Det var problematisk å plassere murblokkene i eksakt samme posisjon dermed kvalifiserer ikke oppsettet mht. repeterbare forsøk.



Figur 34: Illustrerer ulming av mel som propagerer ujevnt på et horisontalt plan.

Det ble utført et forsøk med mel i et begerglass for å registrere ulmeforløpet samt undersøke om varmetrådene kunne starte en ulmebrann igjennom en glassflate. Ved å skille varmetrådene og brenselet med en glassflate reduserer man faren for kortslutning. Det var også ønskelig å se om andre brensel kunne avgi oksiderbar røykgass under ulming. Figur 34 illustrerer ulmefronten propagerer ujevnt på et horisontalt plan. Ingen positive resultater med henhold til antenning, men melet var delvis forkullet etter en time. Begerglasset var for tykt og ujevnt til å gi ønsket varmeoverføring, i tillegg knuste glasset i slutten av forsøket. Dermed ble det bestilt et spesialbehandlet glass (robaxglass) fra glass og låsservice. Robaxglasset skal brukes mellom varmetrådene og brensel, det er kvadratisk på 15*15 cm.

4.3 Oppsett 3: Varmetråd og piezo igniter



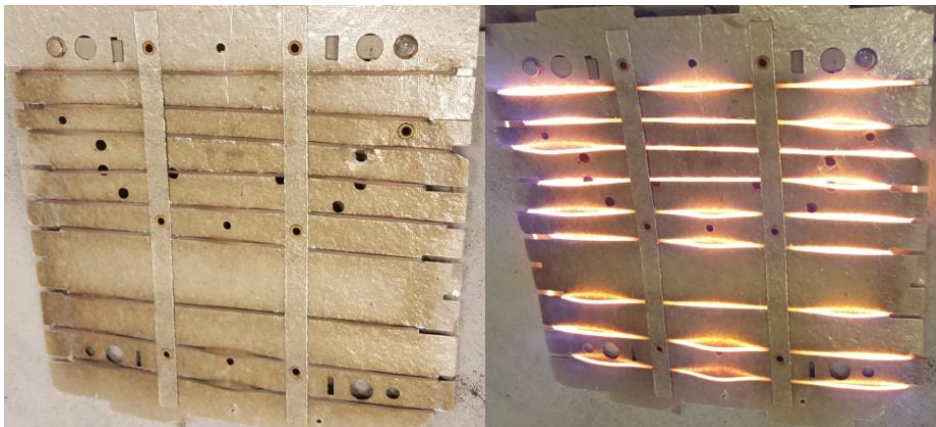
Figur 35: Oppsett 3. Hull i topp av beholder indikeres med stiplet linje.

I dette oppsette ble det brukt mel som brensel og hensikten med oppsettet var å avdekke behovet for å lede røyken med trakt og aluminiumsfolie til tennkilden samt øke temperaturen fra varmetrådene. For å øke temperaturen ble det koblet til en kraftigere spenningsregulator som kan generere opptil 10 A. Det ble tatt i bruk en metallbeholder for kaffepulver men en indre diameter på 10 cm for oppbevaring av brensel, se figur 35.

Det ble observert brudd i varmetrådene med en strøm på over 7-8 A. Det ble derfor valgt å bruke en spenning på 110 V med en strøm på 5 A. Figur 36 illustrerer bruken av de ulike spenningsregulatorene der bilde til venstre er koblet til en 3 A og 50 V, mens høyre side er

koblet til 5 A og 110 V. Det ble observert at forsøkene startet ulming raskere og tiden for antenning av røykgass ble redusert med ca. 8 minutter.

Det ble utført tre forsøk med oppsett 3 der det ble observert antenning av oksiderbar røykgass i et av forsøkene. Etersom det bare ble oppnådd antenning av oksiderbar røykgass på 1/3 forsøk ble det valgt og gå videre med å føre røykgassen mot tennkilden. Den kraftigere spenningsregulatoren ble brukt videre i oppsett 4 ettersom den ga positive resultater. Det ble også valgt å gå videre med metallbeholderen ettersom den var robust.



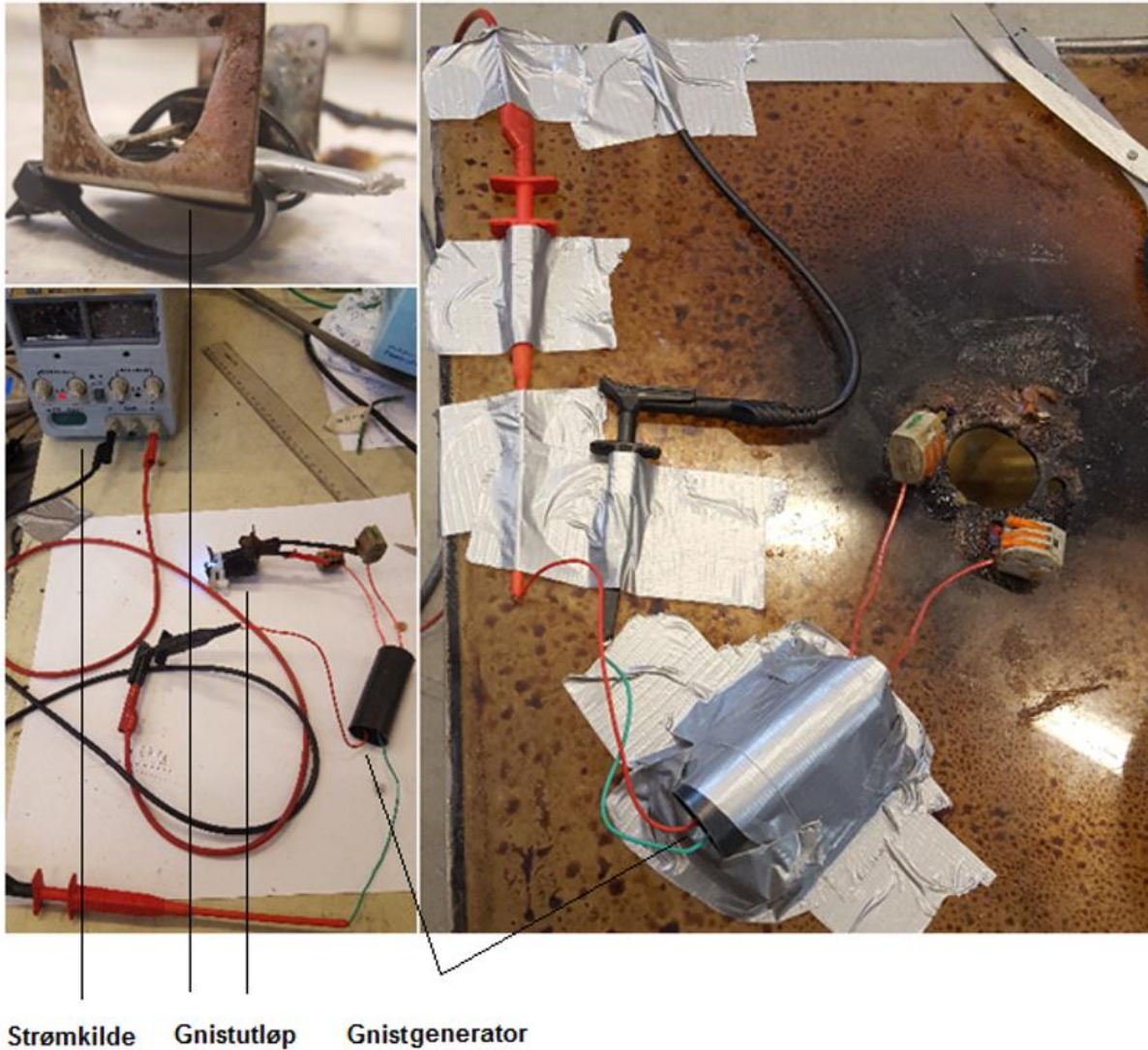
Figur 36: Varmetrådene til venstre er koblet til 3A, 50 volt. Varmetrådene til høyre er koblet til 5A, 110 volt.

4.4 Oppsett 4: Varmetråd og spark igniter

Det ble utført forsøk der røykgassen var antenbar men gnisten fra piezo igniteren ikke var kraftig nok til å antenne røykgassen. Det ble observert ved å bruke en åpen flamme som ga antenning i testforsøk der piezo igniteren sviktet. Det ble også observert motsatt trend der piezo igniteren antente en røykgass der åpen flamme sviktet. I forsøket blir det produsert tjærestoffer og fukt som reduserer gnistdannelse, samtidig er det begrenset med oksygen og oksiderbar røykgass. Det er derfor avgjørende for eksperimentet at tennkilden er pålitelig.

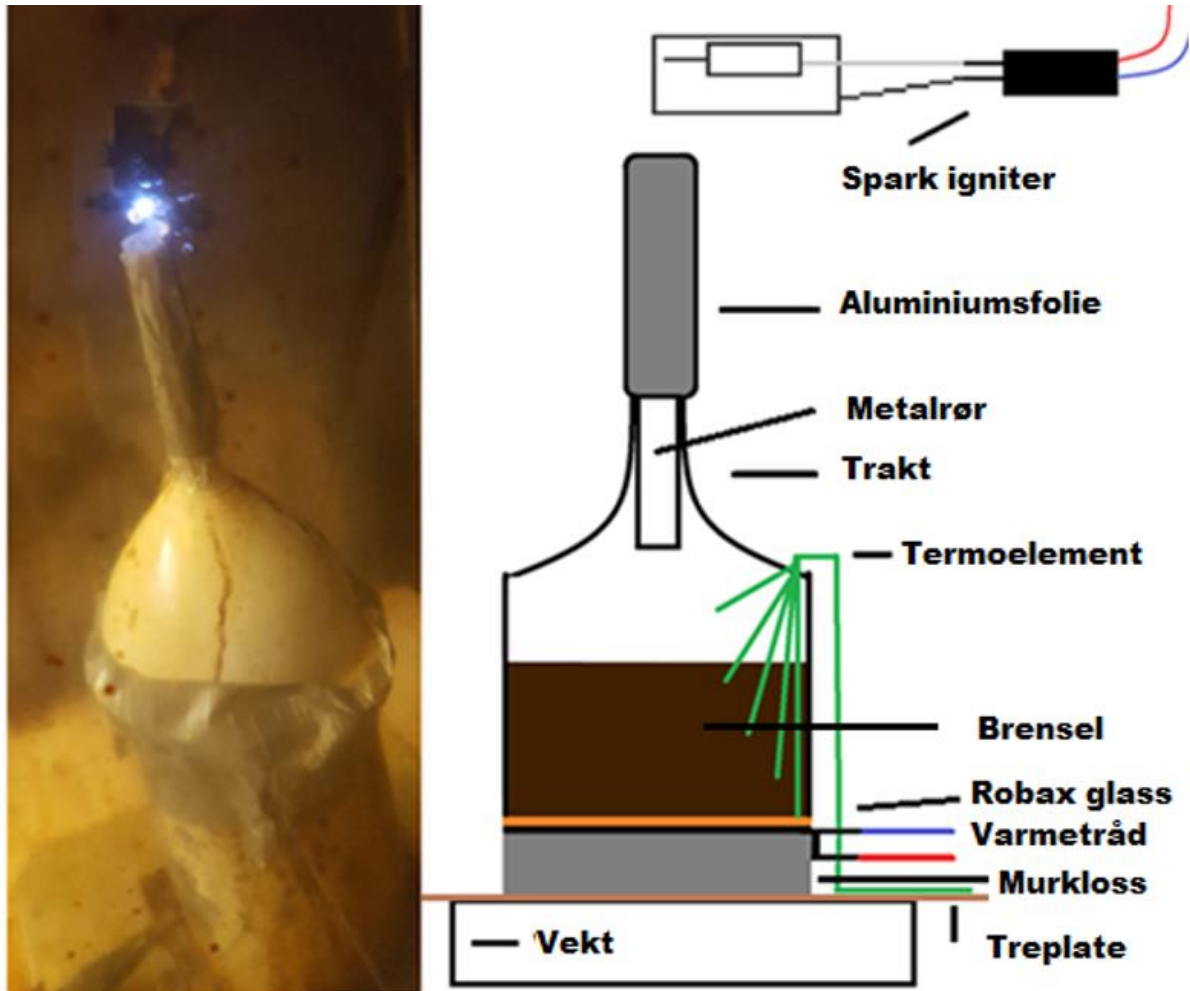
Etter flere forsøk med problematisk tennkilde ble piezo igniter byttet ut med en gnistgenerator. Generatoren kan styres manuelt på flere meters avstand fra eksperimentet og er vesentlig kraftigere. Figur 37 illustrerer gnistgeneratoren koblet i en krets og montert på røykkammeret. Den svarte sylindren er gnistgeneratoren som er koblet til en strømkilde ved rød og grønn ledning (maks 5V, 3A). Gnisten dannes mellom de røde ledningene over gnistgeneratoren.

«Gnist utløpet» fra piezo igniteren ble beholdt og modifisert som illustrert øverst til venstre ved hjelp av strips. Avstanden mellom metalldelene ble redusert til 1.5 mm ettersom det antas å fremme gnist dannelsen.



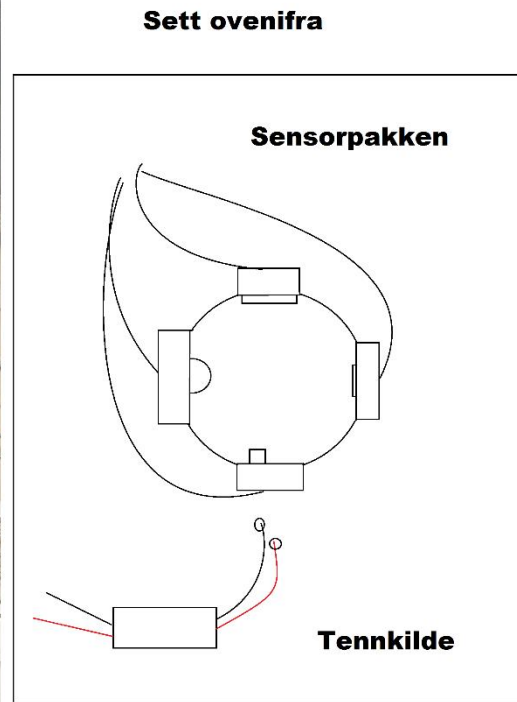
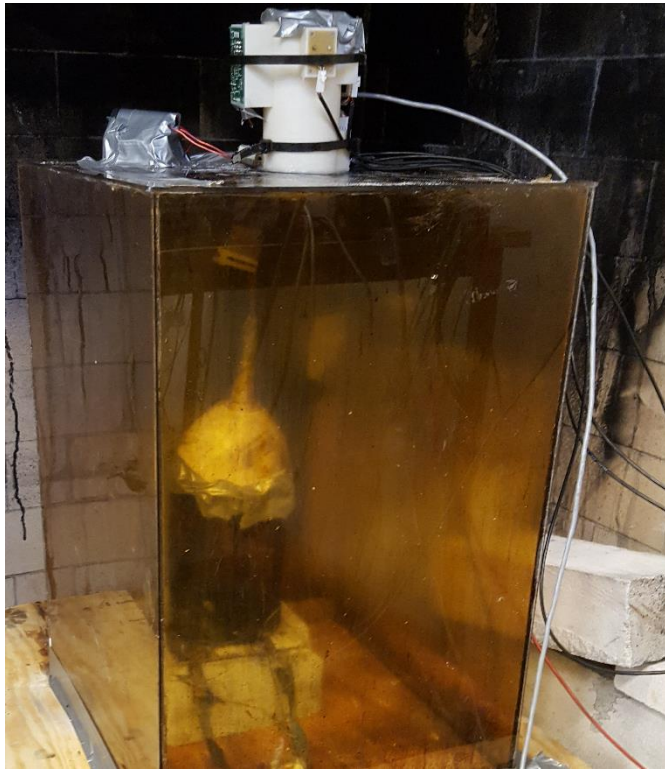
Figur 37: Modifisert tennkilde.

Gnistgeneratoren gikk i stykker etter kontinuerlig flamme i topp av røykkammeret. Det ble derfor plassert en isoporplate under gnistgeneratoren som isolasjon og det har ikke oppstått problemer med gnistgeneratoren etter det.



Figur 38: Oppsett 4, endelig oppsett.

Figur 38 illustrer endelig oppsett. Tennkilden er modifisert og flyttet til utløpet på trakten. I tidligere forsøk har trakten smeltet. For å hindre at røykgassen blir blokkert er det plassert et metallrør inne i trakten slik at røykgassen skal kunne sige ut selv om trakten smelter. Over vekten er det plassert en murkloss for å beskytte vekten termisk. Murklossen var opprinnelig 5 cm tykk, men ble senere byttet ut med en kloss på 10 cm. Det resulterte i mer stabile og fornuftige vekt vektresultater. I tillegg er det plassert en treplate mellom vekt og murkloss som har større grunnflate enn røykkammeret slik at vekten ikke kommer i kontakt med vann eller andre stoffer fra forsøket.



Figur 39: Oppsett 4 med sensorpakke.

Figur 39 illustrerer endelig oppsett med sensorpakken tilkoblet, sensorpakken er beskrevet i kapittel 3.8. De er montert slik at sensorene er eksponert for røykgass, derimot er elektronikken er montert utover for beskyttelse. I toppen på sensorpakken er det et hull som går helt ned til kammeret. Dette hullet blir teipet igjen for hvert forsøk. Dette hullet blir nå en trykkavlaster.

5 Resultat

Alle ordinære forsøk er utført i henhold til oppsett 4, beskrevet i kapittel 4.4. Det ble først gjennomført 3 forsøk av mel, pellets, bomull og spon uten sensorpakken ettersom det tok tid å få denne operativ. Videre ble det gjennomført 2 forsøk med hvert brensel med sensorpakke. Forsøkene ble stoppet etter antennelse av røykgass eller etter gjentagende forsøk uten antennelse. Antennelsesformen varierer mellom en liten kontinuerlig flamme, en avbrutt flamme, et puff og et større puff, der puff betraktes som en propagerende flammefront gjennom røykkammeret.

VOC sensoren kan detektere konsentrasjonene til ulike hydrokarboner i luft dersom det er homogene tilstander. Ettersom det er flere organiske komponenter i røykgass påvirker det sensoren. Dermed brukes VOC konsentrasjonen kun som en indikasjon på ulmeforløpet i en sammenheng med andre gasskonsentrasjoner.

I oppgaven brukes begrepet «høy temperaturutvikling» der temperaturforskjellen i ulike plan er på flere hundre grader. Ved «Lav temperaturutvikling» vil de fleste plan ha en temperatur på rundt 100 grader, men i tillegg vil det også være en høy bunntemperatur. Bunntemperatur karakteriserer temperatur i bunn av forsøket dvs. 0 cm over robaxglass.

Ettersom forsøkene utvikler seg ulikt over tid med forskjellig temperatur vil enkelte grafer av forsøkene ha ulike verdier på aksene for å lettere visualisere dems innhold der det er nødvendig. De mest interessante resultatene mht. antennelse, temperaturutvikling, produksjon av CO og CO₂ samt forsøk som skiller seg ut er beskrevet i kapittel 5, resterende figurer befinner seg i vedlegg A, B, C og D.

5.1 Eksperimentell prosedyre

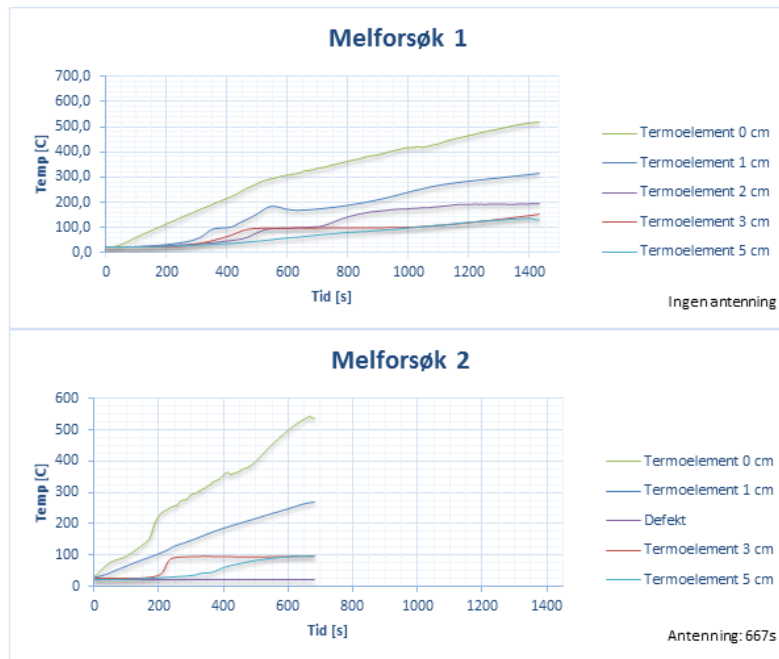
Alle forsøk ble utført i henhold til oppsett 4, Tabell 5 beskriver forsøksoppsettet. Antenningskilden for røykgass startet etter 7 min ettersom preliminare forsøk har vist at det ikke oppstår antenningsmuligheter før den tid. Gnistgeneratoren må brukes i intervaller for å unngå skader. Varmekilden er aktiv fra start til slutt og all data logges kontinuerlig med 5 sekund mellomrom. Forsøket stoppes etter antenning av røykgassen eller ved gjentatte forsøk på antennelse.

Tabell 5: Oppsett 4.

Termoelement 1	I bunn av beholder
Termoelement 2	1 cm over beholder
Termoelement 3	2 cm over beholder
Termoelement 4	3 cm over beholder
Termoelement 5	5 cm over beholder
Strømkilde til varmetråd	5.1 A, 110 V
Gnist strøm og spenning	0.5 – 3 A, 3V (må gradvis øke til 3A for å få gnistdannelse i slutten av forsøket)
Gnist intervall	Startes etter 7 min med 5 sekund intervaller
Metallbeholder til brensel	Indre diameter på 10 cm

5.2 Melforsøk

Det ble gjennomført 5 forsøk med mel, der brenselmassen varierte mellom 137 – 335 gram. I melforsøk 1 ble det brukt 137 gram mel. Observasjoner under forsøket viste lav produksjon av oksiderbar røykgass og det ble bestemt å øke startmassen for å fremme røykproduksjonen for de neste 4 melforsøkene. Under melforsøk 1 ble det observert en høy bunntemperatur, deretter varierte temperaturen oppover i brenselet. Videre ble det ikke observert antennelse i melforsøk 1 og forsøket ble avsluttet etter synkende røykproduksjon. Det var store forskjeller mellom forsøkene, melforsøk 1 brukte 12.5 minutt lengre tid på å oppnå 500 grader enn melforsøk 2, se figur 40. I melforsøk 2 ble det observert et lite puff etter 11 min og 7 sekund. Bunntemperatur var 540 °C ved antennelse. Flammen migrerte ikke igjennom hele kammeret og det kan skyldes at gassblandingen ikke var homogen eller at konsentrasjonene gikk under «lower flammable limit»



Figur 40: Temperatur som funksjon av tid for melforsøk 1 og 2. Observerte en defekt i termoelement 3 i melforsøk 2.

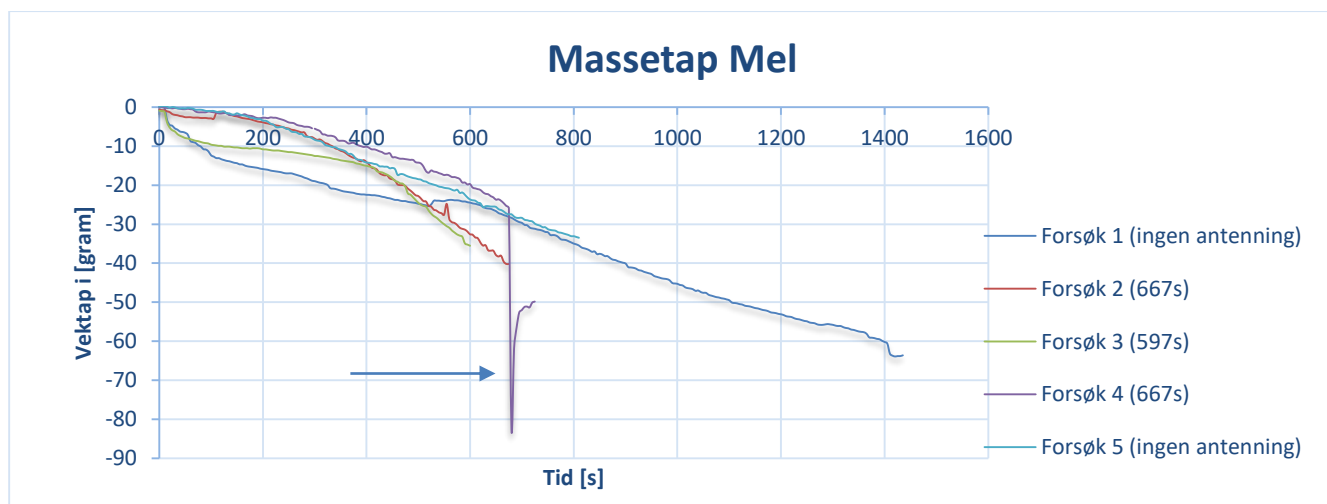
Melforsøk 2 og 3 har lik temperaturutvikling bortsett fra termoelement 1 i melforsøk 3, se vedlegg A. Det ble observert relativt lik antenningstid i melforsøk 2, 3 og 4 med en variasjon på ca. 1 minutt. Temperatur ved varmekilde ved antenning i forsøk 3 ble registrert til 283 °C og 489 °C i forsøk 4. Det ble observert at varmetrådene er plassert slik at temperaturen på robaxglasset ikke er finfordelt. Samtidig kan det spekuleres i om termoelementet kan forflytte seg under forsøket ettersom det ble registrert ca. 200 °C lavere temperatur i melforsøk 3. I melforsøk 5 ble det ikke observert antennelse av oksiderbar røykgass og forsøket ble avsluttet etter 810 sekund ettersom produksjonen av røykgass avtok.

Alle melforsøk bortsett fra melforsøk 1 produserte så mye røykgass at det var vanskelig å observere utstyret i røykkammeret. I melforsøk 4 og 5 ble sensorpakken tatt i bruk og for begge forsøk ble det registrert konsentrasjoner av CO₂ over 45000 ppm etter henholdsvis 310 og 400 sekund. Videre ble det registrert CO konsentrasjoner over 10000 ppm etter henholdsvis 465 og 640 sekund. Ettersom det ble produsert mer CO₂ (maks verdi 45000 ppm) og CO (maks verdi 10000 ppm) enn hva sensorene kan detektere, blir tiden for å oppnå maksverdi for sensorene registrert i tabell 6. Det at sensorenes kalibreringsgrenser blir overskredet er et av forholdene som må utbedres med oppsett 4, se kapittel 8 for videre arbeid.

Verdier som vekt, antenningstid, antenningens form og gassmålinger er oppgitt i tabell 6. Høyest oppnådd gasskonsentrasjonene ble registrert i tabellen foruten om O₂ der den laveste verdi ble brukt.

Tabell 6: Resultat fra melforsøk.

Forsøk	Start masse [gram]	Antennings tid [s]	Antennings form	CO2 [PPM]	O2 [%]	CO [PPM]	VOC [PPM]	Tid for oppnådd maks verdi av deteksjonsområdet til CO sensor [s]	Tid for oppnådd maks verdi av deteksjonsområdet til CO2 [s]
Mel 1	137.1	Ingen antenning	Ingen antenning	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Mel 2	332.6	667	Puff						
Mel 3	334.9	597	Svak flamme						
Mel 4	310,2	667	Større Puff	45000 +	19,7	10000+	680 000	465	400
Mel 5	330,4	Ingen antenning	Ingen antenning	45000 +	20,6	10000+	460 000	640	310

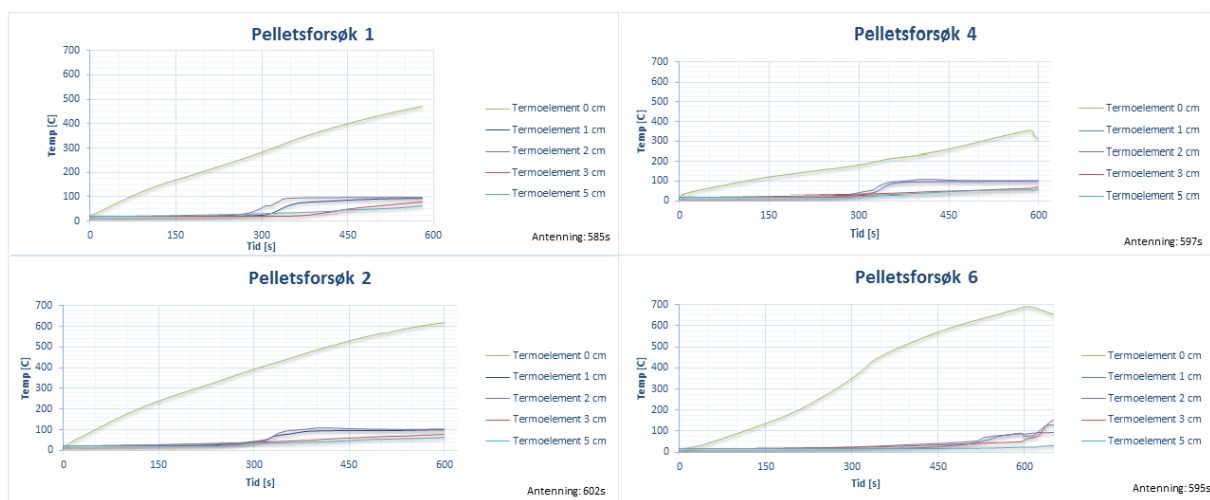


Figur 41: Illustrerer massetap som funksjon av tid for melforsøkene. Tallene i parentes viser tid for antenning av røykgass. Pil illustrerer vektforstyrrelse ved antenning av røykgass.

Figur 41 illustrerer massetapet som funksjon av tid for melforsøkene. Vektresultatet kunne ha blitt framstilt med start og sluttmasse for de ulike forsøkene, men det ble valgt å plote massetapet for å lettere å sammenligne resultatet ettersom alle kurvene starter i samme punkt. Figuren illustrerer et relativt konstant massetap og ingen tegn økt massetapsrate som kunne ha indikert overgang til flammebrann. I forsøk 4 ble det observert et større puff ved 667 sekund som korrelerer med duppet på lilla kurve merkert med pil i figur 41.

5.3 Pelletsforsøk

Det ble utført 6 pelletsforsøk ettersom det oppsto feil med CO₂ sensoren i pelletsforsøk 4 og 5. Foruten om problemer med vektresultatet i forsøk 3 og 4 og sensor var pelletsforsøkene de mest vellykkede der det ble observert antenning av oksiderbar røykgass i alle forsøk. Startmassen varierte mellom 540 – 570 gram og det ble produsert store mengder røykgass. Startmassen ble derfor i henhold til det ikke endret. Pelletsforsøkene 1-2 og 4-6 hadde lav temperaturutvikling med en høy temperatur i bunn og vesentlig lavere temperatur i topp av eksperimentet, se figur 42. Figur 42 viser at temperaturen ikke øker i de øvrige plan før etter 300 sekund.



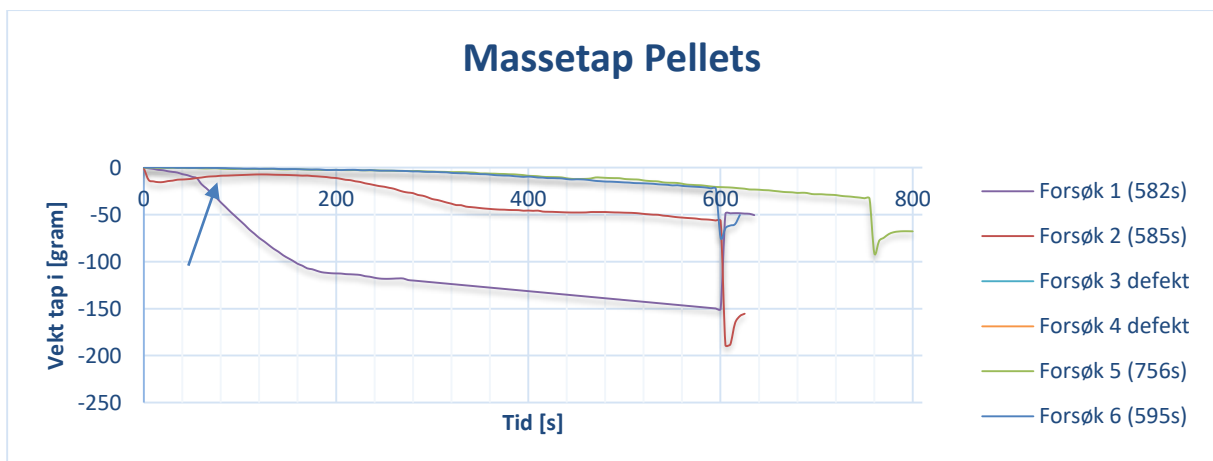
Figur 42: Temperatur som funksjon av tid for pelletsforsøk 1, 2, 4 og 6.

Det ble observert et større puff i pelletsforsøk 1 etter 9 min og 45 sekund med en bunn-temperatur på 475 °C og det brant videre i 40 sekunder. I forsøk 2 oppsto det en stabil flamme etter 10 min og 2 sekund med en bunntemperatur på 625 °C. Etter 18 sekund propagerte flammen gjennom hele kammeret som inneholdt tykk gul røyk som forsvant etter antenningen.

I forsøk 3 ble det observert et puff som propagerte gjennom hele røykkammeret etter 10 min og 17 sekund med en bunntemperatur på 325 °C. Det ble observert et større puff i pelletsforsøk 4 etter 9 min og 57 sekund med en bunntemperatur på 350 °C. I pelletsforsøk 5 og 6 ble det observert større puff etter henholdsvis 756 og 595 sekund ved en bunntemperatur på 400 og 700 °C. Temperaturen i bunn av beholder var en av de større ulikhetene for pelletforsøkene som kunne variere med ca. 400 °C.

CO₂ sensoren var operativ under kalibrering, men sviktet under forsøk 4 og 5. Pelletsforsøk 4, 5 og 6 ga CO konsentrasjoner over 10000 ppm etter 375, 510 og 525 sekund. Forsøk 6 ga CO₂ konsentrasjoner over 45000 ppm etter 610 sekund.

Figur 43 illustrerer massetapet i pelletsforsøkene som varierer mellom 35 – 150 gram. Duppen i slutten av grafene korrelerer med observasjonen av «større puff». I forsøk 2 øker massen mellom 30 – 100 sekund illustrert med pil på figur. Det kan skyldes temperatur eller magnetiske forstyrrelser på vekt.



Figur 43: Illustrerer massetap som funksjon av tid for pelletsforsøk. Tallene i parentes viser tid for antennelse av røykgass.

Verdier som vekt, antenningstid, antenningsform og gassmålinger er oppgitt i tabell 7. Høyest oppnådd gasskonsentrasjonene ble registrert i tabellen bortsett fra O₂ der den laveste verdi ble brukt.

Tabell 7: Resultat fra pelletforsøk.

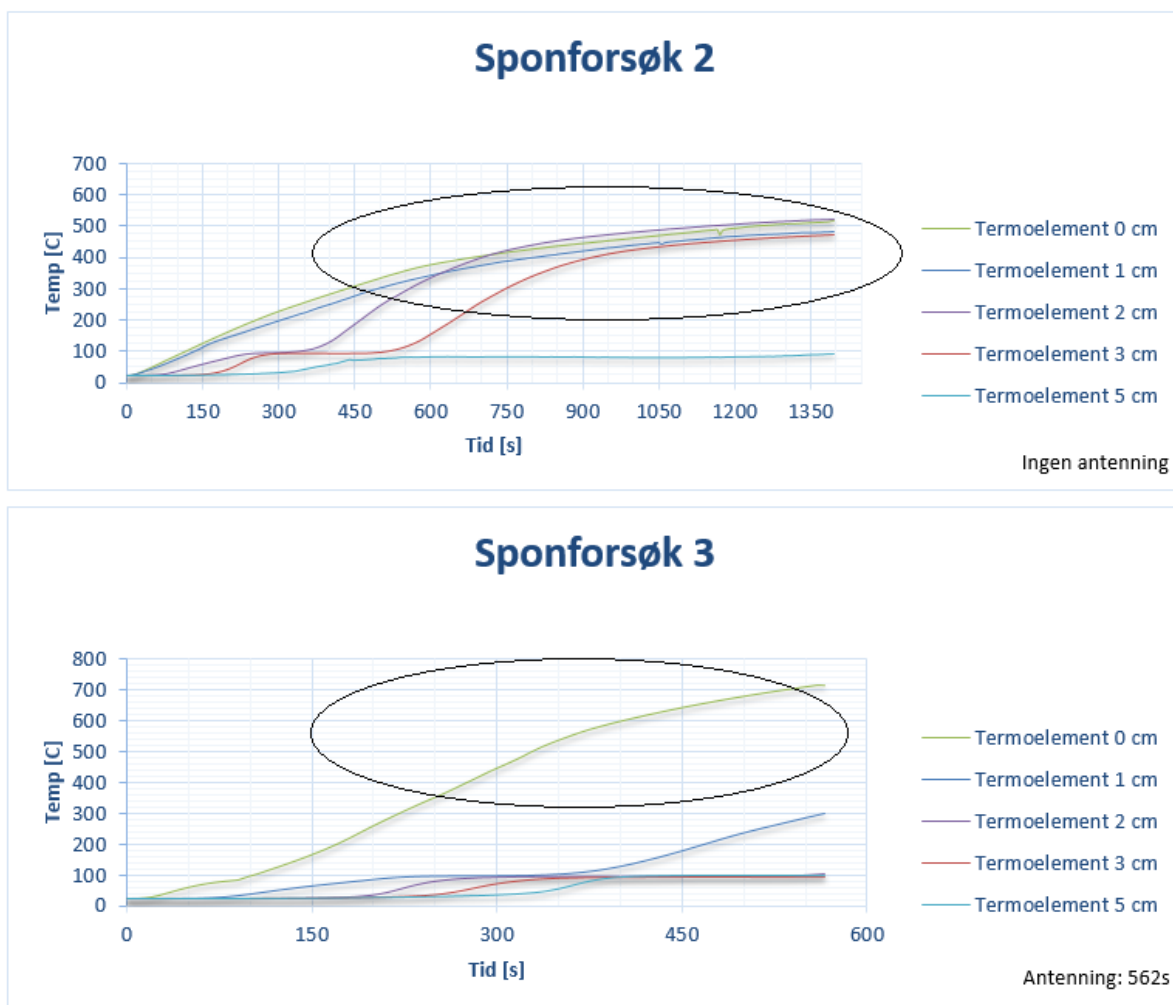
Forsøk	Start masse [gram]	Antennings tid [s]	Antennings form	CO2 [PPM]	O2 [%]	CO [PPM]	VOC [PPM]	Tid for oppnådd maks verdi av deteksjonsområdet til CO sensor [s]	Tid for oppnådd maks verdi av deteksjonsområdet til CO2 [s]
P1	571.2	585	Større puff	N/A					
P2	551.6	602	Flamme og større puff						
P3	548.8	617	Puff						
P4	568,5	597	Større puff	Defekt	15,4	10000+	Defekt	375	N/A
P5	540,4	756	Større puff	Defekt	14.0	10000+	550 000	525	N/A
P6	550,6	595	Større puff	45000+	16,5	10000+	690 000	510	610

5.4 Sponforsøk

Det ble utført 5 sponforsøk der startmassen ble variert mellom 87 og 140 gram. Sponforsøkene var interessante ettersom det ble observert at startmassen påvirket røykproduksjonen. Sponforsøk 1 og 2 med henholdsvis 87.6 gram og 90.0 gram spon produserte mindre røykgass/-kondens og sot enn tidligere forsøk (mel og pellets).

Under forsøk 1 ble det observert små flammer rundt gnisten etter 16 min og 20 sekund. Flammene hadde en lengde på ca. 2 cm og de propagerte ikke videre og forsvant når gnisten var avslått. Det ble oppnådd en bunntemperatur på 600 °C. Forsøk 2 oppnådde en bunntemperatur på 500 °C, men det ble ikke registrert antennelse av røykgass. Temperaturutviklingen i sponforsøk 1 og 2 hadde like tendenser, høy temperaturutvikling som kan indikere en flammebrann, se figur 44 for høy temperaturutvikling i forsøk 2 kontra forsøk 3. Innvendig flammebrann i metallbeholder kan ikke observeres. Det ble spekulert i om startmassen var for liten ettersom røykproduksjonen var lav i de foregående forsøk. Ved å øke startmassen med 50

gram til 140 gram i de resterende forsøk (3-5) ble det observert høy røykproduksjon og endret temperaturforløp som vist i sponforsøk 3 i figur 44.



Figur 44: Temperatur som funksjon av tid med ulik startmasse, 90 og 140 gram spon. Det er brukt ulik horisontal akse for å enklere observere kurvene.

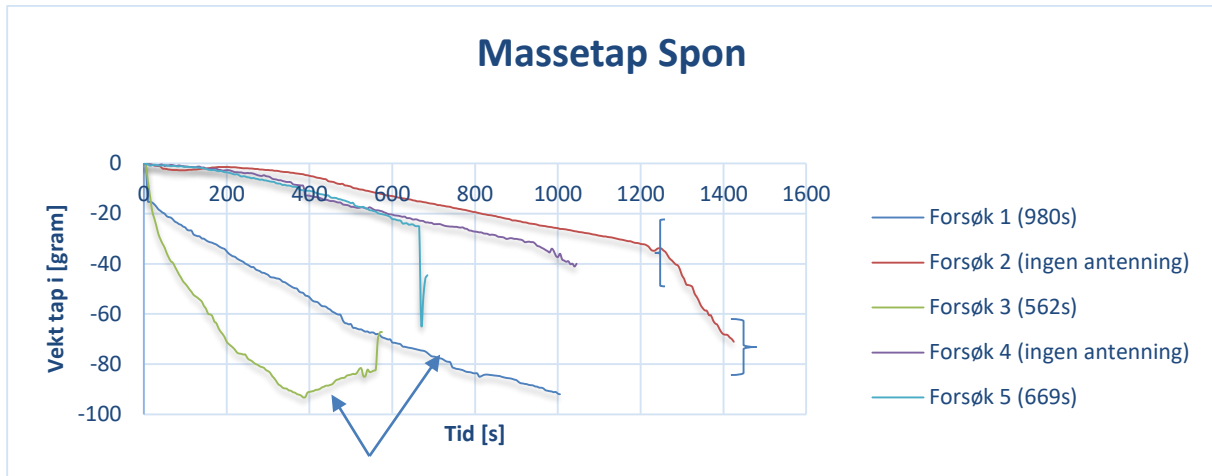
Ved økt startmasse til 140.9 gram i forsøk 3 ga bedre resultater mht. produksjon og antenning av oksiderbar røykgass. Etter 9 min og 32 sekund ble det observert en flamme som brant selvstendig i 1 min med en bunntemperatur på 700 °C. Forsøket brant i en lengre periode og måtte avsluttes for å bevare utstyr. Det ble registrert høyere produksjon av røykgass enn det som ble observert i forsøk 1 og 2 samt temperaturutviklingen lignet på de positive resultatene fra mel og pellets. I forsøk 4 ble det oppnådd en bunntemperatur på 600 °C og god røykproduksjon, men ingen positive resultater mht. antenning av røykgass. Det ble observert et større puff i sponforsøk 5 etter 11 min og 9 sekund ved en bunntemperatur på 575 °C.

Forsøk 5 ga CO konsentrasjon på over 10000 ppm etter 470 sekund og forsøk 4 ga CO₂ konsentrasjon på 37 500 ppm etter 1045 sekund. CO detektoren sviktet i forsøk 4.

Tabell 8: Resultat fra sponforsøk.

Forsøk	Start masse [gram]	Antennings tid [s]	Antennings form	CO2 [PPM]	O2 [%]	CO [PPM]	VOC [PPM]	Tid for oppnådd maks verdi av deteksjonsområdet til CO sensor [s]	Tid for oppnådd maks verdi av deteksjonsområdet til CO2 [s]
Spon 1	87,6	980	Svak flamme	N/A					
Spon 2	90,0	Ingen antenning	Ingen antenning						
Spon 3	140,9	562	Flamme						
Spon 4	135,0	Ingen antenning	Ingen antenning	37500	18,7	Defekt	190 000	N/A	Oppnådde ikke maksverdi
Spon 5	138,2	669	Puff	Defekt	17,7	10000+	400 000	470	N/A

Figur 45 illustrerer massetapet i sponforsøkene. I forsøk 3 øker kurven rundt 390 sekund, og det kan indikere magnetisk støy fra varmekilden. Kurven for forsøk 1 er stabilt synkende, men den registrerer data hvor startmassen er mindre enn massetapet. Det tyder på forstyrrelser i vektresultatet i forsøk 1 og 3 (markert med pil). Forsøk 5 viser et kraftig fall ved samme tidspunkt som det oppsto et puff i røykgassen. I forsøk 2 akselerer massetapet i slutten av forsøket, se klammeparentes. I dette forsøket ble 79 % av startmassen forbrukt og det spekuleres i at ulmebrannen har utviklet seg til en flammebrann.



Figur 45: Illustrerer massetap som funksjon av tid for sponforsøk. Tallene i parentes viser tid for antenning av røykgass. Pilene indikerer forstyrrelser i vektresultatet. Klammeparentes illustrerer økt massetap i forsøk 2.

5.5 Bomullsforsøk

Det ble utført 5 bomullsforsøk med en startmasse på ca. 60 gram ettersom det ga gode resultater mht. oksiderende røykgass i preliminære forsøk. Det som skilte seg ut ved bomullsforsøkene var at oksiderende røykgass ble antent tidlig i forsøkene uten å ha aktivert antenningskilden og det brant stabile flammer ut av metallbeholderen, se figur 46 hentet fra bomullsforsøk 3. Bilde ble tatt etter å ha oppnådd flammebrann, røykkammeret ble fjernet og varmekilden deaktivert. I bomullsforsøk 1, 2 og 3 utviklet det seg tykke oksiderende «røykstråler» i bunn av metallbeholder som steg opp på utsiden. Det ga indikasjon på tett trakt, men det ble påvist at det ikke var tilfelle. Det spekuleres i om bomullen var så tettpakket at røyken ble trengt ut i bunn av metallbeholder. Hendelsene oppsto tidlig i forsøkene og røykgassen var ikke homogen ettersom det var god sikt i røykkammeret, se figur 46.

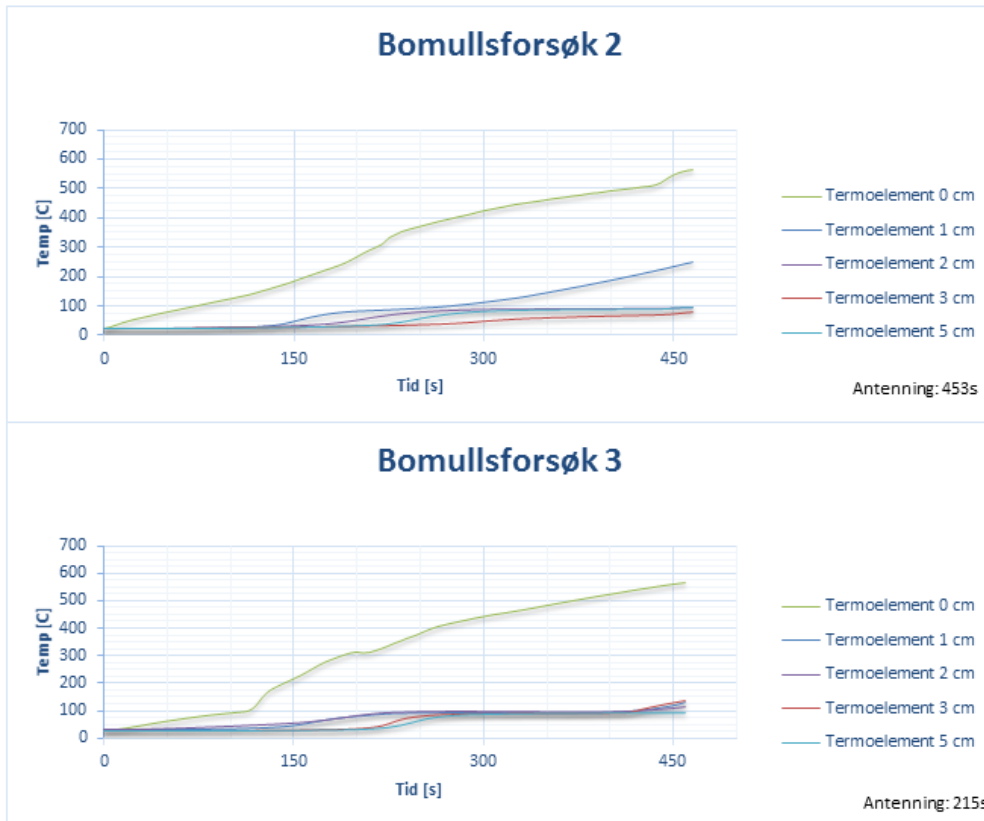
Det ble observert antenning av røykstråle i bomullsforsøk 1-3, der antenningskilden var varme fra varmeelementet eller ulmebrannen. Røykstrålen er illustrert med pil på figur 46. Det ble registrert flammebrann etter antenning i bomullsforsøk 1 etter 3 minutt og 45 sekund med en bunntemperatur på 351 °C. I bomullsforsøk 2 og 3 ble det observert flammer etter 7 min og 33 sekund samt 3 minutt og 35 sekund med bunntemperatur på henholdsvis 544 °C og 315 °C. Røykkammeret i bomullsforsøk 1 – 3 var gjennomsiktig ved antenning ettersom røykproduksjonen akkurat hadde startet. Det ble også observert tykke røykstråler fra forsøk 4 og 5, derimot ble ikke røykgasstrålen antent. Det ble derimot antent en mer homogenpreget gassblanding i bomullsforsøk 4 etter 16 minutter og 8 sekund med en bunntemperatur på 925 °C som er den

høyeste registrerte temperaturen av alle forsøkene. Det ble ikke observert antenning av røykgass i forsøk 5 der bunntemperaturen oppnådde 700 °C.



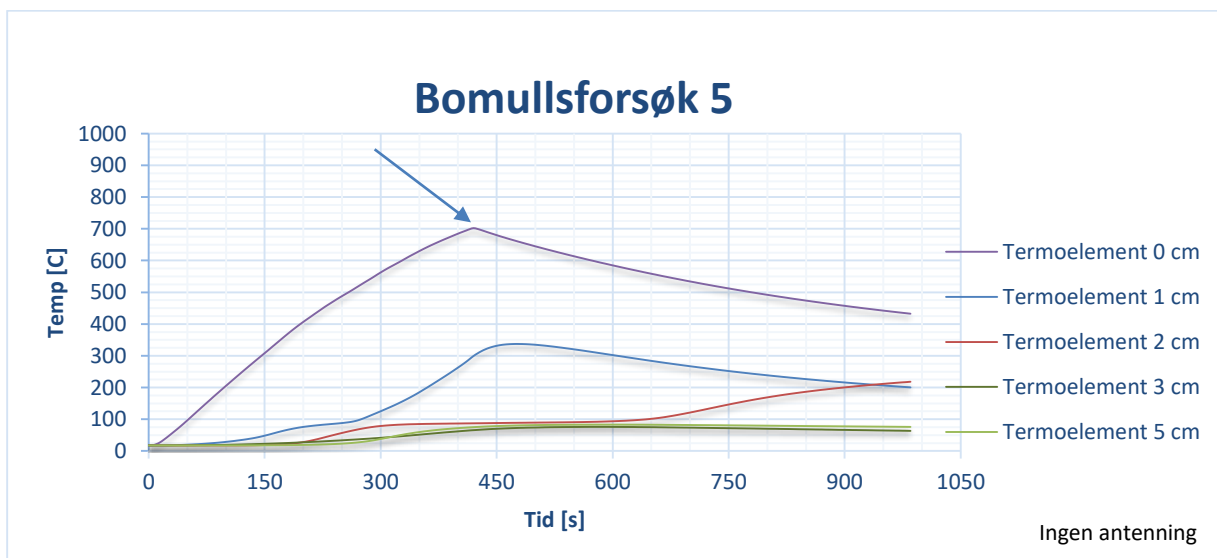
Figur 46: Antennelse av oksiderbar røykgass utviklet seg til flammebrann i bomullsforsøk 3. Bilde t.h. illustrerer røykstrålen.

Temperaturutviklingen for bomullsforsøkene var relativt like, se figur 47. Forsøk 4 og 5 oppnådde CO konsentrasjoner over 10000 ppm etter 470 sekund og CO₂ konsentrasjoner på 45 000 og 19500 ppm etter 905 og 1270 sekund.



Figur 47: Temperatur som funksjon av tid i bomullsforsøk 2 og 3.

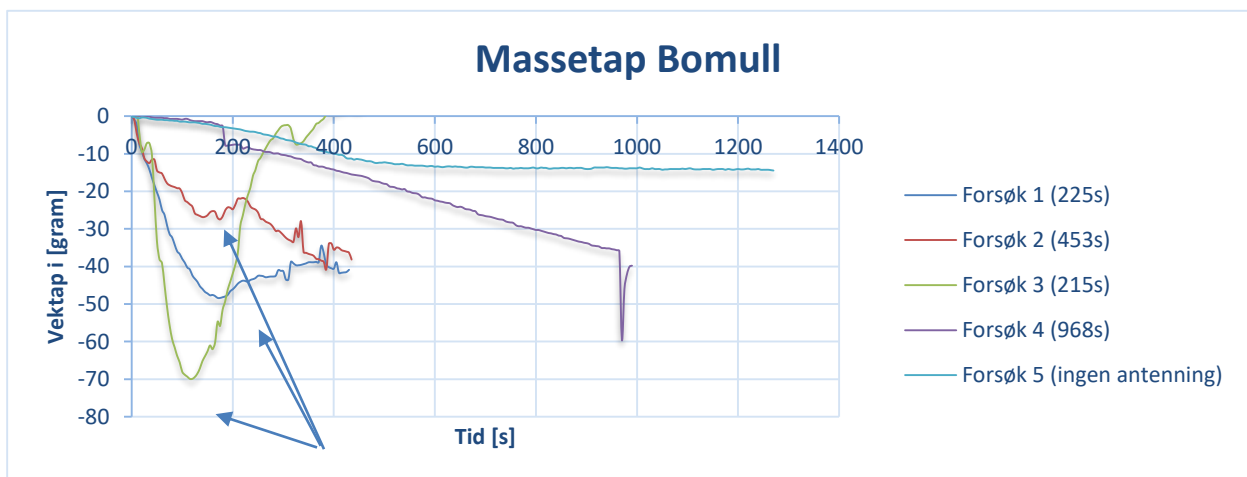
Forsøk 5 skiller seg ut ettersom varmekilden ble stoppet etter 420 sekund for å undersøke om ulmingen opprettholdt seg selv etter å ha oppnådd en bunntemperatur på 700 grader, se figur 48. Temperaturkurvene er dalende etter 420 og det ble ikke observert positive resultater mht. antenning av oksiderbar røykgass.



Figur 48: Temperatur som funksjon av tid. Pil illustrerer at varmekilden ble slått av etter 420 sekund.

Tabell 9: Resultat fra bomullsforsøk.

Forsøk	Start masse [gram]	Antennings tid [s]	Antennings form	CO2 [PPM]	O2 [%]	CO [PPM]	VOC [PPM]	Tid for oppnådd maks verdi av deteksjonsområdet til CO sensor [s]	Tid for oppnådd maks verdi av deteksjonsområdet til CO2 [s]
Bomull 1	62,8	225	Selvantenne nde flamme	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Bomull 2	65,8	453	Selvantenne nde flamme						
Bomull 3	61,2	215	Selvantenne nde flamme						
Bomull 4	64,5	968	Større puff	45000+	17,4	10000+	330 000	460	905
Bomull 5	65,4	Ingen antenning	Ingen antenning	19500	19,6	10000+	250 000	420	Oppnådde ikke maksverdi



Figur 49: Illustrerer massetap som funksjon av tid for bomullsforsøk. Tallene i parentes viser tid for antennelse av røykgass. Pilene indikerer vekt forstyrrelser i forsøk 1-3.

Figur 49 illustrerer massetapet i bomullsforsøkene. Det var problematisk å registrere gode vektresultater, men etter å ha endret tykkelsen på isolasjonen mellom vekt og varmekilde etter forsøk 3 ble det registrert fornuftige resultater etter forsøk 3. Forsøk 4 synker massetapet stabilt

til antenning av røykgass hvor det oppstår et større puff som forårsaker kraftig endring i massen. Varmekilden ble avslått i forsøk 5 etter 420 sekund, ulmebrannen avtar og massetapet flater ut som korrelerer med figur 48.

5.6 Samlede verdier

Verdier som startmasse, antenningstid og antenningsform for alle forsøk er samlet i tabell 10.

Tabell 10: Samlede verdier uten sensorpakke.

Forsøk	Startmasse [gram]	Antenningstid [s]	Antenningform
Mel 1	137.1	Ingen antenning	Ingen antenning
Mel 2	332.6	667	Puff
Mel 3	334.9	597	Svak flamme
Pellets 1	571.2	585	Puff
Pellets 2	551.6	602	Flamme og større puff
Pellets 3	548.8	617	Puff
Spon 1	87,6	980	Svak flamme
Spon 2	90,0	Ingen antenning	Ingen antenning
Spon 3	140,9	562	Flamme
Bomull 1	62,8	225	Selvantennende flamme
Bomull 2	65,8	453	Selvantennende flamme
Bomull 3	61,2	215	Selvantennende flamme

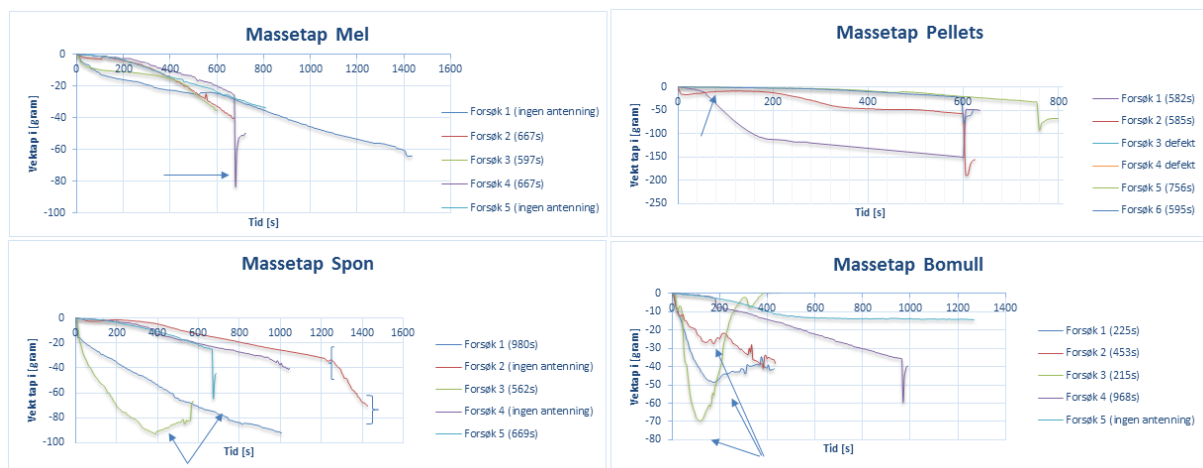
Verdier som vekt, antenningstid, antenningens form og gassmålinger er tatt med i tabell 11. Høyest oppnådd gasskonsentrasjonene ble registrert i tabellen foruten om O₂ der den laveste verdi ble brukt.

Tabell 11: Samlede verdier med sensorpakke.

Forsøk	Start masse [gram]	Antennings tid [s]	Antennings form	CO ₂ [PPM]	O ₂ [%]	CO [PPM]	VOC [PPM]	Tid for oppnådd maks verdi av deteksjonsområdet til CO sensor [s]	Tid for oppnådd maks verdi av deteksjonsområdet til CO ₂ [s]
Mel 4	310,2	667	Puff	45000+	19,7	10000+	680 000	465	400
Mel 5	330,4	Ingen antenning	Ingen antenning	45000+	20,6	10000+	460 000	640	310
Pellets 4	568,5	597	Større puff	Defekt	15,4	10000+	Defekt	375	N/A
Pellets 5	540,4	756	Større puff	Defekt	14,0	10000+	550 000	525	N/A
Pellets 6	550,6	595	Større puff	45000+	16,5	10000+	690 000	510	610
Spon 4	135,0	Ingen antenning	Ingen antenning	37500	18,7	Defekt	190 000	N/A	Oppnådde ikke maksverdi
Spon 5	138,2	669	Puff	Defekt	17,7	10000+	400 000	470	N/A
Bomull 4	64,5	968	Puff	45000+	17,4	10000+	330 000	460	905
Bomull 5	65,4	Ingen antenning	Ingen antenning	19500	19,6	10000+	250 000	420	Oppnådde ikke maksverdi

Figur 50 illustrerer massetap under ulming for de ulike brenseltypene. Massetapet varierer ettersom det brukes ulike startmasse, se tabell 10 og 11. Ettersom det forventes kontinuerlig

massetap under forbrenning skal kurvene teoretisk sett synke gjennom hele ulmeprosessen. Vektresultatene fra bomullsforsøk 1-3 samt sponforsøk 3 viser ikke den forventede massetaps-utviklingen. Det kan skyldes at vekten har vært utsatt for termisk og magnetisk påkjennelse fra varmekilden/ulmingen. Etter å ha forbedret isolasjonen mellom vekt/ulmehabitat og erstattet vekt, har vektresultatene vært stabile. Enkelte kurver har en et kraftig massetap i slutten av forsøket som skyldes antennelse av røykgass. Under pelletsforsøk 3 og 4 var det behov for å tilføye ekstra sølvteip, det inteferte med vektresultatet i den grad av at det må forkastes.



Figur 50: Illustrerer massetap som funksjon av tid for alle forsøk.

Tabell 12 illustrerer massetapet ved antenningpunkt. De forsøkene som er markert med oransje oppnådde ikke antenning. Det har tidligere blitt spekulert i at forsøk som ikke har oppnådd antenning skyldes overgang til flammebrann. Det som er interessant med disse resultatene er at massetapsraten for ikke-antennbare forsøk er lavere enn for forsøk som har oppnådd antenning. Dersom forsøkene har propagert til en flammebrann, skulle massetapsrate være større enn i en ulmebrann. Etersom de ikke-antennbare forsøkene har forgått over lengre tid, kan det argumenteres for at massetapsraten synker i et «forlengt eksperiment». Derimot illustrerer tabellen at massetapet i % er relativt lavt for de ikke-antennbare forsøk, bortsett fra sponforsøk 2. Det har oppstått en feil med vektresultatet i sponforsøk 1, ettersom det har oppnådd et massetap på over 100 %.

Tabell 12: Massetap per sekund. Gule linjer illustrerer forsøk uten observert antenning av røykgass.

Forsøk	Startvekt	Massetap [g]	Massetap i [%]	Antenningstid [s]	Massetaprate [g/s]
Pellets 1	571,2	148,6	26,0	602	0,25
Bomull 1	62,8	43,9	69,9	225	0,20
Spon 3	140,9	82,2	58,3	562	0,15
Bomull 3	61,2	29,2	47,7	215	0,14
Pellets 6	550,6	61,7	11,2	595	0,10
Pellets 2	551,6	56,8	10,3	585	0,10
Spon 5	138,2	63,9	46,2	669	0,10
Spon 1	87,6	90,7	103,5	980	0,09
Bomull 2	65,8	40,8	62,0	453	0,09
Mel 3	334,9	35,5	10,6	597	0,06
Mel 2	332,6	33,5	10,1	667	0,05
Spon 2	90	71,1	79,0	Stoppet 1425	0,05
Mel 1	137,1	63,6	46,4	Stoppet 1435	0,04
Pellets 5	540,4	32,8	6,1	756	0,04
Mel 5	330,4	33,5	10,1	Stoppet 810	0,04
Mel 4	310,2	25,9	8,3	667	0,04
Spon 4	135	40	29,6	Stoppet 1045	0,04
Bomull 4	64,5	35,9	55,7	968	0,04
Bomull 5	65,4	14,5	22,2	Stoppet 1270	0,01

6 Diskusjon

Det er utviklet et eksperimentelt oppsett for å undersøke hvordan røyk fra en ulmebrann kan antenne i et lukket miljø. Det har blitt gjennomført 21 forsøk der 16 ga antennelse av oksiderbar røykgass. I dette kapitlet diskuteres designfasen og dens utfordringer, deretter tolkes resultatet av temperaturtrend, massetap og gasskonsentrasjoner.

6.1 Utforming av eksperimentelt oppsett

Utforming av oppsett var interessant ettersom det oppsto nye utfordringer gjennom utviklingsperioden som måtte løses. Nye ideer ble testet ut og forkastet eller innført ut i fra resultatet. Varmekilden for oppvarming av brenselet var en av de største utfordringene i utviklingsfasen, der det ble testet 4 ulike varmekilder. Etter at det ble bestemt å anvende varmetråder som varmekilde har dette blitt en pålitelig og stabil funksjon i oppsettet.

Det oppsto også utfordringer med tennkilden for antennelse av røykgassene ettersom både åpen flamme og gnist gir utfordringer ved å antenne en oksiderbar røykgass. Det er henholdsvis fukt og tjærestoffer som reduserer antenningsmulighetene i forsøket. Etter å ha erstattet piezo igniteren med en kraftig gnistgenerator har røyken antent som forventet med tilsynelatende gode resultater. Alle ikke-antennbare forsøk har en korrelerende temperaturutvikling som indikerer at gnistgeneratoren fungerer. Det er også observert en korrelasjon for de antennbare forsøk i temperaturutvikling. Dette er diskutert i kapittel 6.2.

Det gikk mye tid med til venting på utstyr, ettersom det tok 5 måneder å få levert sensorene etter bestilling og deretter 5 nye måneder på å få de operative. Derfor ble det gjort forsøk med og uten sensorpakken. Oppsett 4 viste seg å fungere utmerket og forsøkene er repeterbare. Dersom det er ønskelig å arbeide videre med oppgaven er det beskrevet forbedringspotensialer i kapittel 8.

Det ble utført et åpent testoppsett (uten røykkammer) i preliminare forsøk som ga nok konsentrasjon av oksiderbar røykgass for antennelse, der det observert en flamme ut av en metallbeholder hvor ulming foregikk. Uønskede situasjoner kan oppstå i både åpne og lukkede miljøer, men risiko for antennelse er større i et lukket miljø. Siden et lukket miljø utgjør den største risikoen, ble det bestemt å ha test oppsette omfavnet i et røykkammer.

Det har blitt utført forsøk der røykgassen har blitt ført opp mot tennkilde ved hjelp av trakt og aluminiumsfolie. En problemstilling for oppgaven var at bruk av trakt og folie vil øke antenningsmuligheten, se figur 32. Problemstilling går ut på at forsøket deles opp i ulike soner der sone 1 inneholder høy konsentrasjon av oksiderbar røykgass i et oksygenfattig miljø, mens sone 2 inneholder høyere verdier for oksygen. Ved sonedeling ble det oppnådd 16 av 21 positive resultater med henhold til antenning av oksiderbar røykgass. Uten sonedeling ble det oppnådd færre antenner 1 av 3 forsøk, se kapittel 4.1.

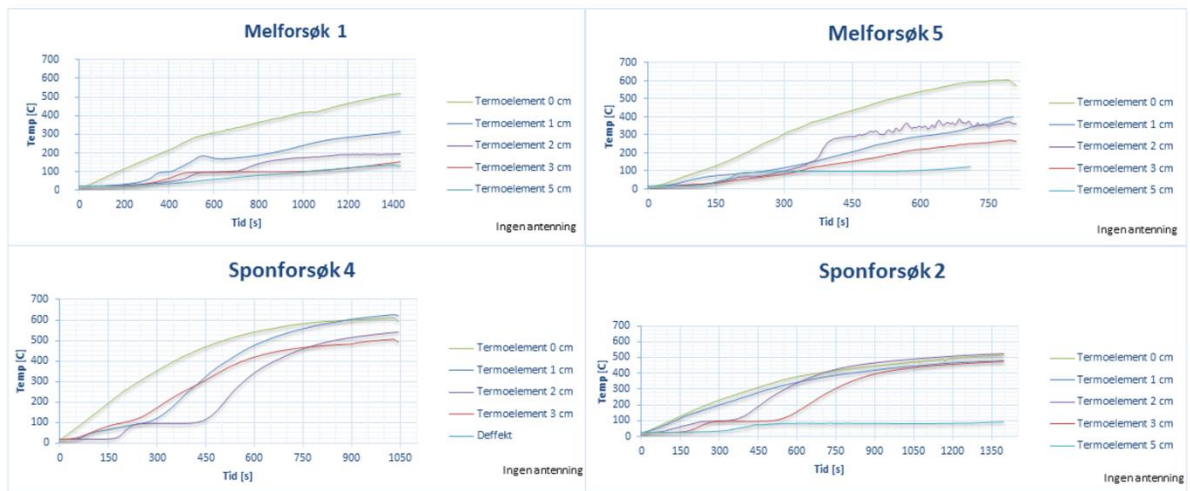
6.2 Resultat

Forsøkene ga klare resultater mtp. produsert oksiderbar røykgass under ulming. Røykgassen var i antennebar i 16 av 21 forsøk hvor 6 forsøk gav små flammer og 10 gav mindre og større puff.

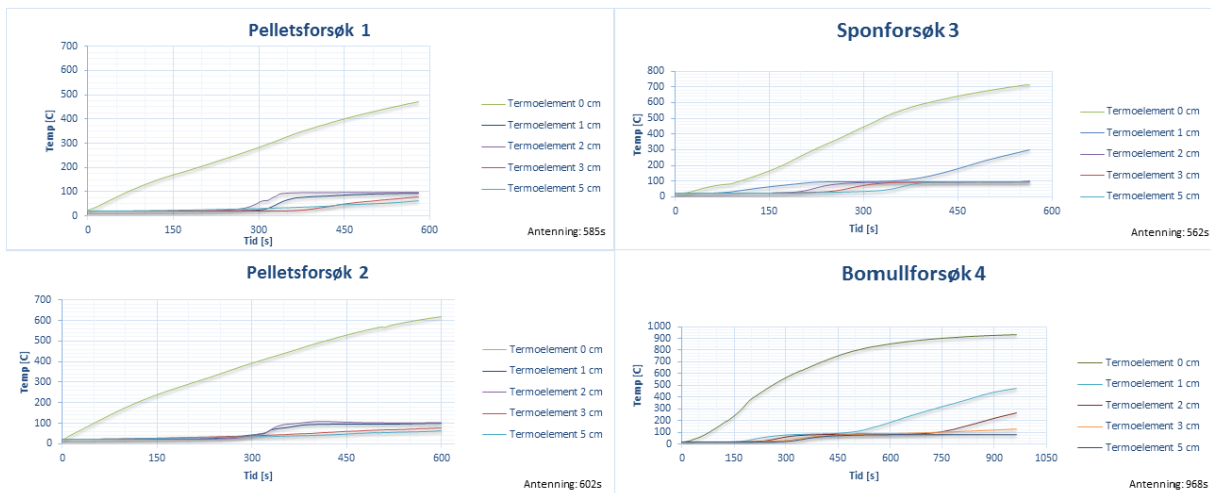
6.2.1 Temperaturutvikling, gasskonsentrasjoner og relasjon til antenning av oksiderbar røykgass

I alle forsøk som ble utført ble det observert lav eller høy «temperaturutvikling». I oppgaven brukes begrepet «høy temperaturutvikling» der temperaturforskjellene over ulike plan er på flere hundre grader, se figur 51. «Lav temperaturutvikling» vil de fleste plan ha en temperatur på rundt 100 °C, men derimot en høy bunntemperatur, se figur 52. Figur 51 illustrerer 4 forskjellige forsøk der temperaturutviklingen har vært høy, og hvor ingen av forsøkene ga antenne av røykgass. Det var ikke mulig å observere om det var flammer ved brenselet siden dette befinner seg i en lukket metallbeholder, derimot er det en klar forskjell i temperaturutvikling for antennebare og ikke-antennebare forsøk. Dette er illustrert i figur 51 og 52 ettersom det ikke oppnås antenne ved høy temperaturutvikling, men kun med lav. Det spekuleres i at forsøk med høy temperaturutvikling kan ha utviklet seg til flammebrann siden temperaturen er så pass høy i flere plan. Flammebrann vil produsere mer forbrente røykgasser som ikke kan antenne. En flammebrann utvikler høyere temperatur enn ulmebrann og den høyeste temperaturen ble registrert i bomullsforøk 4, se figur 52. Dermed kan det antyde på at de ikke-antennebare forsøk ikke utviklet seg til en flammebrann ettersom bunntemperaturen er tilnærmet lik. Men det er en klar forskjell på at temperaturen i høyere plan som er vesentlig større. Det ble spekulert i at oksygenkonsentrasjonen var for lav i de ikke-antennebare forsøk. Etter å ha

analysert resultatene fra oksygensensoren ble det ikke observert ulikheter i oksygenkonsentrasjon for antennbare og ikke-antennbare forsøk (før antennelse).



Figur 51: Temperatur som funksjon av tid. Høy temperaturutvikling for forsøk uten antenning av oksiderbar røykgass.

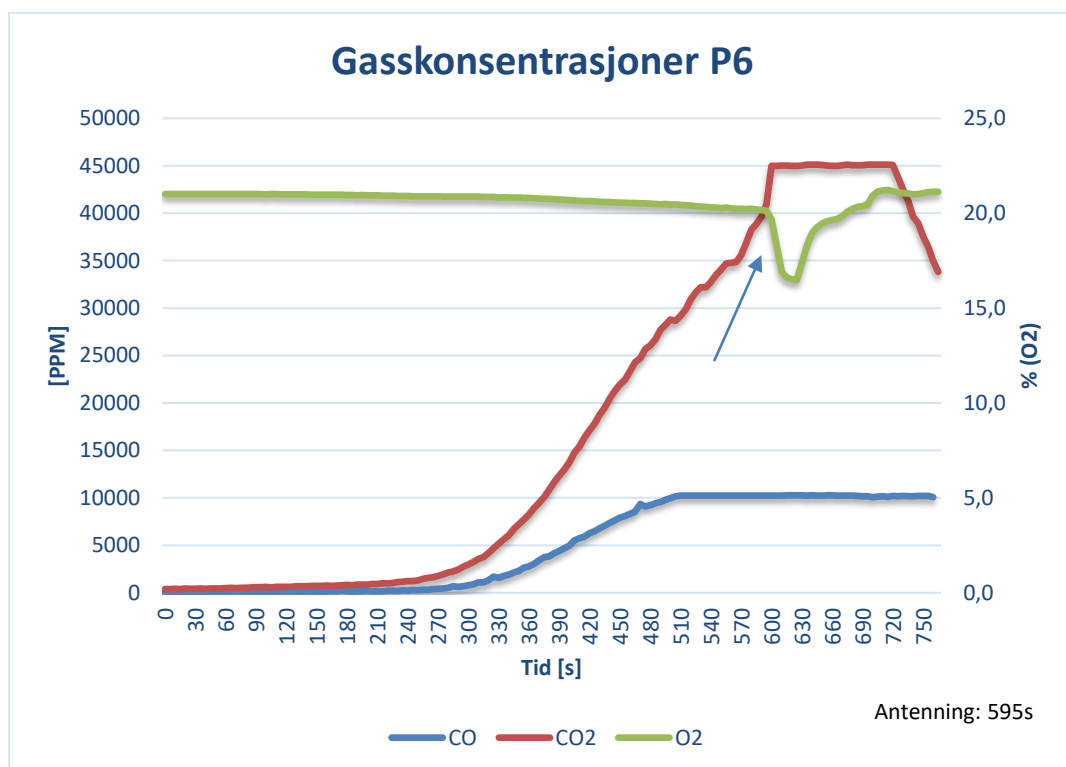


Figur 52: Temperatur som funksjon av tid. Lav temperaturutvikling for forsøk som resulterte i antenning av oksiderbar røykgass.

Melforsøk 5 er et av de fire forsøk i figur 51 som ikke oppnådde antenning. I det forsøket ble det produsert 45000 ppm CO₂ i løpet av 310 sekund. Det ble tidligere spekulert i at forsøk med lav CO₂ konsentrasjon kunne lettere gi antennelse og vice versa. Den raske økningen i CO₂ konsentrasjon kan indikere at det var en flammebrann tilstede ettersom en flammebrann vil produsere mer CO₂ enn en ulmebrann. Ved å snu om vinklingen vil lavere konsentrasjoner av

CO₂ gir bedre muligheter for antenning av røykgass, ettersom der forventes lavere CO₂ i en ulmebrann enn i en flammebrann. Ettersom de fleste forsøk oppnådde en konsentrasjon over deteksjonsområde for CO₂ (45000) kan det ikke trekkes en konklusjon med bruk av nåværende utstyr. Det spekuleres i at det er en korrelasjon mellom produsert mengde CO og CO₂ og de ulike temperaturtrendene, men det registreres ikke i resultatet. I tabell 11 kan se at antennbare og ikke-antennbare forsøk har produsert over og under 45000 ppm CO₂.

Figur 53 illustrerer at oksygenivået i pelletsforsøk 6 faller raskt ved et kraftig puff når røykgassene antennes. I dette forsøket løsner søvlteipen ved sensorene og frisk luft strømmer inn i røykkammeret, det kan igjen observeres ved at CO₂ verdien faller samt oksygenverdien øker. Det er observert god korrelasjon mellom gasskonsentrasjonene, oksygenkonsentrasjonen reduseres sakte til antenningspunkt hvor den faller mens CO₂ konsentrasjoner øker. Derimot øker CO konsentrasjonen stabilt i forsøkene. Etter antenning og ved tilgang til frisk luft opprettholdes verdien som indikerer en høy CO konsentrasjon. Det er også interessant at CO konsentrasjonen ikke påvirkes av antenningen, som igjen indikerer en høy CO konsentrasjon.



Figur 53: Gasskonsentrasjoner fra pelletsforsøk 6. Gasskonsentrasjonene avleses på venstre akse bortsett fra oksygenkonsentrasjonen som leses av på høyre akse. Pil indikerer antenningspunktet som gir et fall i oksygenkonsentrasjonen.

Ut ifra tabell 11 kan det registreres at det var 2 forsøk som holdt seg innenfor deteksjonsområde for CO₂, bomull 5 og spon 4. Figur 48 illustrerer temperaturutviklingen i bomull 5. I dette forsøket ble varmekilden avslått etter 420 for å se om eksperimentet kunne opprettholde ulmingen. Temperaturtrenden er dalende etter 420s og ulmingen stopper opp. Massetapet er beregnet til å være på 0,01 g/s som er 25 ganger lavere enn det høyeste massetapet. Antageligvis ble det derfor produsert for lite røykgass for å oppnå en antennbar konsentrasjon.

6.2.2 Massetap

Det har blitt observert at startmassen er svært viktig for forsøkene, der for liten startmasse ikke produserer nok oksiderende røykgass. Den økte dybden til brenselet fremmer ulming ettersom det befinner seg mindre oksygen under overflaten. Det har blitt brukt en startmasse fra 60 – 570 gram ut ifra hvilket brensel som brukes. Forsøk som har gitt antenning av oksiderbar røykgass har hatt en massetap på mellom 6-70 %, se tabell 12. Samtidig har positive forsøk mht. antenning en massetapsrate på 0.04 g/s eller mer, fordelt gjennom hele forsøket. Forsøk uten antenning har en massetapsrate på 0,05 g/s eller mindre.

I tabell 12 i kapittel 5.6 brukes det verdier for massetap i prosent som beskriver forbrent masse og massetapsrate. Tabellen skiller antennbare og ikke-antennbare forsøk som er markert med oransje. Det er interessant at verdiene for massetap i % og massetapsraten for ikke-antennbare forsøk er lave. Dersom forsøkene har propagert til en flammebrann, burde massetapet være større enn i en ulmebrann. Ettersom de ikke-antennbare forsøkene har foregått over lengre tid, kan det argumenteres for at massetapsraten synker i et «forlenget eksperiment». Derimot illustrerer tabellen at massetapet i % (som ikke er tidsavhengig) at det eksisterer mer brensel, unntatt i sponforsøk 2. Tabellen sier at det er like mye uforbrent materie i forsøk ved høy og lav temperaturutvikling. Vektresultatet tyder på at flere ikke-antennbare forsøk ikke har utviklet seg til en flammebrann. Det antas at det er større usikkerhet i vektresultatene enn temperaturresultatene ettersom vekten kan bli påvirket av varmekilden som nevnt tidligere.

Massetapet må være stort nok til at det har blitt produsert nok oksiderbar røykgass, dersom massetapet er for stort vil det være mangel på oksygen. Resultatene tilsier at den produserte gassen avhenger av hvor mye organisk materie som ulmer. Det har blitt observert at en økning i brenselmasse intensiverer røykgass produksjonen og det har oppstått bedre ulmeforhold ved å starte ulmingen dypere under overflaten for både spon og melforsøkene.

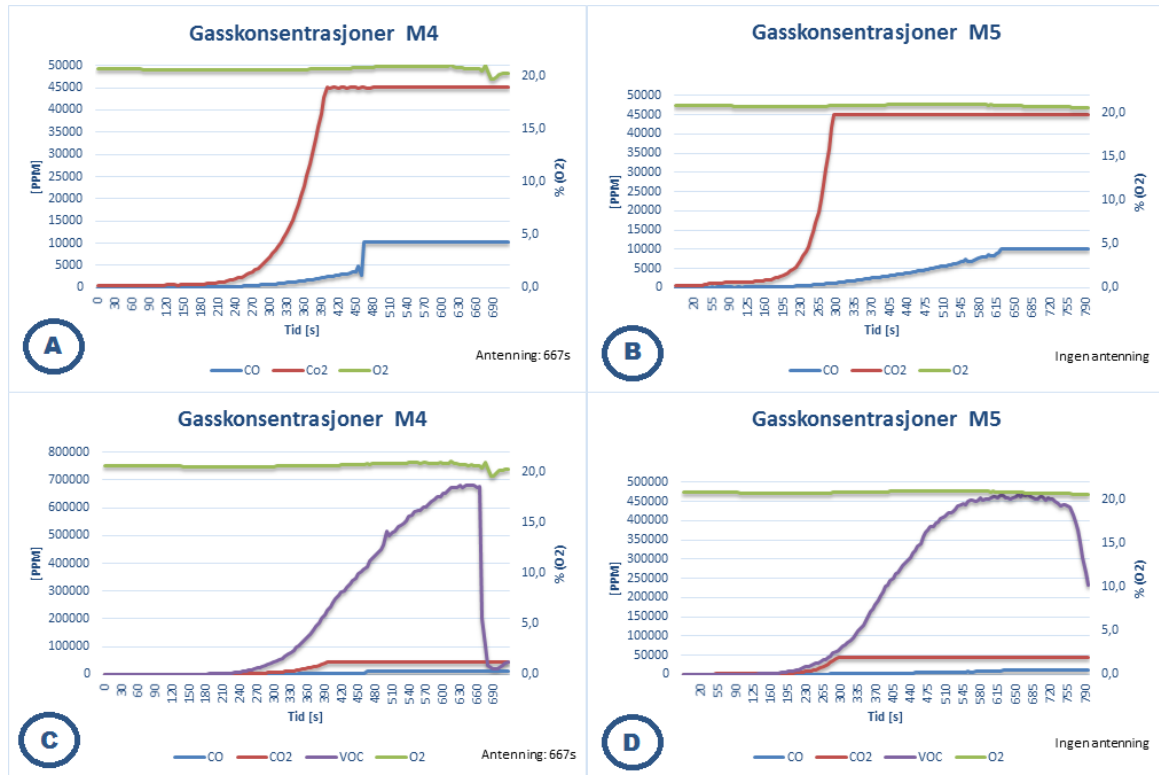
6.2.3 Antennelse av røykgass

Det har vist seg å være utfordrende å designe en god antennelseskilde som er eksponert for fukt og tjærestoffer fra ulmebrann. Til slutt ble det bruk en gnistgenerator som ga tilfredsstillende resultater. Gjennom ulike testforsøk har det blitt oppnådd antennelse av oksiderbar røykgass med åpen flamme og gnist. Det har også blitt observert at forsøk ikke har trengt en ekstern tennkilde for å antenne røykgassen. Bomullsforsøk 1 – 3 antente av seg selv under ulmingen utenfor beholderen. I en industriell sammenheng kan det få fatale konsekvenser. Ved dårlig utskiftning av organisk materie på tanker kan bakteriell nedbrytning starte en ulmeprosess, og ut ifra forsøkene mine kan ulmingen antenne denne gassen.

Det kan ikke utelukkes at en kraftigere tennkilde kunne ha antent forsøk som gnistgeneratoren ikke klarte. Ved å sammenligne forsøk som ikke har gitt antennelse av oksiderbar røykgass kan en registrere en klar sammenheng i temperaturutvikling. Det indikerer at ulmeforholdene har vært årsaken for å ikke ha oppnådd antennelse, ikke tennkilden.

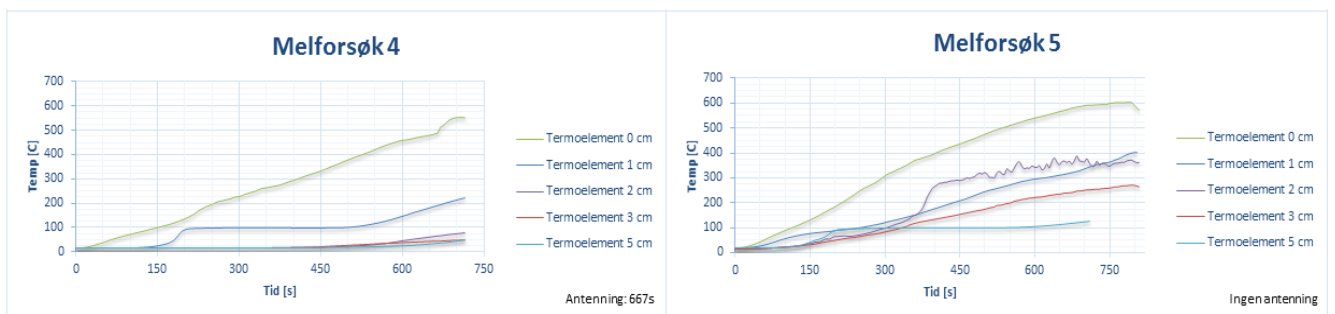
6.2.4 Sammenligning av melforsøk 4 og 5

Gasskonsentrasjonene for grafene kan ved første øyekast observeres som tilnærmet like ettersom det ikke er mulig å fastslå hva de reelle gasskonsentrasjonene er etter at sensorene har oppnådd maksimal verdi. Melforsøk 4 ga antennelse av oksiderbar røykgass, mens det ikke ble observert antennelse i melforsøk 5. Massetapet for melforsøk 4 og 5 var relativt likt, 8 % og 10 %. Ut fra figur 54 kan det observeres at CO₂ konsentrasjonene øker raskt i begge forsøk. Derimot virker det som at CO konsentrasjonen flater noe ut, spesielt i forsøk 5. Det kan se ut som at CO og CO₂ konsentrasjonene er 2-3 ganger høyere enn maks verdien for deteksjonsområdet. I melforsøk 4 oppnås en maks verdi på CO ca. 200 sekunder raskere enn forsøk 5 samtidig som maksverdien for CO₂ oppnås ca. 100 sekunder langsommere. Den raske endringen av oksygenkonsentrasjonen i slutten av eksperimentet skyldes antennelse i forsøk 4. Oksygen grafen synker under antennelse av røykgass og stiger ettersom sensorene får tilgang til frisk luft med høyere oksygeninnhold (figur 54 A og C). Melforsøk 5 ga ingen antenning og det korrelerer med en jevn oksygenkurve (figur 54 B og D). Oksygenkurven registreres på høyre vertikale akse, mens CO, CO₂ og VOC leses av på venstre vertikale akse. Det ble laget 2 ulike plott for hvert eksperiment ettersom VOC verdien er vesentlig høyere enn de andre gasskonsentrasjonene.



Figur 54: Gasskonsentrasjoner fra melforsøk 4 og 5. Gasskonsentrasjonene avleses på venstre y-akse bortsett fra oksygenkonsentrasjonen som leses av på høyre y-akse. Figur C og D inkluderer VOC konsentrasjonene for melforsøk 4 og 5 som forskyver venstre y-akse.

VOC kurven i forsøk 4 faller svært raskt ved antenning. Det er også interessant at VOC-kurven falt relativt raskt i forsøk 5 der antenning ikke forekom (figur 54 D). Det må påpekes at CO konsentrasjonen ikke faller etter antennelse (figur 54 A), det kan spekuleres i at verdien er såpass høy at det fortsatt befinner seg en del CO etter antennelse. Ved bruk av andre sensorer vil det besvares. Det er også en indikasjon på at det forekommer andre oksiderbare stoffer som for eksempel tjærestoffer. Derimot er VOC konsentrasjonen på nesten 700 000 ppm og synker nesten til 0 ppm (figur 54 C).

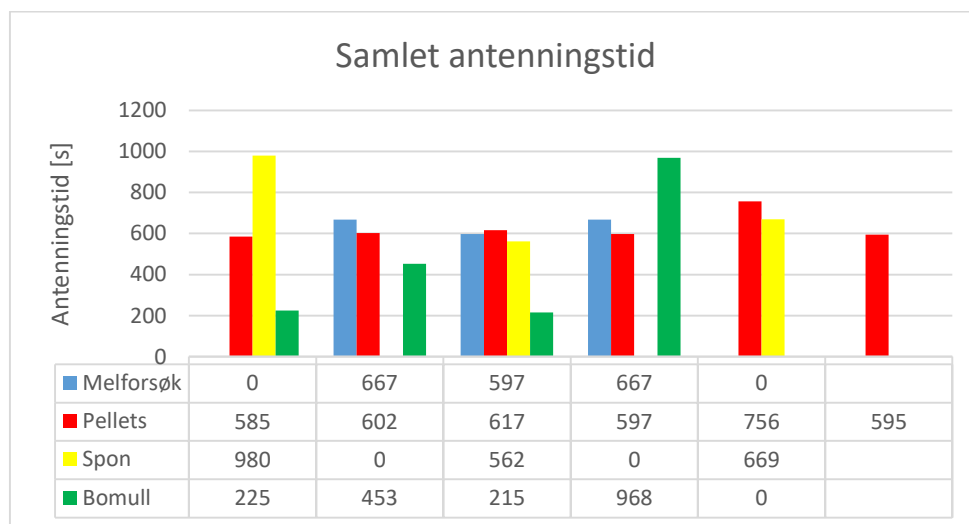


Figur 55: Temperatur som funksjon av tid. Lav temperaturutvikling i melforsøk 4, høy temperaturutvikling i melforsøk 5.

I figur 55 kan det registreres at temperaturutviklingen i forsøk 4 og 5 er noe ulik der forsøk 4 representerer temperaturutvikling i få plan, mens forsøk 5 har større temperaturspredninger.

6.2.5 Diskusjon av samlede resultater

I alt ble det utført 21 forsøk der 16 ga antenning av oksiderbar røykgass. Det ble utført et ekstra pelletsforsøk ettersom det oppsto problemer med sensorene. Figur 56 illustrerer antenningstid i de ulike forsøkene som er relativt lik bortsett fra bomullsforsøkene. Bomullsforsøk 1-3 ble en tykk stråle av oksiderbar røykgass antent og kan ikke sammenlignes med «homogene» røykgassantenninger. Dette forklares dypere i kapittel 5.4.



Figur 56: Illustrerer antenningstid i de ulike forsøkene.

Alle pelletsforsøkene ga antenning av oksiderbar røykgass. Det kan skyldes at pellets egner seg bedre til produksjon av oksiderbar røykgass. Ikke bare valg av brensel har stor betydning, men valg av startmasse er også avgjørende. Startmassen til pellets egnet seg godt til ulming, det spekuleres i å endre startmassen til resterende brensel for å oppnå bedre resultater.

De ble tidligere spekulert i at de ikke-antennbare forsøkene utviklet seg til en flammebrann. Etter å ha analysert resultatene kan det tyde på at dette ikke var tilfelle. Det kan begrunnes med at massetapet er relativt lite for de ikke-antennbare forsøkene. Det ble observert 45000 ppm CO₂ i alle forsøk der det ble observert antenning av røykgass, derimot ble det observert 19500 og 37500 ppm CO₂ i to ikke-antennbare forsøk. Massetapsraten var lav for de ikke-antennbare forsøk og det har blitt observert uforbrent materie i slutten av forsøket. Dette gjelder for alle ikke-antennbare forsøk bortsett fra sponforsøk 2, hvor massetapsraten akselererte i slutten av forsøket og det totale massetapet var på ca. 71 %.

Det har blitt observert god korrelasjon mellom lav temperaturutvikling og antennelse av oksiderbar røykgass og vice versa. Alle typer brensel har gitt antennelse etter å ha funnet riktig startmasse. Det har blitt observert 10000 ppm CO etter antennelse av røykgass, som indikerer at det enten forekommer mye CO i eksperimentet eller at produseres andre oksiderbare røykgasser / partikler. Alle forsøk har produsert over 10000 ppm CO og ingen forsøk har oppnådd antennelse hvor det ikke har blitt registrert over 45000 ppm CO₂. For å oppnå antennelse av oksiderbar røykgass må ulmebrannen forbli en ulmebrann med lav temperaturutvikling, det må produseres nok oksiderbar røykgass og forsøket må ha en massetapsrate over 0.04 g/s.

7 Konklusjon

Forsøkene ga positive resultater mht. produksjon og antennelse av oksiderbar røykgass fra ulmebrann i et lukket miljø. Det har blitt observert flammer, små og store puff der flammen propagerte gjennom hele røykkammeret. I større skala kunne tilsvarende scenario medført eksplosjoner. Resultatene tilsier at den produserte gassen avhenger av hvor mye organisk materiale som ulmer og at ulmingen forblir en ulmebrann og ikke utvikler seg til en flammebrann. En hypotese for oppgaven er at det produseres mer CO i en ulmebrann enn i flammebrann. Det kunne ikke bestemmes ettersom det ble oppnådd høyere konsentrasjon av CO enn deteksjonsområde til sensoren. Derimot er det en klar korrelasjon mellom temperaturutvikling og antennelse av røykgass, der lav temperaturutvikling gir økt sannsynlighet for antenning og gode ulmeforhold i den forstand at brannen forblir en ulmebrann. Ved høy temperaturutvikling kan brannen ha utviklet seg til en flammebrann, derimot kan det ikke observeres ettersom brenselet befinner seg i en metallbeholder og det oppstår tykk røyk i røykkammeret som reduserer sikten.

Vektresultatene for de ikke-antennbare forsøkene viser ikke den samme trenden som resultatene for temperaturutviklingen. Vektresultatene indikerer at det har blitt forbrent relativt lik mengde brensel i forsøk med både høy og lav temperaturutvikling. Det ble tidligere antatt at ikke-antennbare forsøk hadde forbrukt brenselet og oksygenet i røykkammeret. Det har ikke blitt registrert vesentlig lavere oksygenkonsentrasjoner for de ikke-antennbare forsøk og det spekuleres i at ulmingen har utviklet seg for lite i de ikke-antennbare forsøkene. Likevel er det interessant at det oppstår høyere temperaturspredning i forsøk med tilnærmet likt massetapt. Det antas at det er større usikkerhet i vektresultatet ettersom vekten kan påvirkes av temperatur og magnetisme.

Det har blitt påvist CO konsentrasjoner over 10000 ppm og CO₂ over 45000 ppm. Ettersom konsentrasjonene har gått over deteksjonsområdet kan de reelle verdiene være vesentlig høyere. I kapittel 2.6.1 ble det oppgitt at oppholdstiden for personer i røyk med 1500 ppm av CO er på maksimalt 10 minutter. Dette må det tas hensyn til i de områder personer oppholder seg rundt tankområder / ventilasjons-uttak der det kan oppstå biologisk nedbrytelse av materie og fare for ulmebrann. Det har også blitt observert 10000 ppm CO etter antennelse av røykgass, som indikerer at det enten forekommer mye CO i eksperimentet eller at produseres andre oksiderbare røykgasser / partikler.

8 Videre arbeid og forbedringspotensial

Under utførelse av eksperimentelle forsøk ble det oppdaget forbedringspotensialer for gjeldende oppsett. Dersom det ønskes å arbeide videre med oppgaven inneholder kapittel 8 ulike løsninger til utfordringene med nåværende oppsett.

Det anbefales at det bygges et nytt røykkammer ettersom det er boret hull i kammeret uten funksjonell betydning grunnet bruk av ulike oppsett. Røykkammerets mål bør ikke endres ettersom det er oppnådd gode resultater med dem. Det kan være interessant å anvende andre typer brensel samt detektere alternative gasser som blåsyregass, H_2S og aromatiske hydrokarboner. Det vil være interessant å ta en GC prøve av røykgassen for å analysere og kvantifisere dens innhold.

Ved å bytte ut metallbeholderen der brenselet er plassert til glassbeholder, kan overgang fra ulmebrann til flammebrann registreres. Derimot kan det være problematisk å anskaffe en robust glassbeholder. Jeg anbefaler å bruke robaxglass der en selv limer sammen 5 flater om til en kuboide som er høy og smal. Mine resultater har påvist at det egner seg å starte ulmebrannen i dybden og det favoriserer et høyt, smalt design. Samtidig foretrekker det mindre volum i røykkammeret samt reduserer bruken av brensel mer enn ved å anvende en kubeformet beholder.

Flere av CO og CO_2 konsentrasjonene ble ikke bestemt pga. de produserte verdiene oversteg deteksjonsområde for sensorene. Dette kan løses ved å ta i bruk andre sensorer med høyere deteksjonsområdet eller ved å tynne ut røykgassen. En gitt mengde røykgassen kan plasseres i et kjent lukket volum med luft hvor sensorpakken er plassert, derifra kan gasskonsentrasjonene bestemmes når forholdet mellom luft/røykgass volum er kjent.

Det spekuleres i at oppgaven har forbedringspotensial som redusert antenningstid av røykgass, der en kraftigere gnistgenerator kan redusere antenningstiden. Høy konsentrasjon av røykgass reduseres antenningsforholdene i den forstand at det produseres sot/tjære og høy fukt/kondens som motvirker antenningsmuligheten. Det er mer problematisk å generere høy energisk gnist i et røykfyllt og fuktig miljø.

I røykkammeret befinner det seg elektronisk utstyr med flere kabler som reduserer kammerets evne til å være tett. De reelle gasskonsentrasjoner kan være høyere i et helt tett kammer samt at antenningstiden trolig vil reduseres. Det må dermed forventes et lite røyktap dersom det skal registreres data der det kreves flere kabler ut av røykkammeret.

Varmetrådene fra brødristeren er ikke finfordelt og det gir utslag i ulik bunntemperatur på grunnflaten av robaxglasset. Termoelementene kan bli varmet opp av metallbeholderen som er plassert over varmekilden. Samtidig utvikler ulmefronter seg ujevnt på et horisontalt plan og ulmefronten kan interferere med termoelement lengre vekke som påvirker temperaturutviklingsresultatet i den grad av at det kan observeres høyere temperatur i planet over. Dette har ikke stor betydning for helheten av resultatet, men dersom det er ønskelig kan en ta i bruk andre varmetråder. I tillegg kan termoelementene forflytte seg når røykkammeret plasseres over eksperimentet selv om de teipes i riktig posisjon. Ved å lage et stativ med termoelementer som plasseres i metallbeholder vil det løse problemet.

Vekten har blitt byttet ut ettersom det ble oppdaget forunderlige vektresultater i starten av forsøkene. Det kan spekuleres i å øke isolasjonen mellom vekt og varmekilde ytterligere.

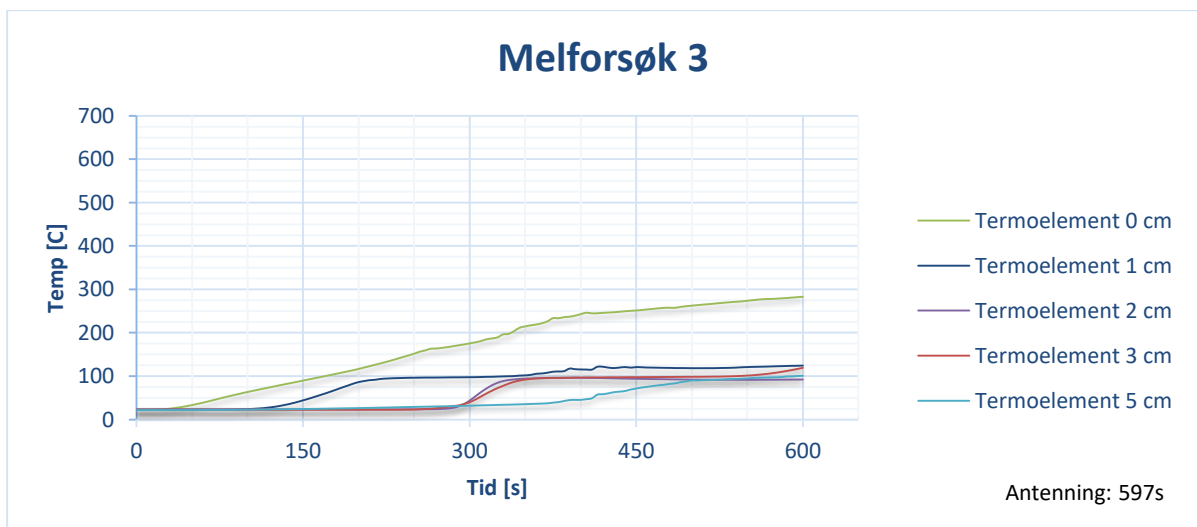
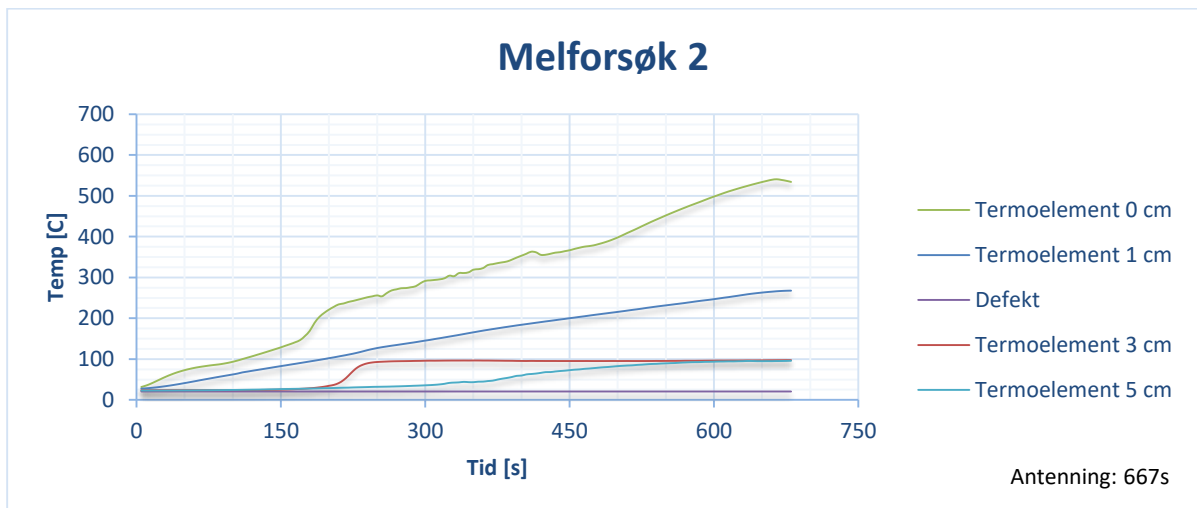
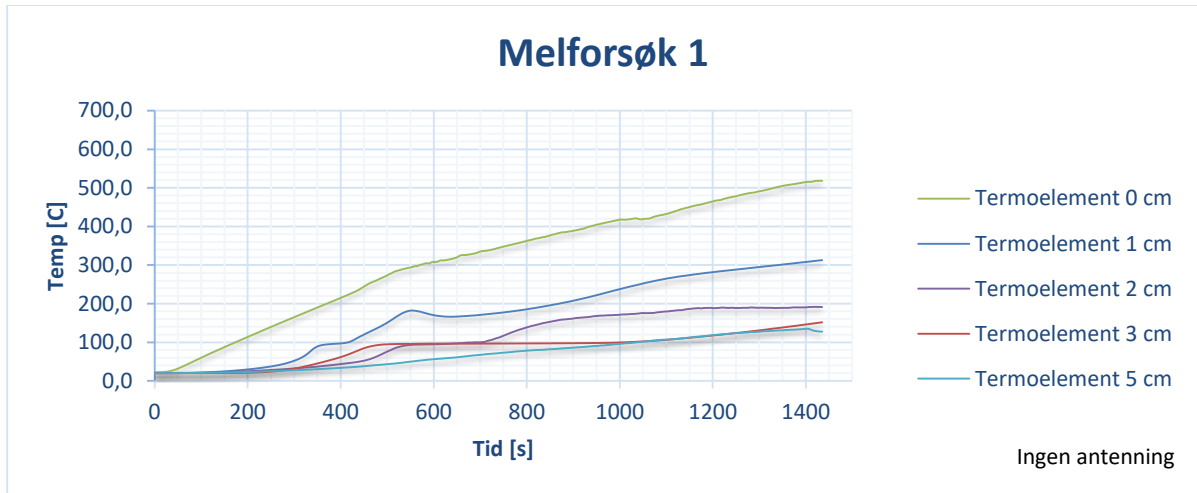
Kilder og litteratur

- [1] R. K. Eckhoff, *Explosion hazards in the process industries*, Bergen: Gulf publishing Company, UIB, 2005.
- [2] J. Mandel. Hales CA. Smoke inhalation. Oct 18, 2012, «Røykskade,» 19 01 2014. [Internett]. Available: http://nhi.no/forside/forstehjelp/brannskader/roykskade-41634.html?page=all#reference_1.
- [3] H. J. Haynes, «Fire Loss in the United States 2015,» NFPA, 2016.
- [4] Data extracted from Gas Data Book, 7th edition, copyright 2001 by Matheson Gas Products, and from Bulletin 627, Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors, copyright 1965 by U.S.Department of the Interior, Bureau of Mines., «Lower and Upper Explosive Limits for Flammable Gases and Vapors (LEL/UEL),» [Internett]. Available: <https://www.mathesongas.com>. [Funnet 20 09 2015].
- [5] «Karbonmonoksid - behandlingsanbefaling ved forgiftning,» 28.07.2011. [Internett]. Available: <http://www.helsebiblioteket.no/forgiftninger/gasser-og-kjemikalier/karbonmonoksid-behandlingsanbefaling-ved-forgiftning>. [Funnet 29 08 2015].
- [6] «The International Volcanic Health Hazard Network,» [Internett]. Available: http://www.ivhhn.org/index.php?option=com_content&view=article&id=84. [Funnet 23 11 2016].
- [7] «Blåsyre,» Direktorat for samfunnssikkerhet og beredskap, 20.04.2005.
- [8] B. P. Helmer Fjellvåg, «Blåsyre,» 07 06 2013. [Internett]. Available: <https://snl.no/blåsyre>.
- [9] K. Krajick, «Fire in the Hole,» *SMITHSONIAN MAGAZINE*, vol. May, Mai 2005.
- [10] N.N Brushlinsky, P. Wagner, J.R. Hall, S.V Sokolov, «World fire statistic Report No. 10 -2d edition,» CTIF Center of Fire Statistic, 2005.
- [11] T. J. Ohlemiller, *Smoldering combustion 2nd Edition*, Chapter 11, Section 2, DiNenno, P.M., et al., Editors, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*,.
- [12] B. C. Hagen, *Onset of smoldering and transition to flaming fire*, Bergen: Department of Physics and Technology UIB, 2013.

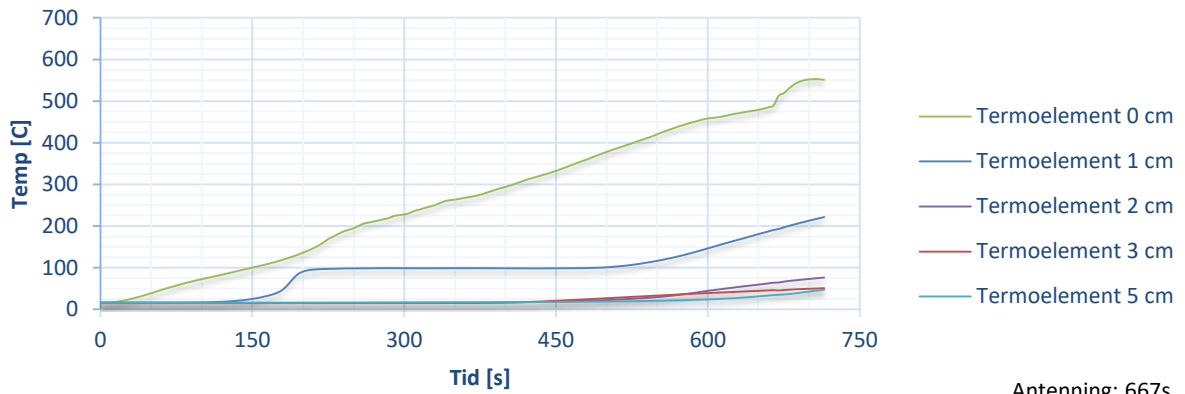
- [13] S. Y. Moqbel, «characterizing spontaneous fire in landfills», Jordan University of Science & Technology, Orlando, Florida , 2009.
- [14] B. G. Norevik, Brannmannen, Flora brannvesen, 05-05-2000.
- [15] Earth-kind landscaping. Revidert 02 2009. [Internett]. Available: <http://aggie-horticulture.tamu.edu/earthkind/landscape/dont-bag-it/chapter-1-the-decomposition-process/>. [Funnet 17 10 2016].
- [16] Å. G. Nils H. Fløttre, «Biokjemisk omforming av biomasse,» 23 09 2010. [Internett]. Available: <http://ndla.no/nb/node/10207?fag=7>. [Funnet 2016 11 02].
- [17] H. Lystad, Ø. Vethe, «Fakta om biologisk avfallsbehandling,» 31. desember 2002.
- [18] J. Rattigan, Phenomena about Burning Mountain, Wingen, , vol. 30, New South Wales: Australian Journal of Science, 1967.
- [19] G. Elert, «The Physics Hypertextbook,» *Chemical Potential Energy*, 1998-2016.
- [20] «Pellets,» [Internett]. Available: <https://no.wikipedia.org/wiki/Pellets>. [Funnet 05 11 2015].
- [21] Statens forurensingstilsyn, «Energipotensial i nedbrytbart avfall i Norge», Oslo, 2009.
- [22] J. H. Wang, C.Y.H. Chao, Transition from smoldering to flaming combustion of horizontally oriented flexible polyurethane foam with natural convection Volume 127, issue 4, Hong Kong: Department of Mechanical Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Desember 2001.
- [23] A.P. Aldushin, A. Bayliss, B.J. Matkowsky, On the transition from smoldering to flaming, Volume 145, Issue 3, Chernogolovka, Russia / IL, USA: Institute for Structural Macrokinetics and Materials Science, Russian Academy of Sciences, 142432 Chernogolovka, Russia Department of Engineering Sciences and Applied Mathematics, Northwestern University, Evanston, IL 60208, USA, May 2006.
- [24] Drysdale, S. Alexopoulos and D.D. ,The Transition from Smouldering to Flaming Combustion, Volume 13, Issue 1, Edinburgh: Unit of Fire Safety Engineering, University of Edinburgh, King's Buildings, Edinburgh EH9 3JL, Scotland, March 1988.
- [25] «Centers for Disease Control and Prevention,» 4 12 2014. [Internett]. Available: <http://www.cdc.gov/niosh/idlh/630080.html>. [Funnet 15 09 2015].
- [26] T. Gosink, «"What Do Carbon Monoxide Levels Mean?"», Alaska Science Forum. Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks., 2008-12-16.

- [27] B. Pedersen, H. Haraldsen, «STORE NORSKE LEKSIKON,» 22 01 2016 . [Internett]. Available: <https://snl.no/karbondioksid>. [Funnet 31 10 2016].
- [28] «Understanding EXHAUST EMISSIONS,» [Internett]. Available: <http://www.crypton.co.za/Tto%20know/Emissions/exhaust%20emissions.html>. [Funnet 07 10 2015].
- [29] J. G. Quintiere, M. Birky, F. Macdonald and G. Smith, An analysis of smoldering fires in closed compartments and their hazard due to carbon monoxide, Centre for Research, National Bureau of Standards, Washington, December 1982.
- [30] «Capgo,» [Internett]. Available: <http://www.capgo.com/Resources/Temperature/Thermocouple/Thermocouple.html>. [Funnet 23 11 2016].
- [31] «Piezo ignition,» 11 9 2015. [Internett]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Piezo_ignition. [Funnet 10 10 2015].
- [32] «Spark ignitor,» Spark ignitor, 2017. [Internett]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/retired/11218>. [Funnet 25 01 2017].
- [33] A. Stori, «Akrylplast,» 14 02 2009. [Internett]. Available: <https://snl.no/akrylplast>. [Funnet 16 04 2016].
- [34] A. i. A. Group, «Plexiglas,» Arkema, 2006.
- [35] «Robax - heat resistant ceramic» 2015. [Internett]. [Funnet 11 11 2015].
- [36] Figaro, «CDM4160 - Pre-calibrated module for carbon dioxide,» Figaro, 2007.
- [37] G. Kleppe, «Bakgrunnsinformasjon til gassmålerene for røykgass for EMRIS,» 18.12.2016.
- [38] Figaro, «TGS 5342 - for the detection of Carbon Monoxide,» Figaro, 2015.
- [39] Figaro, «Figaro Oxygen Sensor SK-25F,» Figaro, 14.
- [40] «Fire Death Rate Trends: An International Perspective,» U.S Department of Homeland Security, U.S Fire Administratoin of National Fire Data Center, Emmitsburg, Maryland, July 2011.

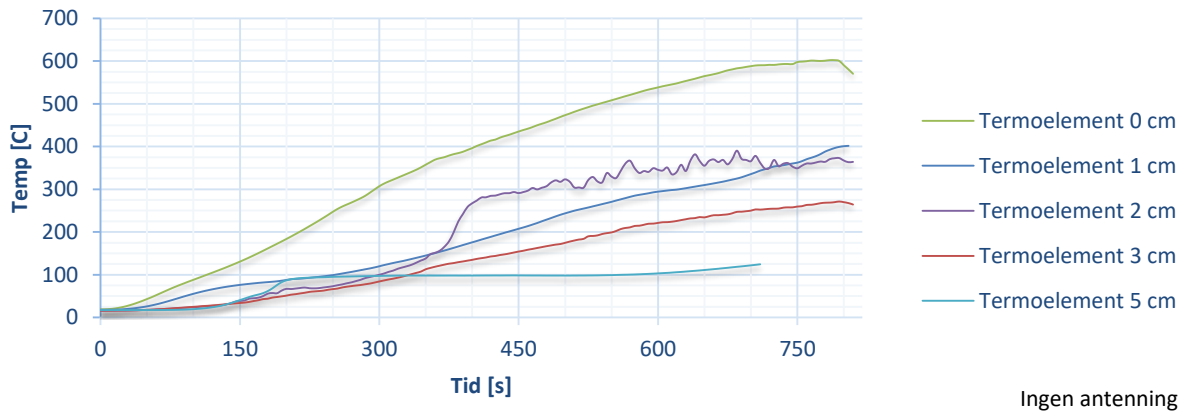
Vedlegg A - Melforsøk



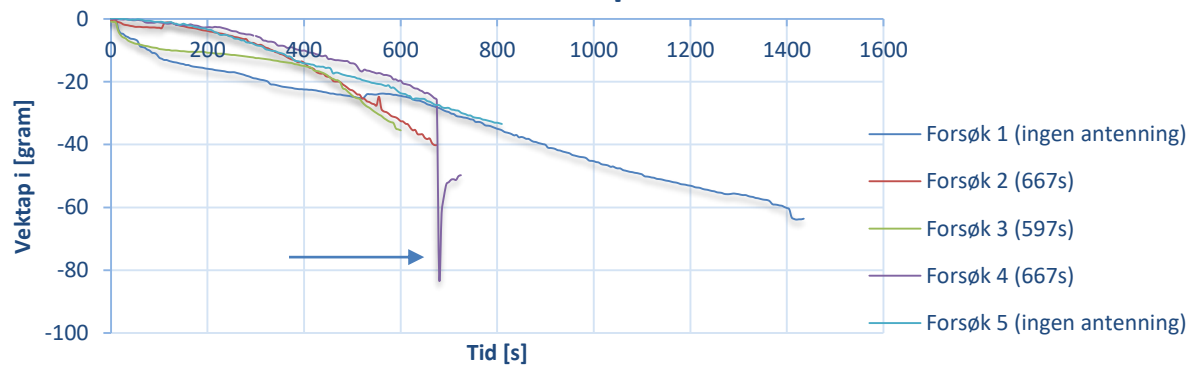
Melforsøk 4

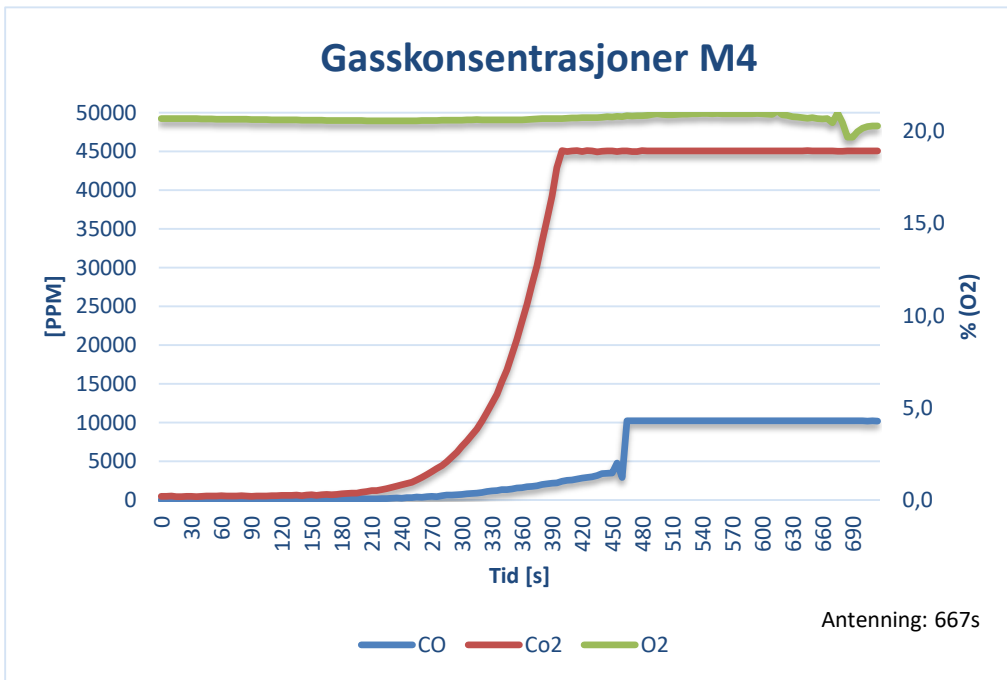
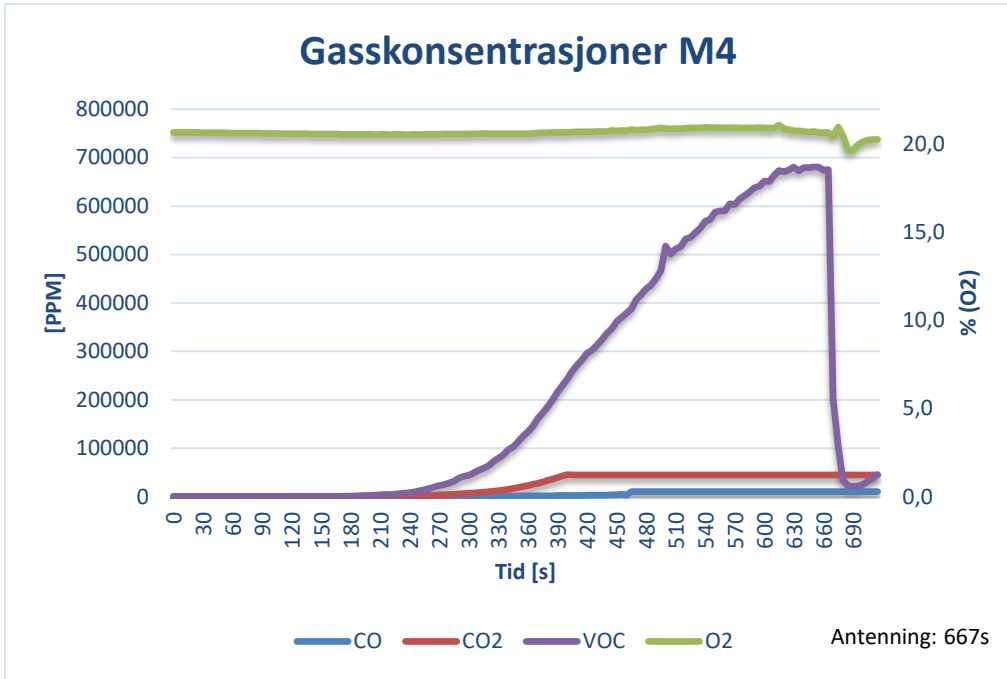


Melforsøk 5

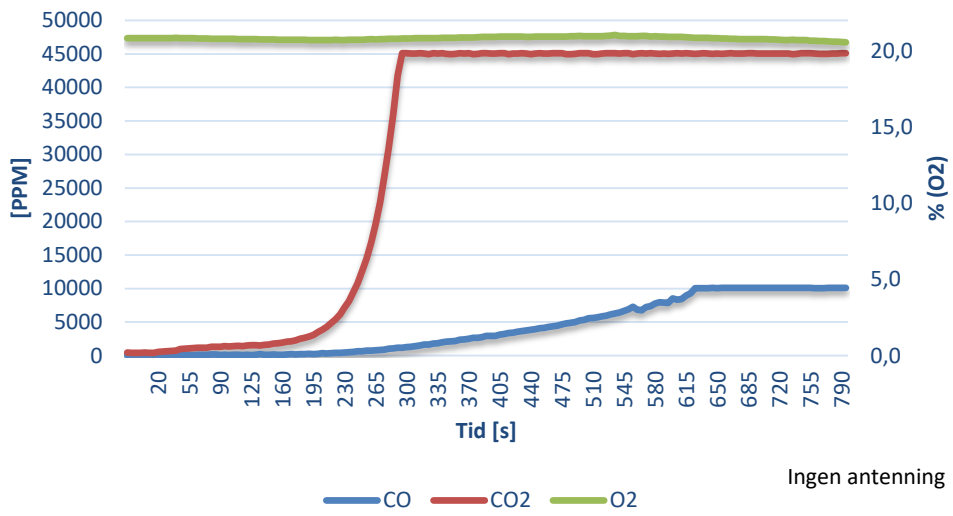


Massetap Mel

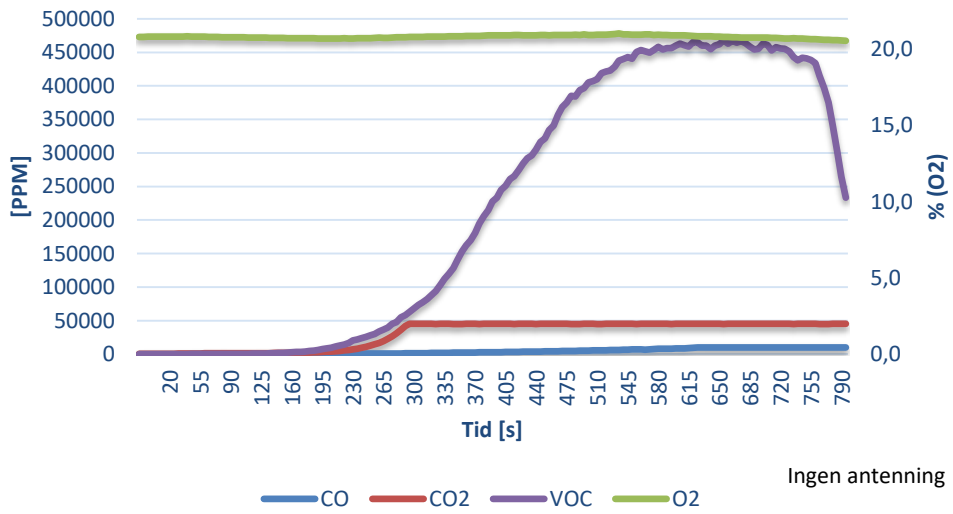




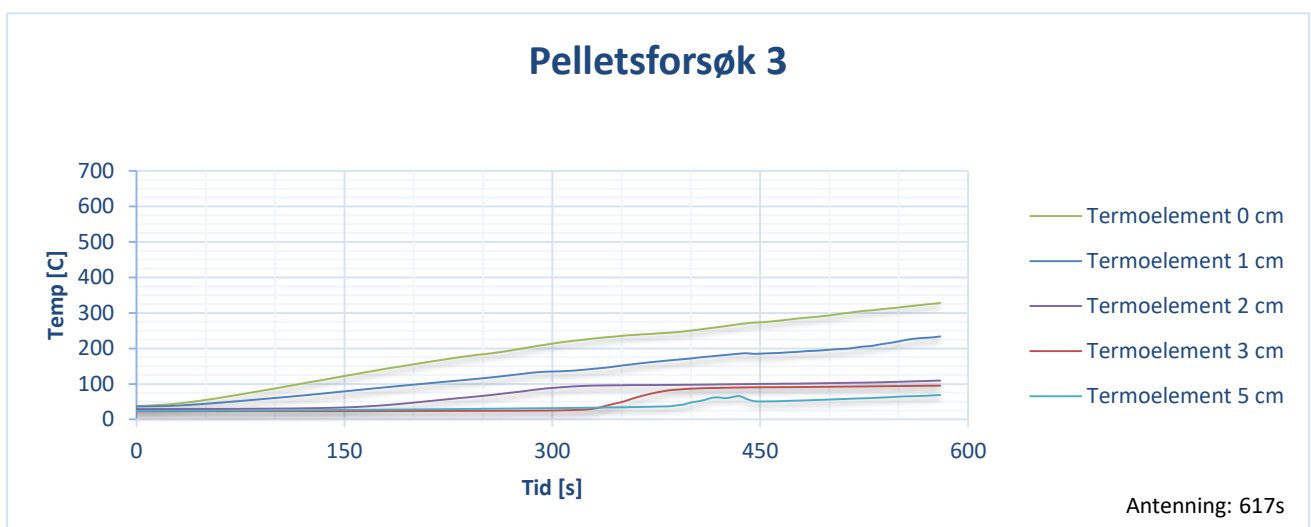
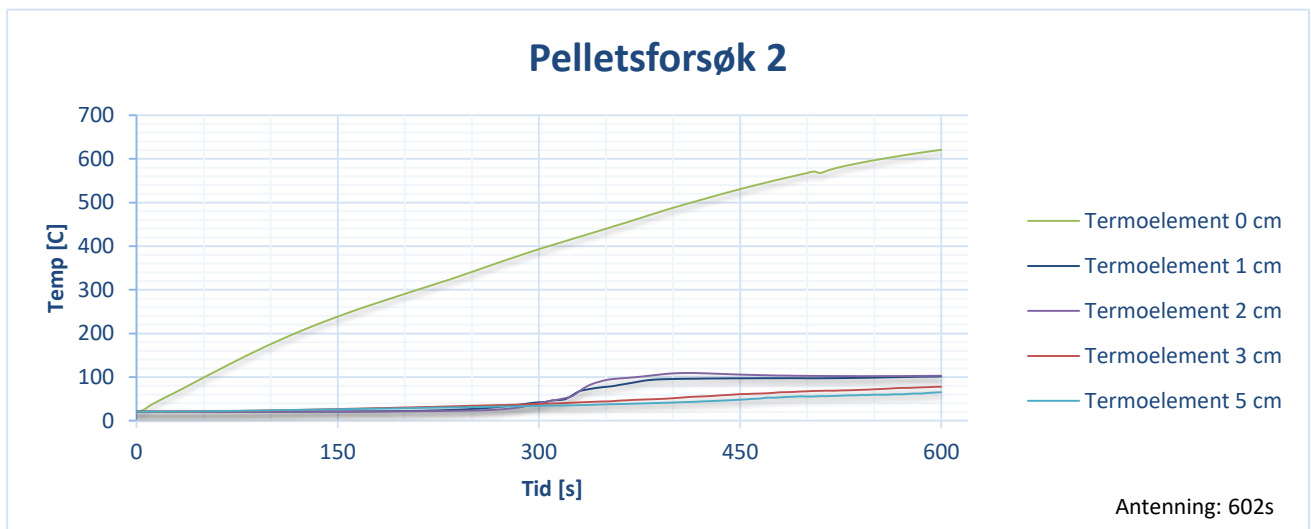
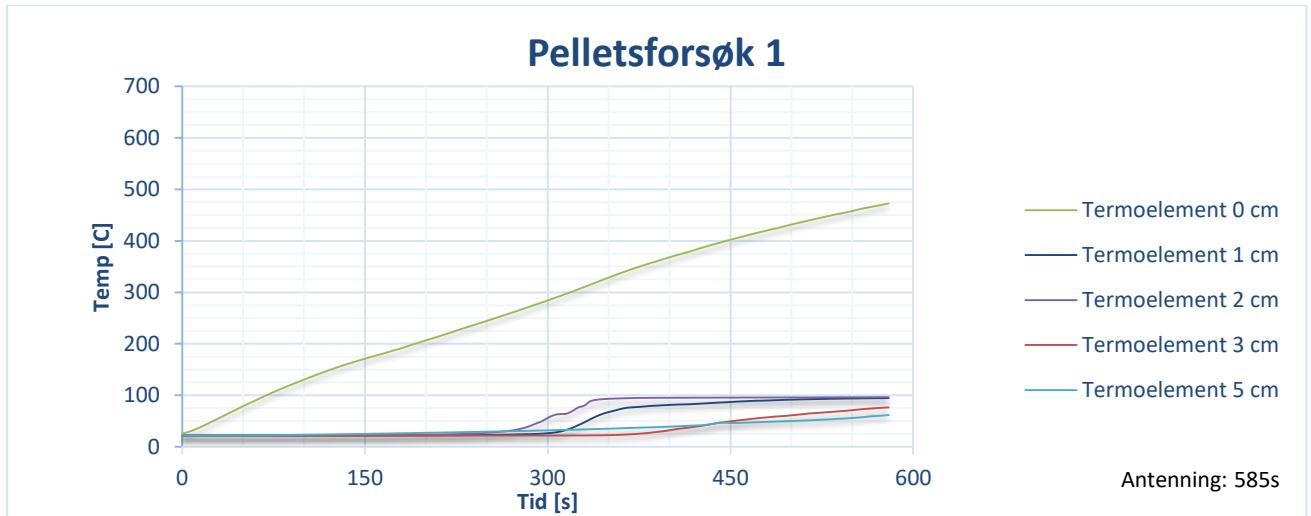
Gasskonsentrasjoner M5



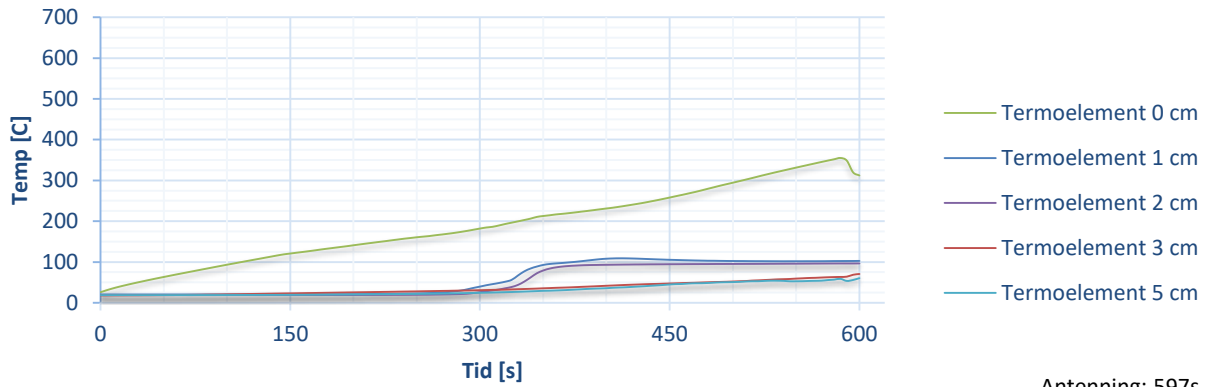
Gasskonsentrasjoner M5



Vedlegg B – Pelletsforsøk

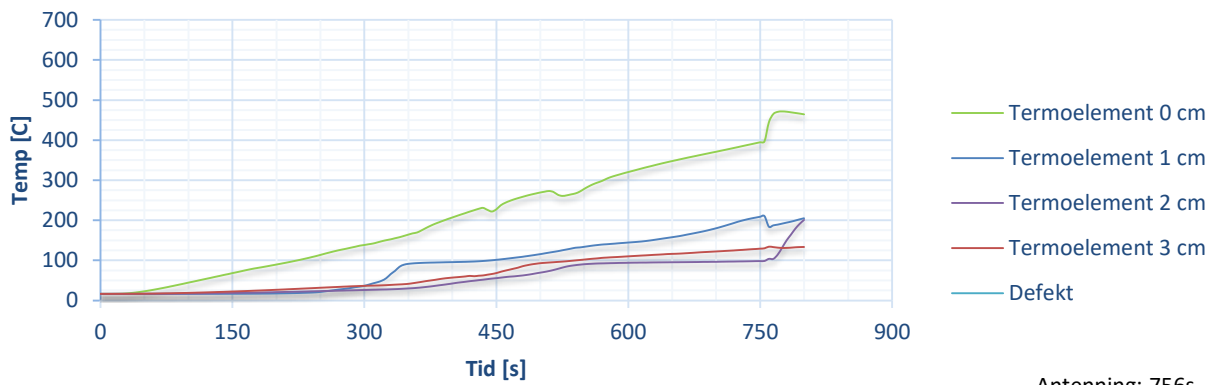


Pelletsforsøk 4



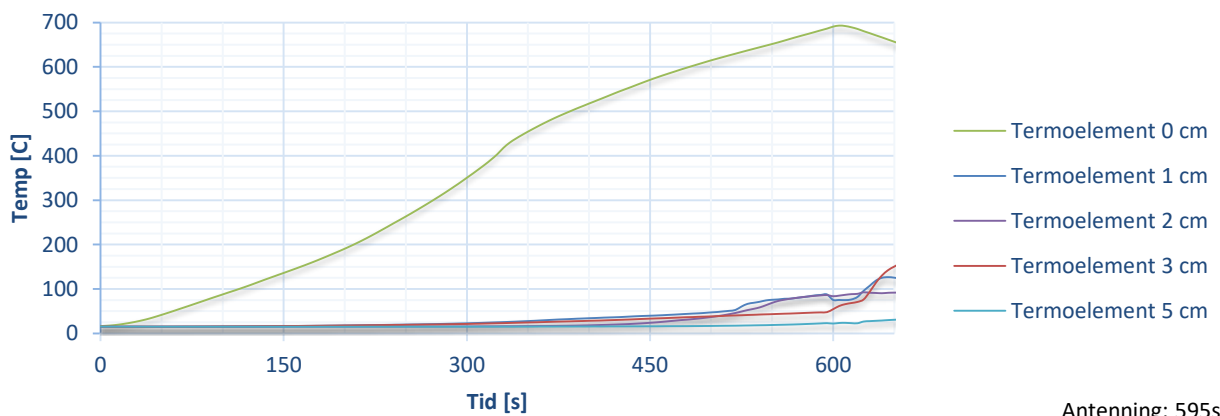
Antenning: 597s

Pelletsforsøk 5



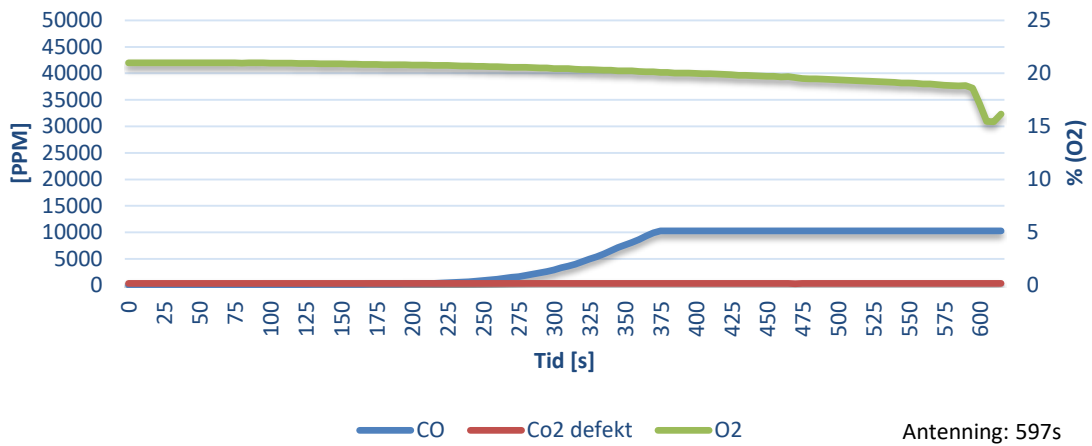
Antenning: 756s

Pelletsforsøk 6

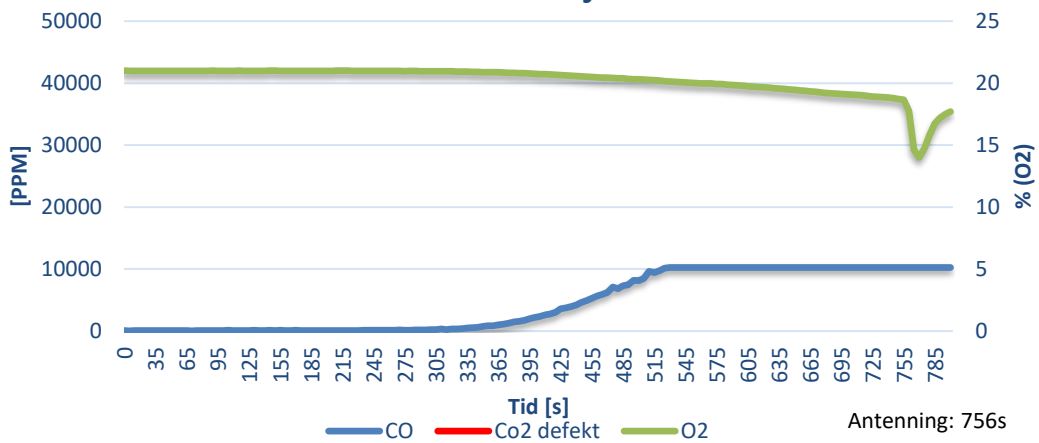


Antenning: 595s

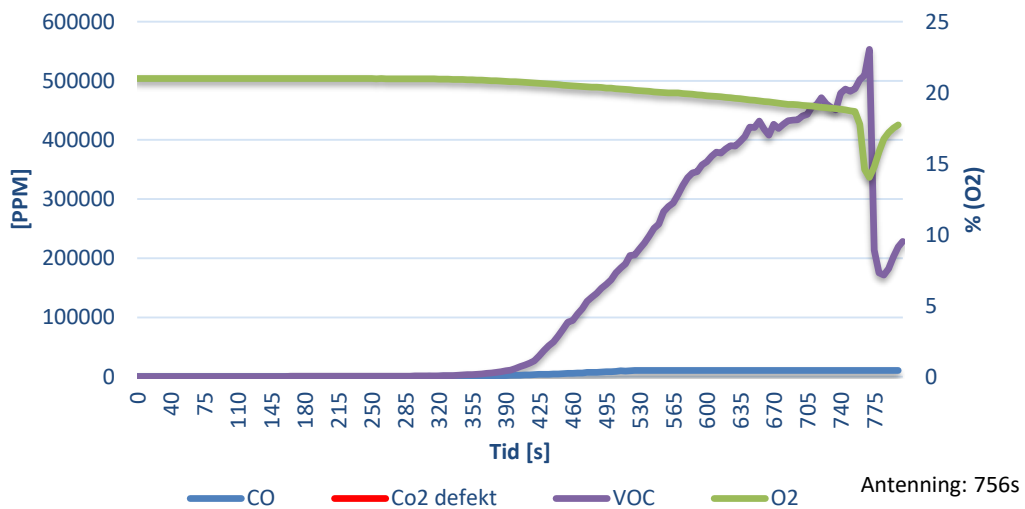
Gasskonsentrasjoner P4

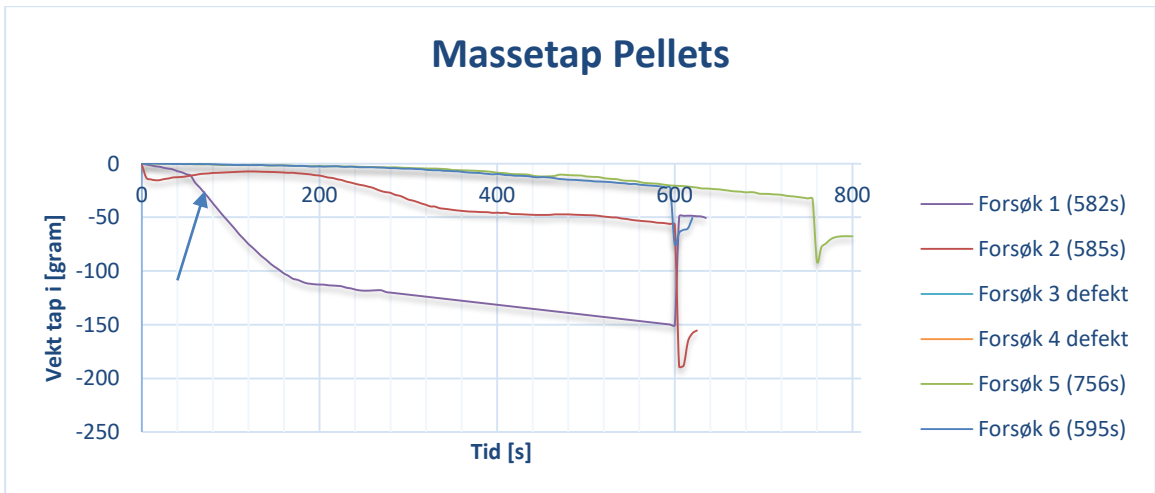
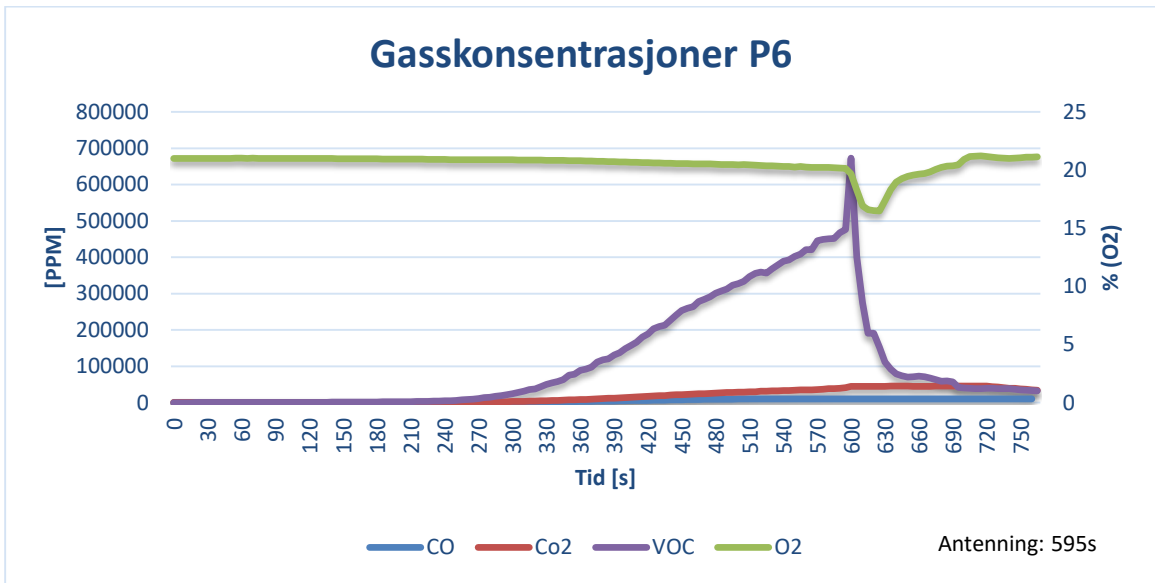
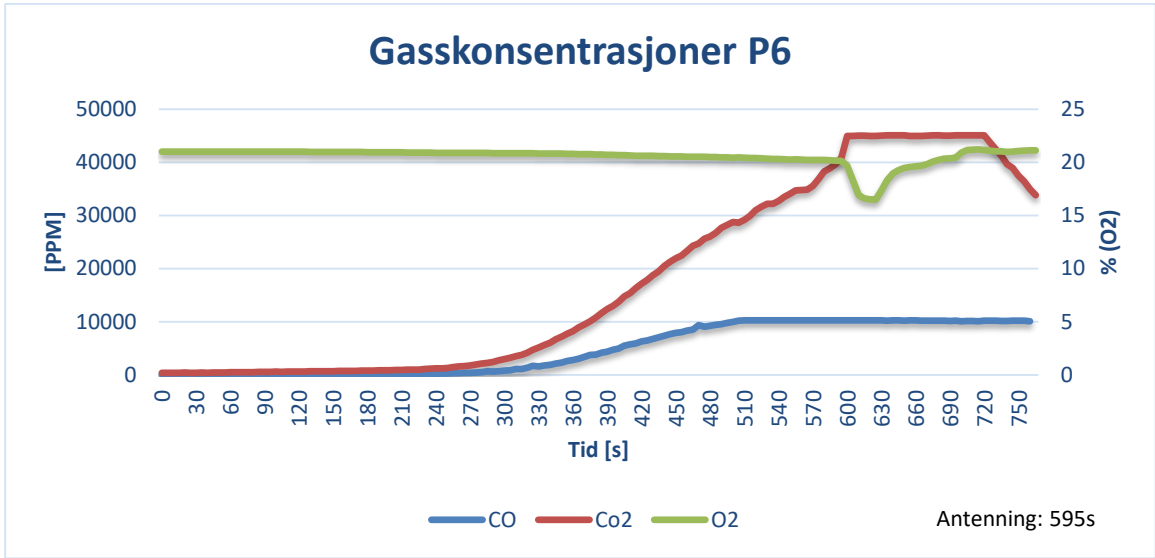


Gasskonsentrasjoner P5

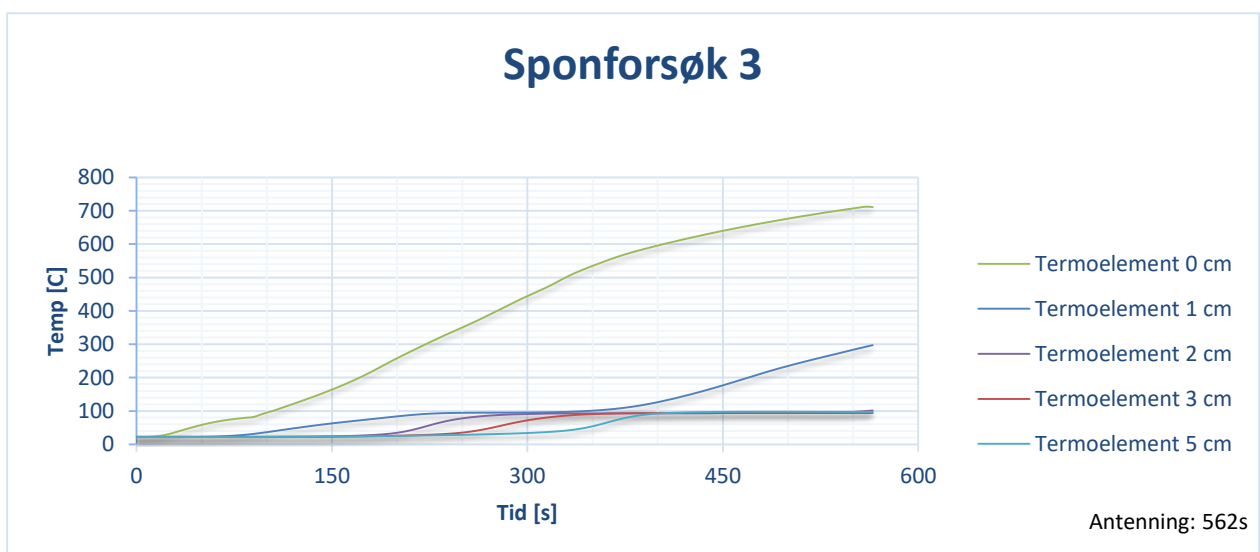
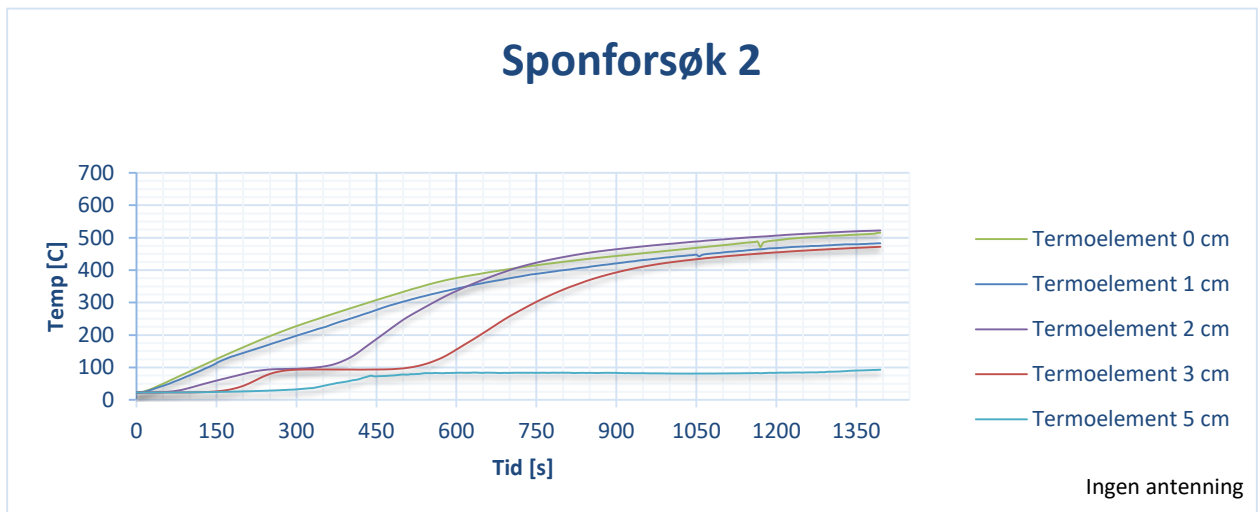
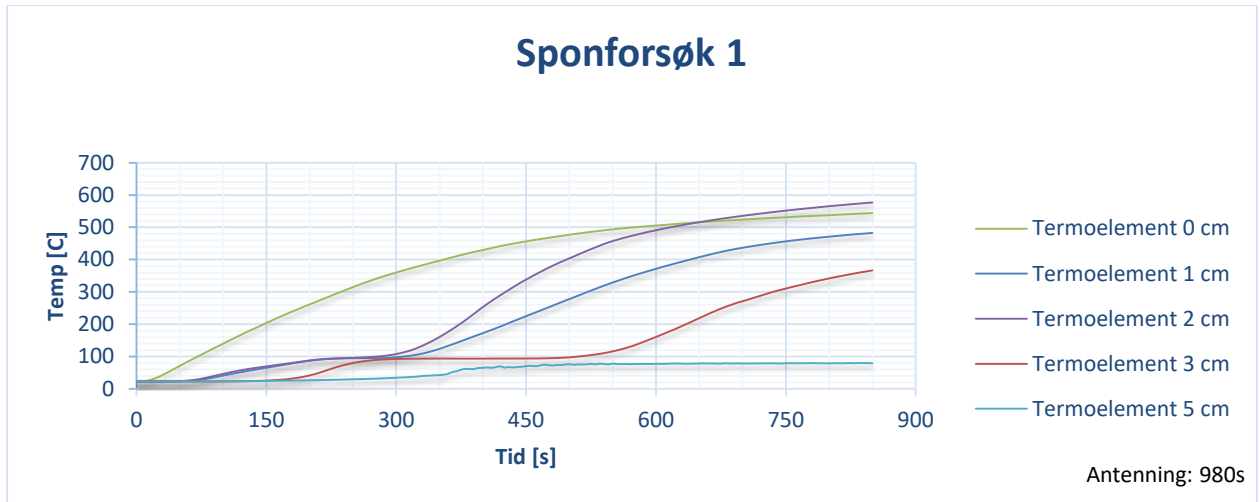


Gasskonsentrasjoner P5

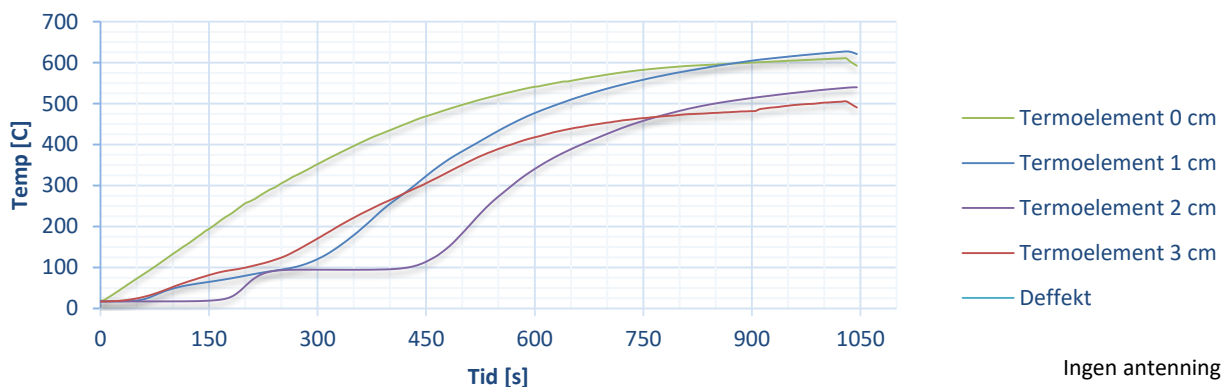




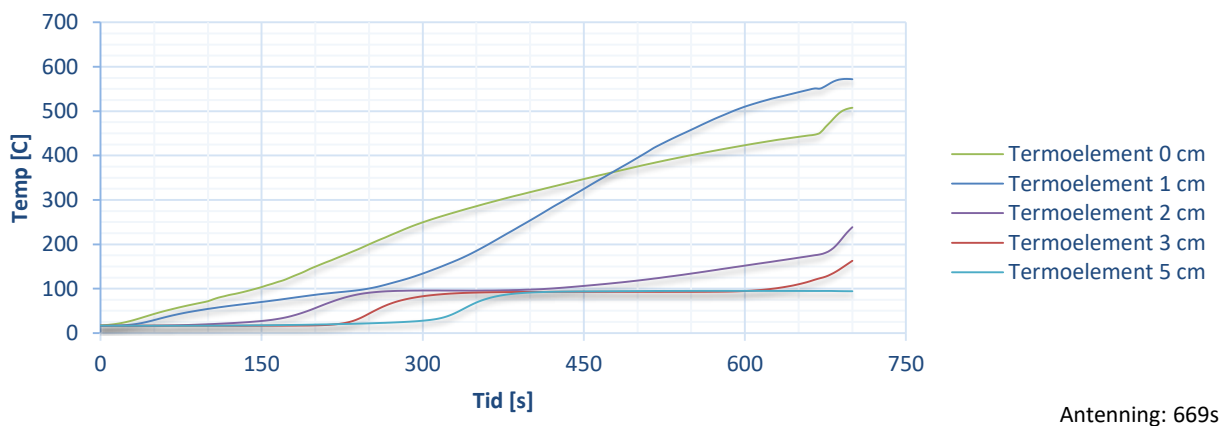
Vedlegg C - Sponforsøk



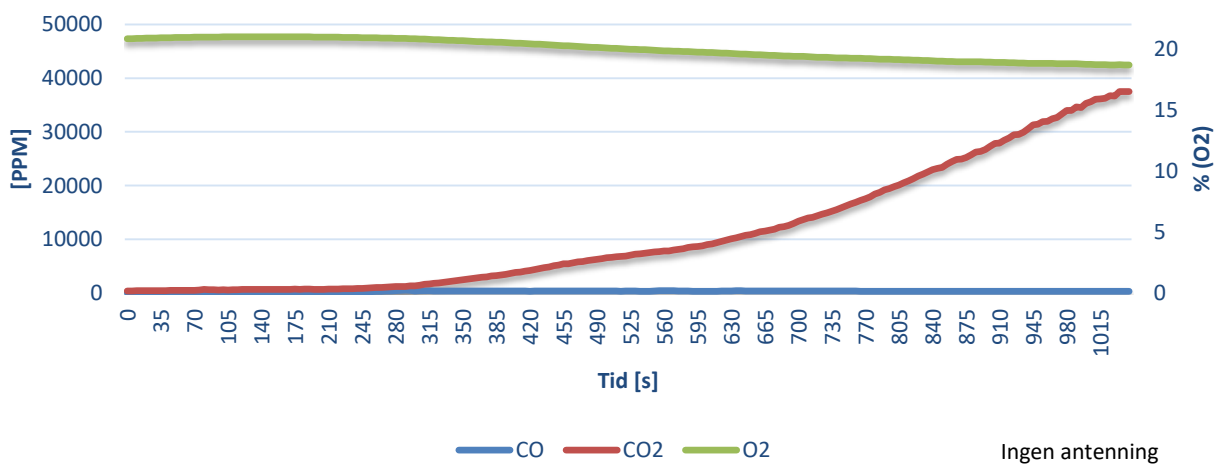
Sponforsøk 4

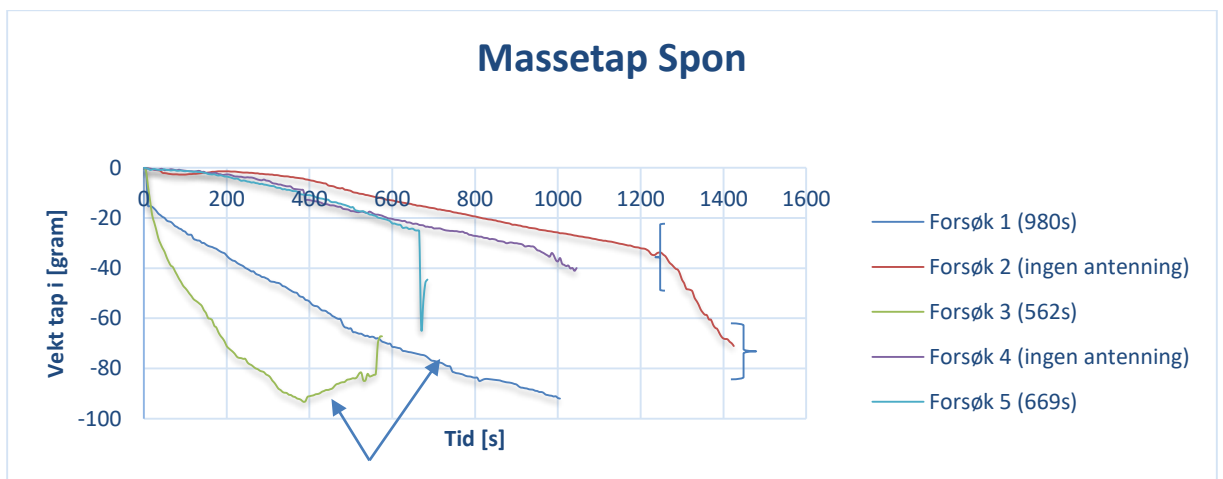
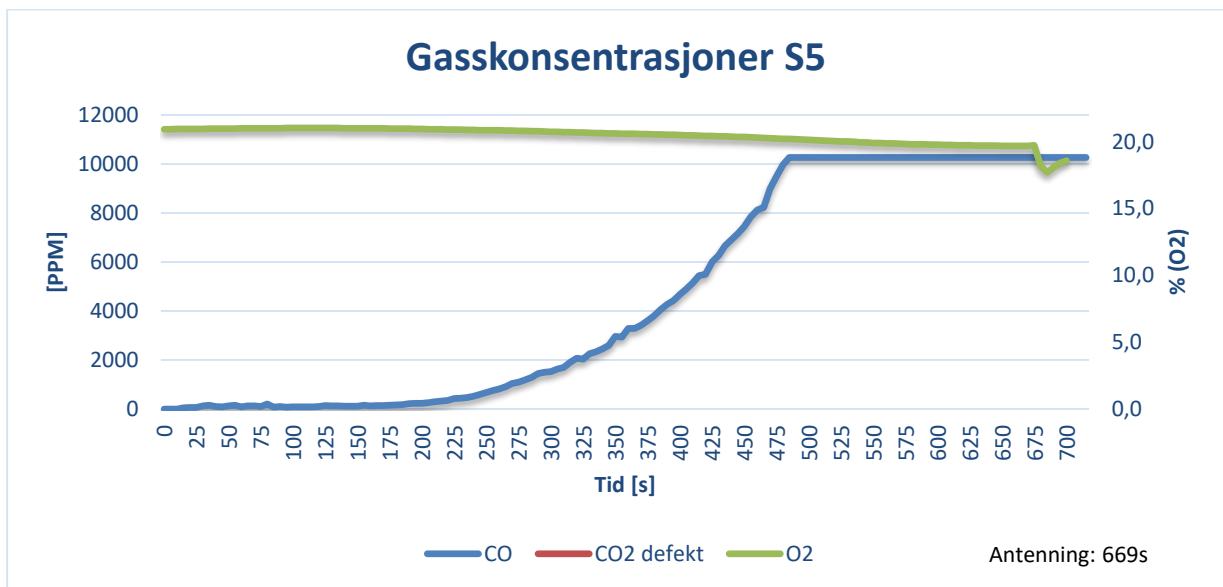
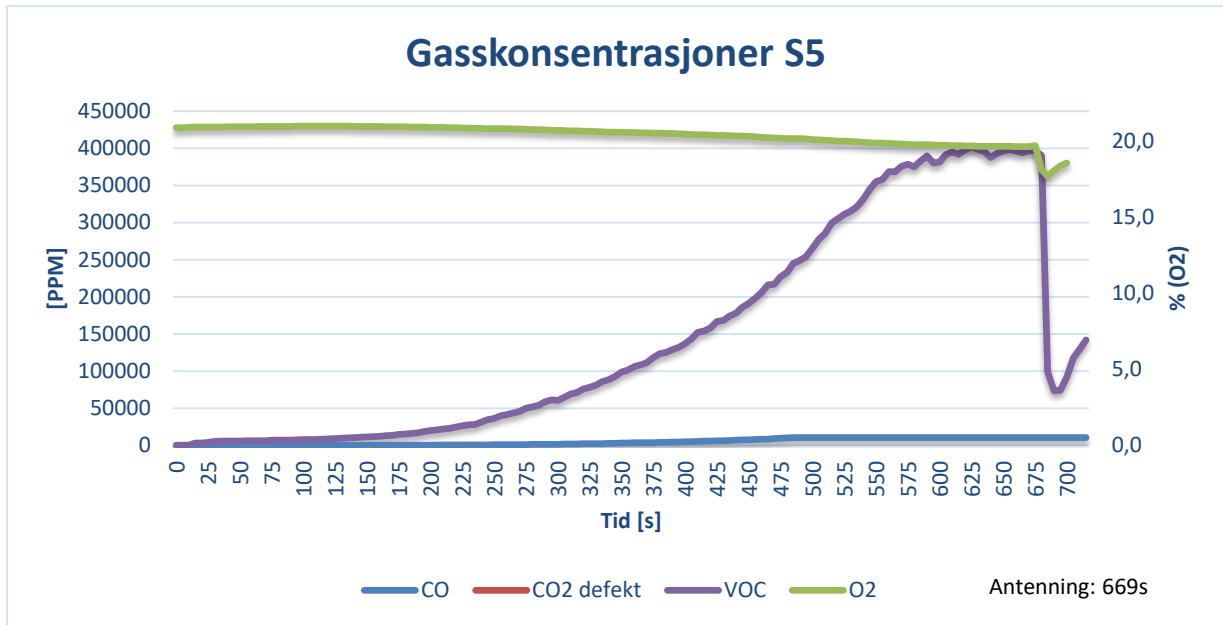


Sponforsøk 5

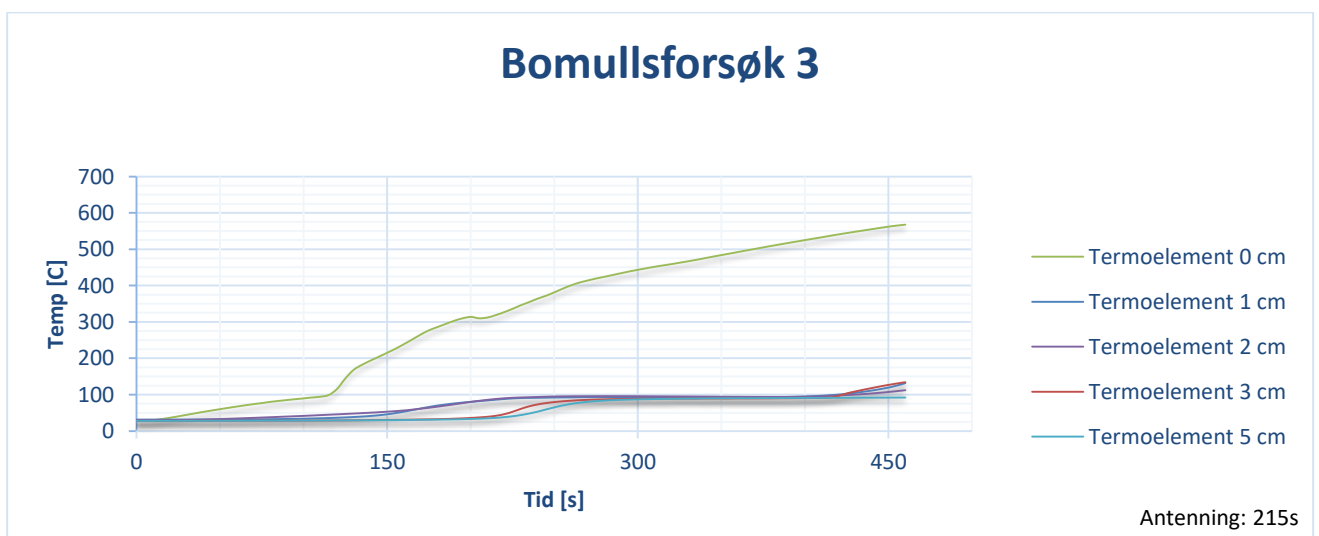
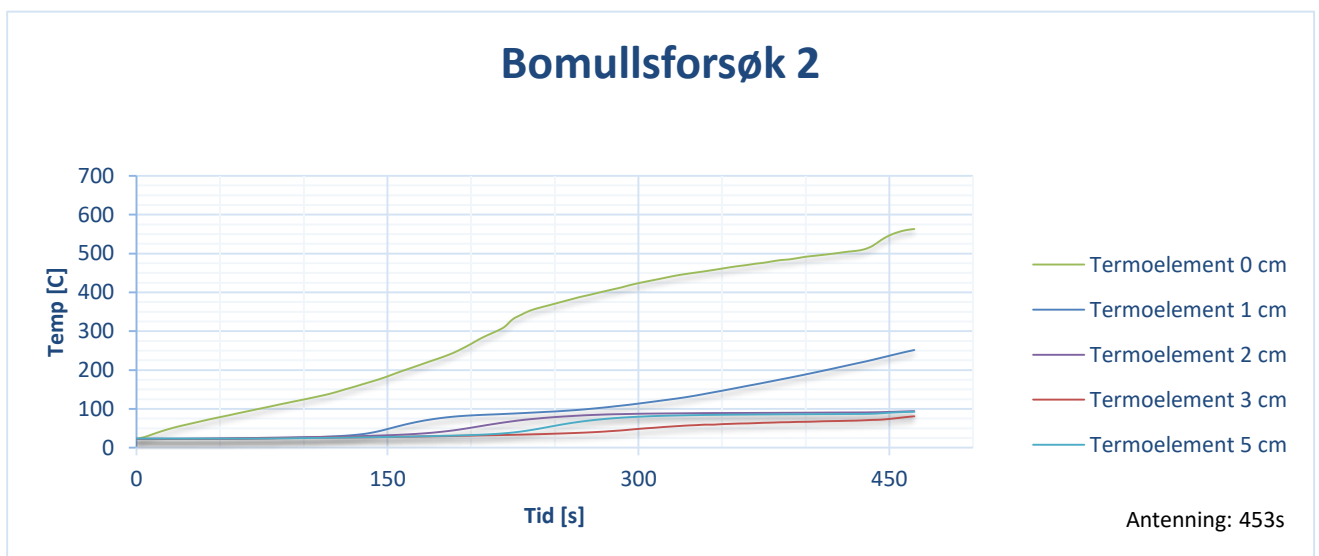
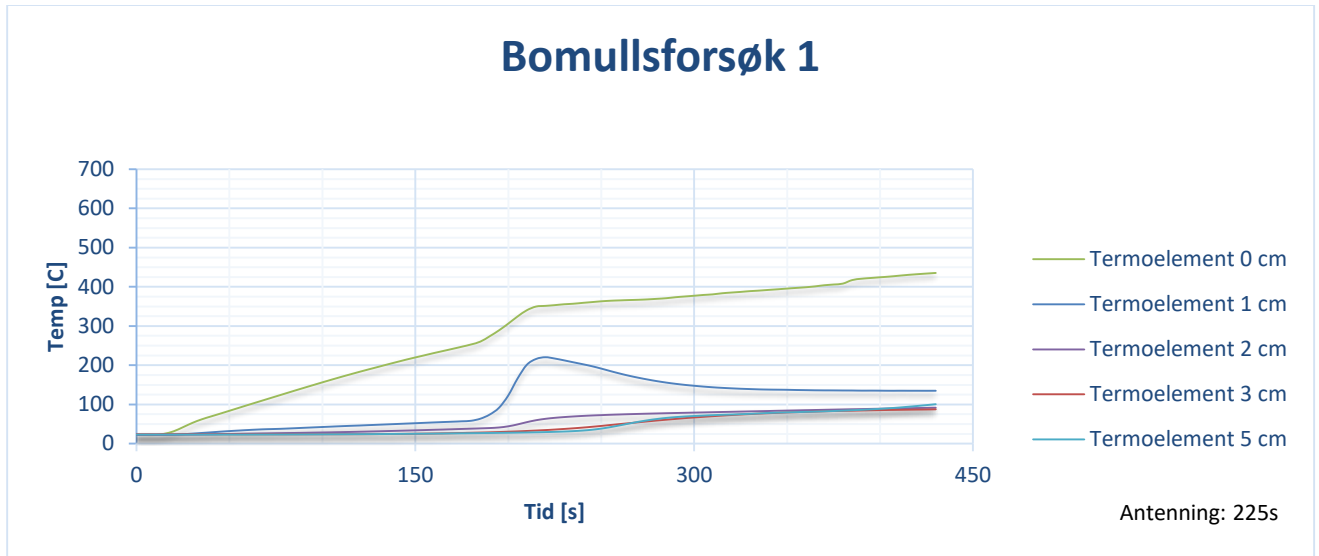


Gasskonsentrasjoner S4

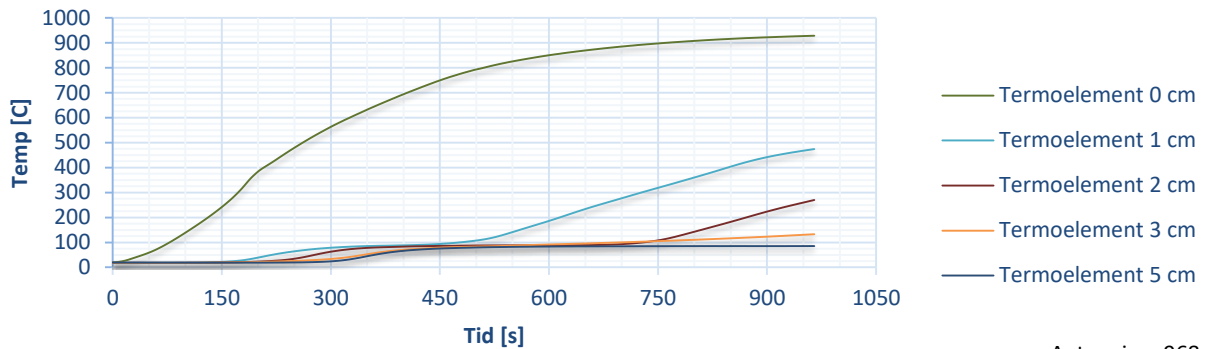




Vedlegg D – Bomullsforsøk

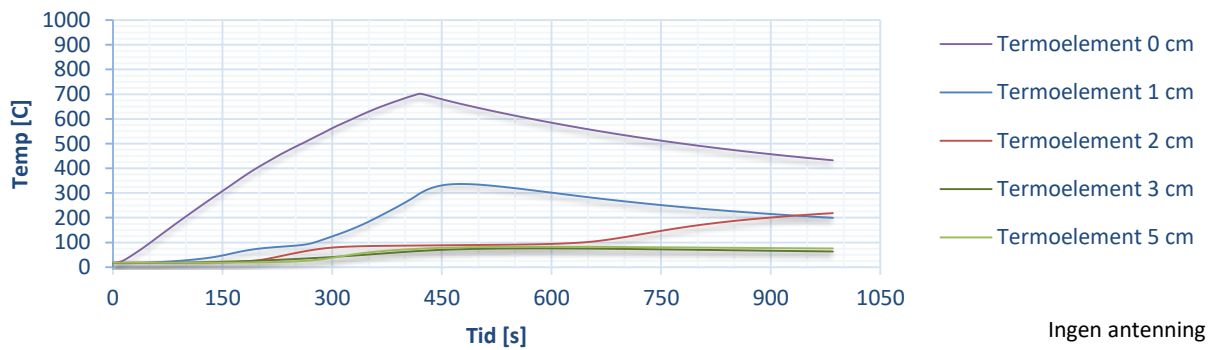


Bomullsforsøk 4



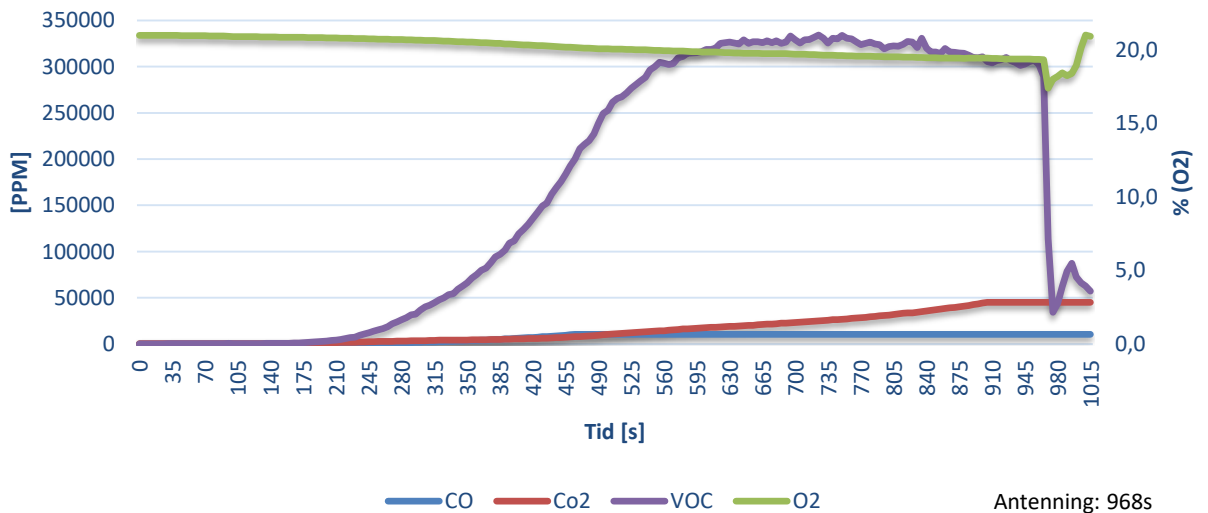
Antenning: 968s

Bomullsforsøk 5



Ingen antenning

Gasskonsentrasjoner B4



Antenning: 968s

