

Voorkomen van rookgasontbrandingen

Deelrapport: experimenten met de plofkast



Instituut Fysieke Veiligheid
Brandweeracademie
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
www.ifv.nl
info@ifv.nl
026 355 24 00

Colofon

Brandweeracademie (2019). *Voorkomen van rookgasontbrandingen*. Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid.

Opdrachtgever: Brandweeracademie
Contactpersoon: Lieuwe de Witte
Titel: Voorkomen van rookgasontbrandingen
Datum: 11 januari 2020
Status: Definitief
Versie: 1.0
Auteurs: Lieuwe de Witte en Rijk van den Dikkenberg
Projectleider: Rijk van den Dikkenberg
Review: Ricardo Weewer, Rudolf van Mierlo
Eindverantwoordelijk: Annemieke Hendriks

Abstract

Smoke ignition and smoke explosions are dangerous phenomena for firefighters, especially when performing an internal attack. In order to prevent the smoke igniting, smoke cooling techniques are applied. According to literature, cooling the smoke prevents ignition when cooled down lower than the self-ignition temperature. Furthermore, cooling reduces the radiation to which firefighters are exposed. Another phenomenon described in literature is that the steam formed during cooling makes the smoke inert. This is important, because it is well known that, in the right composition with air, cold smoke can still ignite. However, a literature study done by the Dutch Fire Service Academy showed that there is no convincing scientific evidence to the extent of the inertising, and that different terms are used in the literature. Furthermore, there is a discussion globally about the most easy and effective technique to cool and inertise smoke.

The Dutch Fire Service Academy therefore started an investigation into smoke gas cooling. The research consists of three parts. One study addresses the effectiveness of different techniques to cool the smoke. Secondly, we investigate fires where smoke explosions are reported in order to find out the mechanism and the influencing factors. Thirdly, the present report studies the inertising effect of water and nitrogen in a smoke gas layer to prevent smoke gas ignition. For safety reasons, this has been done on laboratory scale by means of so-called desktop flashover cabinets.

The purpose of these experiments was to determine whether the existing smoke gas cooling technique can prevent smoke ignition (inertisation). Based on this objective, the following main question has been formulated:

Can the introduction of water (steam or mist) or nitrogen into a smoke layer prevent smoke gas ignition?

The experiments were carried out with a cold (20 degrees Celsius) gas mixture of propane and with a hot (approximately 220 degrees Celsius) gas mixture, also of propane, in a desktop flashover cabinet. Different amounts of water spray, steam and nitrogen (which was only used with the cold gas mixture) were added to these mixtures, after which it was examined as to whether they could be ignited.

The experiments with cold gas mixtures showed that only the addition of 34% or more by volume of nitrogen made the gas mixture inert. This was not possible with water spray or steam. The experiments with hot gas mixtures showed that water could make the gas mixture inert at a percentage by volume of approximately 42% or higher.

Managementsamenvatting

Als rook aan een aantal condities voldoet, kan de rook tot ontbranding komen. Om onder andere die reden, vormt rook daarom een risico wanneer zich (brandweer)mensen in het pand van de brand bevinden. Om deze rookgasontbrandingen te voorkomen, gebruikt de brandweer de techniek 'rookgaskoeling'. Met rookgaskoeling wordt beoogd de temperatuur van de rook onder de zelfontbrandingstemperatuur te brengen. Op die manier kan de rook niet meer zelf ontbranden, en neem de straling die brandweermensen bij een binneninzet ontvangen af. Rookgaskoeling is dus een goede manier om veilig een vuurhaard te naderen als die niet direct kan worden bereikt. Er zijn echter ook nog een aantal vragen over de exacte werking en het effect van die techniek. Zo weten we dat ook koude rook in de juiste samenstelling met lucht kan ontbranden, Tijdens eerder onderzoek van de Brandweeracademie in 2013 en uit een literatuuronderzoek naar rookgaskoeling liepen we al tegen deze vragen op. In de literatuur wordt gemeld dat de stoom die tijdens het koelen wordt gevormd zorgt voor inertisering. Uit de literatuur wordt echter niet duidelijk in welke mate dit fenomeen effectief is om rookexplosies te voorkomen, en bovendien worden verschillende fysische effecten door elkaar gebruikt. Daarnaast is er wereldwijd discussie over de meest effectieve en liefst ook eenvoudige manier om rookgassen te koelen.

Daarom is de Brandweeracademie gestart met een onderzoek naar rookgaskoeling. In onderhavig rapportage wordt gekeken naar de mogelijke inertiserende werking van water en stikstof in een rookgaslaag om rookgasontbrandingen te voorkomen. Dit is om veiligheidsredenen gebeurd op laboratoriumschaal door middel van zogenaamde 'plofkast- en plofvatexperimenten'. In een andere studie wordt gekeken naar de meest eenvoudige en effectiefste manier om rook te koelen.

Het doel van dit onderzoek is om te bepalen of met de bestaande technieken voor rookgaskoeling door de brandweer een rookgasontbranding (inertisering) kan worden voorkomen. Op basis van deze doelstelling is de volgende hoofdvraag geformuleerd:

Kan door het inbrengen van water (stoom of nevel), of stikstof in een rookgaslaag een rookgasontbranding (inertisering) worden voorkomen?

Ter voorbereiding op dit onderzoek is een literatuurstudie uitgevoerd. In deze literatuurstudie is gezocht naar de methodes van rookgaskoeling (in binnen- en buitenland) en wat er op het gebied van rookgaskoeling bekend is. Uit dit literatuuronderzoek kwam naar voren dat er nog veel onduidelijkheden zijn op het gebied van rookgaskoeling. Daarom is in onderhavige rapportage dieper ingegaan op de samenstelling van rookgassen en de maatgevende kenmerken met betrekking tot rookgasontbranding om de resultaten uit de uitgevoerde experimenten te kunnen analyseren. Deze analyse is uitgevoerd aan de hand van drie beoordelingscriteria: brandbaarheidsgrenzen, inertiseringspunt en de lower oxygen concentration.

De experimenten zijn uitgevoerd met een koud (20 graden Celsius) gasmengsel (propan) in een zogenaamde plofkast en met een warm (ca. 220 graden Celsius) gasmengsel (propan)

in een zogenaamd plovvat. Aan deze mengsels zijn verschillende hoeveelheden waternevel, stoom en stikstof (alleen bij het koude gasmengsel) toegevoegd, waarna vervolgens is gekeken of dit mengsel tot ontbranding kon worden gebracht.

Bij de experimenten met koude gasmengsels bleek alleen de toevoeging van 34 vol % stikstof of meer het gasmengsel te inertiseren. Met waternevel of stoom dit was niet mogelijk. Bij de experimenten met warme gasmengsels bleek het wel mogelijk om met water het gasmengsel te inertiseren. Dit trad op bij een volumepercentage van ca. 42 % of hoger.

Inhoud

Abstract	3
Managementsamenvatting	4
Inleiding	7
Aanleiding	7
Doel	8
Hoofdvraag	8
Afbakening	8
1 Theoretisch kader	9
1.1 Literatuurstudie op het gebied van rookgaskoeling	9
1.2 Brandbaarheidsgrenzen	9
1.3 Minimale zuurstof concentratie (LOC)	13
1.4 Inertiseringspunt (IP)	15
1.5 Luchtvochtigheid	19
1.6 Beoordelingscriteria	21
2 Onderzoeksmethode	23
2.1 Algemene beschrijving	23
2.2 Verantwoording van de gekozen onderzoeksmethode	24
2.3 Parameters	26
2.4 Testprotocol	27
2.5 Kwaliteit van het onderzoek	29
3 Resultaten	30
3.1 Experimenten koude situatie	30
3.2 Experimenten warme situatie	48
4 Analyse	63
4.1 Algemeen	63
4.2 Koude situatie	63
4.3 Warme situatie	69
4.4 Samenvatting analyse	72
5 Conclusie en discussie	73
5.1 Beantwoording onderzoeksvraag	73
5.2 Discussie	73
6 Duiding	75
6.1 In hoeverre is rookgaskoeling ook inertisering	75
6.2 Voorkomen van rookgasexplosies	76
6.3 Het nut van rookgaskoeling?	77
6.4 Samenvattend	77
Literatuur	78
Bijlagen	79

Inleiding

Aanleiding

De laatste jaren is er bij de brandweer steeds meer aandacht gekomen voor het risico van ontbranding van rook. Als rook aan een aantal condities voldoet, kan de rook tot ontbranding komen. Rook vormt daarom een risico wanneer zich (brandweer)mensen in het pand van de brand bevinden. Brandweermensen kunnen immers gewond of ingesloten raken als de rook plotseling tot ontbranding (Brandweeracademie, 2017) komt. Tekenen die wijzen op een gevaar voor een rookgasontbranding zijn moeilijk te herkennen. Verschillende incidenten in het verleden tonen het gevaar van rookgasontbrandingen aan. Eén van die incidenten is de bekende brand in De Punt (2008) waarbij drie brandweerlieden zijn verongelukt bij het bestrijden van die brand (Onderzoeksraad voor Veiligheid, 2009).

Om deze rookgasontbrandingen te voorkomen, gebruikt de brandweer de techniek 'rookgaskoeling'. Met rookgaskoeling wordt beoogd de temperatuur van de rook onder de zelfontbrandingstemperatuur te brengen. Op die manier kan de rook niet meer zelf ontbranden, en neem de straling die brandweermensen bij een binneninzet ontvangen af. Rookgaskoeling is dus een goede manier om veilig een vuurhaard te naderen als die niet direct kan worden bereikt. Er zijn echter ook nog een aantal vragen over de exacte werking en het effect van die techniek. Zo weten we dat ook koude rook in de juiste samenstelling met lucht kan ontbranden. Tijdens eerder onderzoek van de Brandweeracademie in 2013 en uit een literatuuronderzoek naar rookgaskoeling liepen we al tegen deze vragen op. In de literatuur wordt gemeld dat de stoom die tijdens het koelen wordt gevormd zorgt voor inertisering. Uit de literatuur wordt echter niet duidelijk in welke mate dit fenomeen effectief is om rookexplosies te voorkomen, en bovendien worden verschillende fysische effecten door elkaar gebruikt. Daarnaast is er wereldwijd discussie over de meest effectieve en liefst ook eenvoudige manier om rookgassen te koelen.

Is de techniek wel zo veilig als men denkt en hoe kan het ontbranden van (koude) rookgassen worden voorkomen? Deze rapportage is onderdeel van het project 'rookgaskoeling'. Het onderzoek naar rookgaskoeling bestaat uit drie delen: ten eerste wordt onderzocht welke methode het eenvoudigst toe te passen en toch effectief is om rook te koelen, ten tweede worden praktijkincidenten onderzocht om te bepalen welke factoren een rol spelen bij koude rookexplosies, en ten derde, en daar gaat dit rapport over, willen we weten in welke mate inertisering een rol speelt bij het voorkomen van rookgasontbrandingen, zowel van koude als warme rook. Ter voorbereiding op de experimenten beschreven in deze rapportage is door de Brandweeracademie een literatuuronderzoek op het gebied van rookgaskoeling uitgevoerd (Brandweeracademie, 2017). In deze literatuurstudie wordt onder andere aandacht besteed aan de methodes van rookgaskoeling (in binnen- en buitenland) en wat er op het gebied van rookgaskoeling bekend is uit onderzoek.

In deze rapportage wordt gekeken naar de mogelijke inertiserende werking van water en stikstof in een rookgaslaag. Dit gebeurt door middel van zogenaamde 'plofkast- en plofvatexperimenten'.

Doel

Het doel van dit onderzoek is om te bepalen of met de bestaande technieken voor rookgaskoeling door de brandweer een rookgasontbranding (door inertisering) kan worden voorkomen.

Hoofdvraag

Op basis van de doelstelling van dit rapport, kan de volgende hoofdvraag geformuleerd worden:

Kan door het inbrengen van water (stoom of nevel), of stikstof in een rookgaslaag een rookgasontbranding (inertisering) worden voorkomen?

Afbakening

In dit onderzoek wordt gekeken naar het inbrengen van water en stikstof in een rookgaslaag, andere inerte gassen zijn niet meegenomen in de experimenten.

Het onderzoek beperkt zich tot het experimenteren op kleine schaal. De experimenten worden uitgevoerd met behulp van de zogenaamde 'plofkast' en/of 'plofvat'. Als gas is propaan gebruikt terwijl rookgassen een veelheid aan verschillende gassen kunnen bevatten. Er is gekozen voor experimenten op kleine schaal in verband met de veiligheid.

1 Theoretisch kader

1.1 Literatuurstudie op het gebied van rookgaskoeling

In deze literatuurstudie (Brandweeracademie 2017) wordt onder andere aandacht besteed aan de methodes van rookgaskoeling (in binnen- en buitenland) en wat er op het gebied van rookgaskoeling bekend is uit onderzoek.

Samenvattend is met betrekking tot de huidige werkwijzen het volgende geconstateerd:

- > Een belangrijk deel van de (wetenschappelijke) publicaties gaat over het initieel omlaag brengen van de temperatuur van een rookgaslaag. Hierbij wordt onder meer gekeken naar de wijze waarop water in de rookgaslaag gebracht wordt (bijvoorbeeld met welke methode, oppervlakte of 3D koeling, en met welk debiet, welke druk, druppelgrootte, kegelhoek en spuithoek).
- > Minder aandacht is er in de literatuur voor de vraag hoe deze temperatuurverlaging gehandhaafd kan worden (zolang de brand niet onder controle is gebracht) en wat deze temperatuurverlaging betekent voor de brandbaarheid van de rookgaslaag en de kans op ontsteking.
- > Sommige auteurs hebben het over het 'inertiseren' van een rookgaslaag. Niet alle auteurs geven duidelijk aan wat zij hiermee precies bedoelen. Wanneer wel een definitie gegeven wordt, is niet altijd duidelijk of er een verschil bestaat tussen inertiseren en verdunnen, en zo ja waaruit dit verschil dan bestaat. Bovendien blijken de gegeven definities van elkaar te verschillen. Op basis van het vijfde *SFPE Handbook* (SFPE, 2016) kan gesteld worden dat inertiseren en verdunnen twee verschillende dingen zijn, die echter in praktijk gelijktijdig zullen optreden en tot hetzelfde effect zullen leiden (namelijk het verlagen van de kans op ontbranding).
- > Over de uitvoerbaarheid van de (door sommige auteurs veelgenoemde) 3D-techniek bestaat discussie. Hoewel deze techniek in theorie veelbelovend is, plaatsen sommige auteurs vraagtekens bij het vereiste niveau van kennis en vaardigheden om deze techniek correct uit te voeren.
- > Het koelen van een rookgaslaag kan vanwege stoomvorming onbedoeld tot een grote fysieke belasting en zelfs brandwonden leiden voor brandweermensen die zich in dezelfde ruimte bevinden als de rookgaslaag die ze proberen te koelen of te inertiseren.

Om de in deze rapportage beschreven experimenten te kunnen analyseren, is het van belang om dieper in te gaan op de theorie van gasmengsels en de maatgevende kenmerken met betrekking tot rookgasontbranding. In de volgende paragrafen wordt hier nader op ingegaan.

1.2 Brandbaarheidsgrenzen

Niet alle gasmengsels kunnen tot ontbranding komen. Van belang voor een ontbranding is de aanwezigheid van brandstof (brandgassen), zuurstof en (ontstekings)energie. Daarnaast dienen de brandgassen en de zuurstof in de juiste samenstelling (mengverhouding)

aanwezig te zijn. Binnen bepaalde grenzen is het mengsel brandbaar; deze grenzen worden de brandbaarheidsgrenzen genoemd. De grenzen worden per gas meestal aangegeven in een volumepercentage in lucht. Voor een aantal relevante gassen zijn in onderstaande tabel de brandbaarheidsgrenzen (*lower and upper flammability limit*), onderste temperatuurlimiet (*lower temperature limit*) en zelfontbrandingstemperatuur (*auto ignition temperature*) weergegeven (SFPE, 2016).

Tabel 1: Brandbaarheidsgrenzen (flammability limits), onderste en bovenste brandbaarheidsgrens (respectievelijk LFL en UFL), onderste temperatuurlimiet (TL) en zelfontbrandingstemperatuur (AIT)

Brandbaar gas	LFL [vol %]	UFL [vol %]	T _L [°C]	AIT [°C]
Methaan	5	15	-187	540
Propaan	2.1	9.5	-102	450
Koolmonoxide	12.5	74	-191	609
Styreen	1.1	6.1	31	490

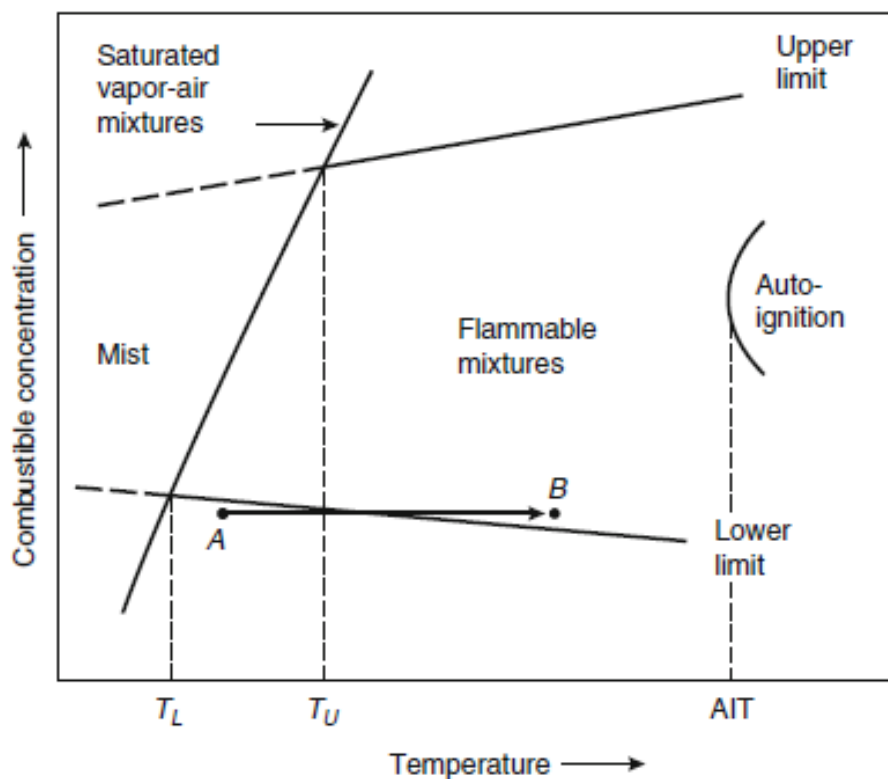
Craig Beyler geeft in zijn bijdrage aan de vijfde editie van het *SFPE Handbook of Fire engineering* uit 2016 een uitgebreide lijst van de brandbaarheidsgrenzen van individuele gassen en dampen in lucht bij atmosferische druk en relatief lage temperaturen (SFPE, 2016).

De brandbaarheidsgrenzen zijn een functie van de zuurstof- en inerte gasconcentraties, evenals de temperatuur en de druk van het mengsel. Als de concentratie van inerte gassen wordt gereduceerd en de zuurstofconcentratie toe neemt, zal ook de bovenste brandbaarheidsgrens stijgen, terwijl de onderste brandbaarheidsgrens relatief onveranderd blijft (SFPE, 2016). Dit kan worden verklaard door het feit dat de zuurstofconcentratie voor de onderste brandbaarheidsgrens geen rol speelt, omdat er voldoende zuurstof aanwezig is. Voor de bovenste brandbaarheidsgrens neemt de toegevoegde zuurstof echter deel aan het verbrandingsproces.

De onderste brandbaarheidsgrens is ook ongevoelig voor druk, behalve voor drukken ver onder de atmosferische druk. De bovenste brandbaarheidsgrens deelt deze ongevoeligheid voor sub-atmosferische drukken, maar neemt toe bij supra-atmosferisch drukken (SFPE, 2016).

De grenzen worden ruimer bij een toenemende temperatuur van het mengsel. De onderste brandbaarheidsgrens wordt lager en de bovenste brandbaarheidsgrens hoger bij toenemende temperatuur. Dit is weergegeven in figuur 1 uit (SFPE, 2016).

Figuur 1: Brandbaarheidsgrenzen (SFPE, 2016)



De onderste temperatuurlimiet (Lower Limit) in de figuur staat gelijk aan het vlampunt van een vloeistof. Zoals echter uit de figuur blijkt, kan een mengsel met een bepaalde concentratie brandbare gassen (punt A) bij een toenemende temperatuur en gelijkblijvende concentratie binnen de brandbaarheidsgrenzen worden gebracht (B). In tabel 2 is de onderste brandbaarheidsgrens van een aantal gassen weergegeven bij verschillende temperaturen (SFPE, 2016).

Tabel 2: Tabel onderste brandbaarheidsgrens gassen bij verschillende temperaturen

Brandbaar gas	Start temp. [°C]	LFL [vol %]				
		100 [°C]	150 [°C]	200 [°C]	250 [°C]	300 [°C]
Methaan	5 ^a	4.9	4.7	4.5	4.3	4.1
Propaan	2.1 ^a	2.0	2.0	1.9	1.8	1.7
Koolmonoxide	12.5 ^a	12.1	11.5	10.8	10.1	9.5
Styreen	1.1 ^b	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9

^a T = 70 °C

^b T = 29 °C

Voor de bovenste temperatuur limiet (Upper Limit) kan ook een dergelijk verloop worden gespecificeerd, waarbij de limiet oploopt bij een toenemende temperatuur. Dit is gebaseerd op de aangepaste wet van Burgess en Wheeler, nader toegelicht in onder andere het onderzoek van Filip van den Schoor (Van den Schoor, 2007). In tabel 3 is voor propaan de bovenste brandbaarheidsgrens bij een toenemende temperatuur weergegeven.

Tabel 3: Tabel bovenste brandbaarheidsgrens propaan bij verschillende temperaturen

Brandbaar gas	UFL [vol %]					
	Start temp. [°C]	100 [°C]	150 [°C]	200 [°C]	250 [°C]	300 [°C]
Propaan	9.5 ^a	10.0	10.6	11.3	12.0	12.6

^a T = 70 °C

In de praktijk zal de rook niet bestaan uit één brandbaar gas, maar uit een combinatie van gassen. Met 'Le Chaterlier's rule' kan de onderste brandbaarheidsgrens van een mengsel van brandgassen worden bepaald, als de aanwezige concentraties gassen bekend zijn (Brandweeracademie, 2017; SFPE, 2016).

Een ander belangrijk aspect dat van belang is bij de onderste brandbaarheidsgrens is de kritische adiabatische vlamtemperatuur (Adiabatic Flame Temperature, AFT). De kritische AFT kan worden gezien als de grens waaronder de warmteverliezen de snelheid van warmteproductie binnen de vlam overschrijden. Als gevolg daarvan kan de vlam zichzelf niet onderhouden. Dit concept kan worden gebruikt om bijvoorbeeld te bepalen bij welke samenstelling van een gas/luchtmengsel en een toegevoegd inert gas er geen ontbranding meer kan plaats vinden. Op basis van de reactievergelijking van dergelijke gas/luchtmengsels kan de AFT behorende bij de onderste brandbaarheidsgrens worden berekend, de zogenaamde kritische AFT. In bijlage 2 is voor propaan, methaan en koolstofmonoxide de kritische AFT bepaald op basis van de reactievergelijking.

De kritische AFT is voor de meeste brandstoffen die bestaan uit kool-, water- en zuurstof gelijk en is ongeveer 1600 K (± 150 K). Uitzonderingen zijn waterstof (980 K), koolmonoxide (1300 K) en acetyleen (1280 K). Deze AFT is een indicatie voor de reactiviteit van de brandstof: hoe lager deze temperatuur, hoe reactiever de brandstof (SFPE, 2016).

In tabel 4 zijn voor een aantal koolwaterstoffen de berekende AFT bij de onderste brandbaarheidsgrens weergegeven.

Tabel 4: AFT van koolwaterstof/lucht mengsels bij de onderste brandbaarheidsgrens

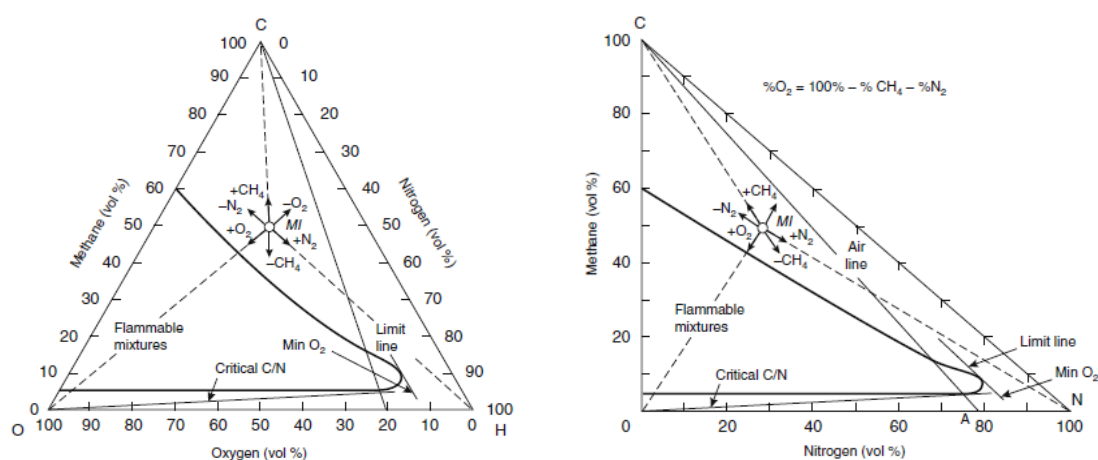
Gas	AFT bij onderste brandbaarheidsgrens (K)
Methaan	1446
Ethaan	1502
Propaan	1554
<i>n</i> -Butaan	1612
<i>n</i> -Pentaaan	1564
<i>n</i> -Heptaan	1692
<i>n</i> -Octaan	1632

Het nut van het concept van de kritische AFT bij de onderste brandbaarheidsgrens gaat echter verder dan het kennen van de reactiviteit van de brandstof. In paragraaf 1.4 wordt hier nader op ingegaan.

1.3 Minimale zuurstofconcentratie (LOC)

In algemene zin kunnen de brandbaarheidsgrenzen van brandstof, zuurstof en inerte mengsels beter worden weergegeven in brandbaarheidsdiagrammen. Twee voorbeelden van het brandbaarheidsdiagram van methaan zijn weergegeven in figuur 2 (SFPE, 2016). Hierbij moet worden opgemerkt dat deze grafieken gelden bij omgevingstemperatuur.

Figuur 2: Brandbaarheidsdiagram



Deze diagrammen zijn gebaseerd op uitgebreide series van testen met een reeks van verschillende mengselsamenstellingen. Van belang voor een mengsel in omgevingslucht zijn de luchtlijn en de limietlijn (air and limit line). De limietlijn geeft een reeks van mengsels met

een vaste zuurstof/stikstofverhouding weer die het onbrandbare gebied raken. Elk zuurstof/stikstofmengsel met een zuurstof/stikstof ratio kleiner dan de limiet zal geen verbranding ondersteunen wanneer het gemengd wordt met een hoeveelheid methaan. Deze conditie staat bekend als de 'limiting oxygen concentration' (LOC) (SFPE, 2016). Deze LOC speelt een belangrijke rol bij inertisering. Als de zuurstofconcentratie onder de LOC kan worden gehandhaafd, kan ontbranding van gasen worden voorkomen.

In tabel 5 is van een aantal gasen de LOC-waarde aangegeven voor stikstof en koolstofdioxide als inerte verdunningsgasen bij omgevingstemperatuur en omgevingsdruk (SFPE, 2016).

Tabel 5: Tabel LOC-waarde (limiting oxygen concentration) bij omgevingstemperatuur en druk

Brandbaar gas	LOC N ₂ /lucht [vol %]	LOC CO ₂ /lucht [vol %]
Propaan	11.5	14.5
Hexaan	12	14.5
Koolmonoxide	5.5	5.5
Waterstof	5	5.2

Uit de uitgebreide lijst van het SFPE Handbook blijkt dat de LOC-waarde met stikstof als verdunningsgas over het algemeen tussen de 10-12 % ligt. Alleen koolmonoxide en waterstof hebben een lagere LOC-waarde. Voor koolstofdioxide als verdunningsgas ligt de LOC-waarde ten opzichte van stikstof ongeveer 2 tot 3 % hoger (SFPE, 2016).

Voor waterdamp als verdunningsgas zijn in het SFPE Handbook geen LOC-waarden opgenomen. In een onderzoek van Giurcan (Giurcan, 2013) op basis van bestaande bronnen zoals die van het Amerikaanse bureau voor mijnen (Zabetakis, 1965) en de Duitse database van veiligheidskenmerken van explosiebeveiliging (CHEMSAFE, 2009) kunnen de LOC-waarden worden gevonden die zijn opgenomen in tabel 6.

Tabel 6: LOC-waarde (limiting oxygen concentration) bij verschillende temperaturen en omgevingsdruk

Brandbaar gas	LOC N ₂ /lucht [vol %]	LOC H ₂ O/lucht [vol %]	LOC CO ₂ /lucht [vol %]
Propaan 298 K	11.6 ¹⁾	-	14.3 ¹⁾
Propaan 373 K	9.2 ²⁾	12.5 ²⁾	-
Propaan 473 K	-	11.5 ²⁾	-
Propaan 523 K	7.2 ²⁾	-	11.1 ²⁾

¹⁾ (Zabetakis, 1965)

²⁾ (CHEMSAFE, 2009)

Hoewel de LOC-waarde voor waterdamp in lucht bij omgevingstemperatuur niet bekend is, zal deze waarde naar verwachting tussen die van koolstofdioxide (11.5 – 11.6 %) en stikstof (14.3 – 14.5 %) in liggen.

1.4 Inertiseringspunt (IP)

Naast de LOC-waarde en de ATF is het inertiseringspunt van belang. Het inertiseringspunt van een brandstof/zuurstofmengsel is het punt met de hoogste concentratie inert gas waarbij verbranding nog mogelijk is. In algemene zin wordt dit punt aangeduid voor elk inert gas als inertiseringspunt (Inert Point, IP). Is er bijvoorbeeld sprake van stikstof als inert gas dan wordt dit punt aangeduid als stikstofpunt (Nitrogen Point, NP). Als de concentratie van het inerte verdunningsgas groter is dan het IP, zal geen enkel brandstof/zuurstofmengsel tot ontbranding komen, onafhankelijk van de ontstekingsbron (SFPE, 2016).

Zoals in paragraaf 1.2 is aangegeven, kan de kritische AFT worden gezien als de grens waaronder de warmteverliezen de snelheid van warmteproductie binnen de vlam overschrijden. Door het toevoegen van voldoende inert gas aan een brandbaar mengsel kan de kritische AFT niet bereikt worden. Dit betekent dat de warmteproductie van de vlam lager is dan de warmteverliezen voor het opwarmen van inerte gassen. Hierdoor kan de vlam zichzelf niet onderhouden en vindt er geen ontbranding plaats. Oftewel: op basis van de kritische AFT kan het IP voor inerte gassen worden bepaald.

In tabel 7 is voor propaan, methaan en koolmonoxide het IP (volumepercentage) van waterdamp en stikstof weergegeven waarbij geen ontbranding kan plaatsvinden, bepaald op basis van de kritische AFT. In bijlage 2 is een nadere toelichting gebaseerd op de reactievergelijkingen van deze stoffen weergegeven.

Tabel 7: IP van waterdamp en stikstof bij verschillende gassen op basis van de AFT

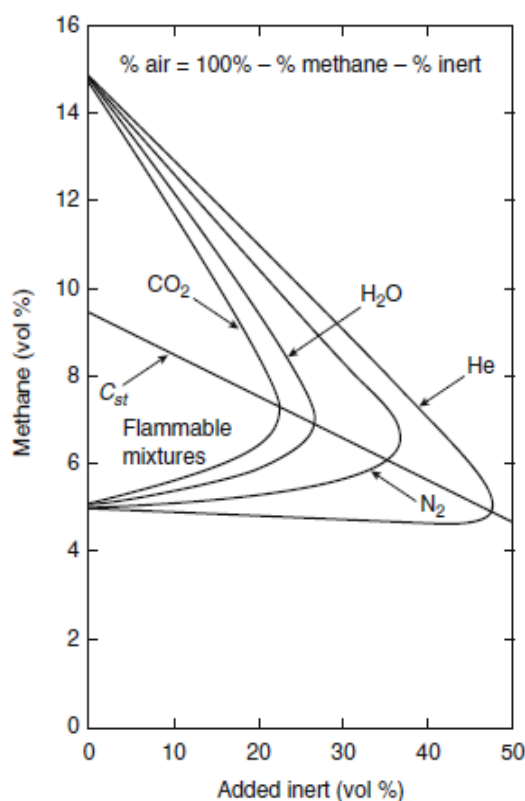
Gas	Waterdamp [%]	Stikstof [%]
Propaan	41	47
Methaan	42	48
Koolmonoxide	56	61

Experimenteel worden lagere waarden gevonden voor het inertiseringspunt. Dit komt onder andere doordat in het concept van de AFT uitgegaan wordt van adiabatische omstandigheden. Dit wil zeggen dat er geen sprake is van warmte-uitwisseling met de omgeving. In de praktijk is dat echter wel het geval.

In figuur 3 is een andere weergave van de brandbaarheidsgrenzen van methaan bij verdunning door inerte gassen weergegeven. Deze figuur is een uitvergroting van het rechterdeel naast de luchtlimietlijn uit het brandbaarheidsdiagram (in figuur 2).

In figuur 3 is ook de stoichiometrische lijn (C_{st}) opgenomen. Het punt waar de stoichiometrische lijn het brandbaarheidsgebied snijdt, is de stoichiometrische limiet (SL). De SL is het meest verdunde stoichiometrische mengsel dat nog tot ontbranding kan komen (SFPE, 2016). Voor waterdamp als verdunning ligt dit punt bij een volumepercentage methaan rond de 7 %, een volumepercentage waterdamp van 27 % en lucht van 66 %.

Figuur 3: Brandbaarheidsgrenzen van methaan bij verdunning door inerte gassen (SFPE, 2016)

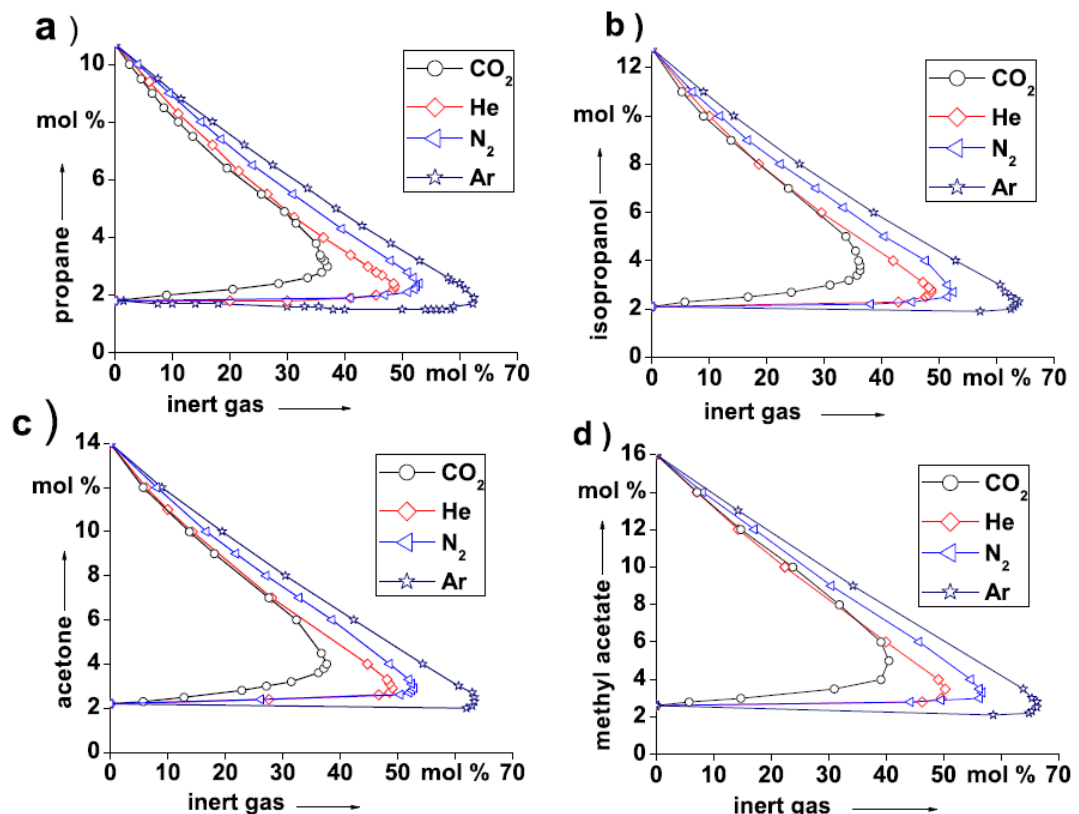


Zoals aangegeven door middel van het concept van de kritische adiabatische vlamtemperatuur, wordt de onderste brandbaarheidsgrens verhoogd in verhouding tot de warmtecapaciteit van het verdunningsgas.

Voor propaan zijn in het SFPE-handboek (SFPE, 2016) geen brandbaarheidsdiagrammen opgenomen. In een onderzoek van Saito en Liao (Saito, 2004) wordt een volumepercentage van 35-40 % genoemd als IP voor waterdamp als inert gas voor propaan. In een onderzoek van Abdelkhalik (Abdelkhalik, 2016) zijn brandbaarheidsdiagrammen van diverse koolwaterstoffen met verschillende inerte gassen opgenomen. Waterdamp is niet als inert gas in het onderzoek meegenomen, in tegenstelling tot stikstof en koolstofdioxide.

Figuur 4: Brandbaarheidsgrenzen van propaan en aceton bij verdunning door inerte gassen (Abdelkhalik, 2016)

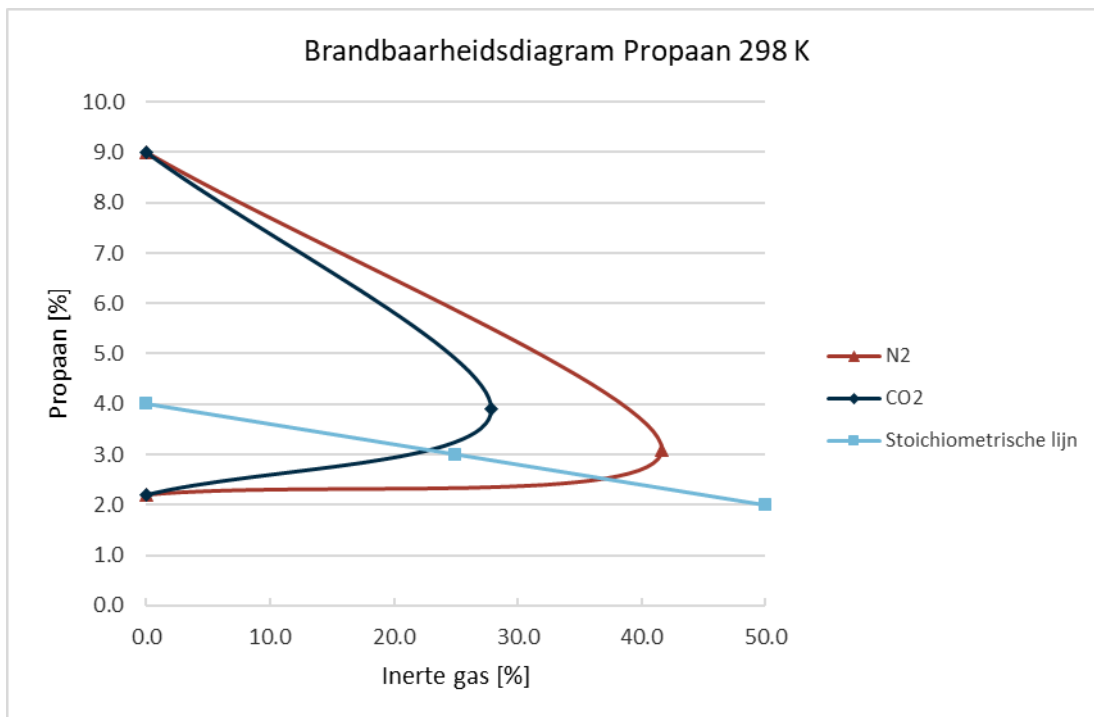
A. Abdelkhalik et al. / Journal of Loss Prevention in the Process Industries 43 (2016) 669–675



Uit figuur 3 blijkt dat het volumepercentage van toegevoegde waterdamp ligt tussen dat van koolstofdioxide en stikstof. Hiervan uitgaand, zal het IP voor waterdamp waarbij geen ontbranding meer mogelijk is, op basis van figuur 4, theoretisch tussen de 37 – 53 % liggen.

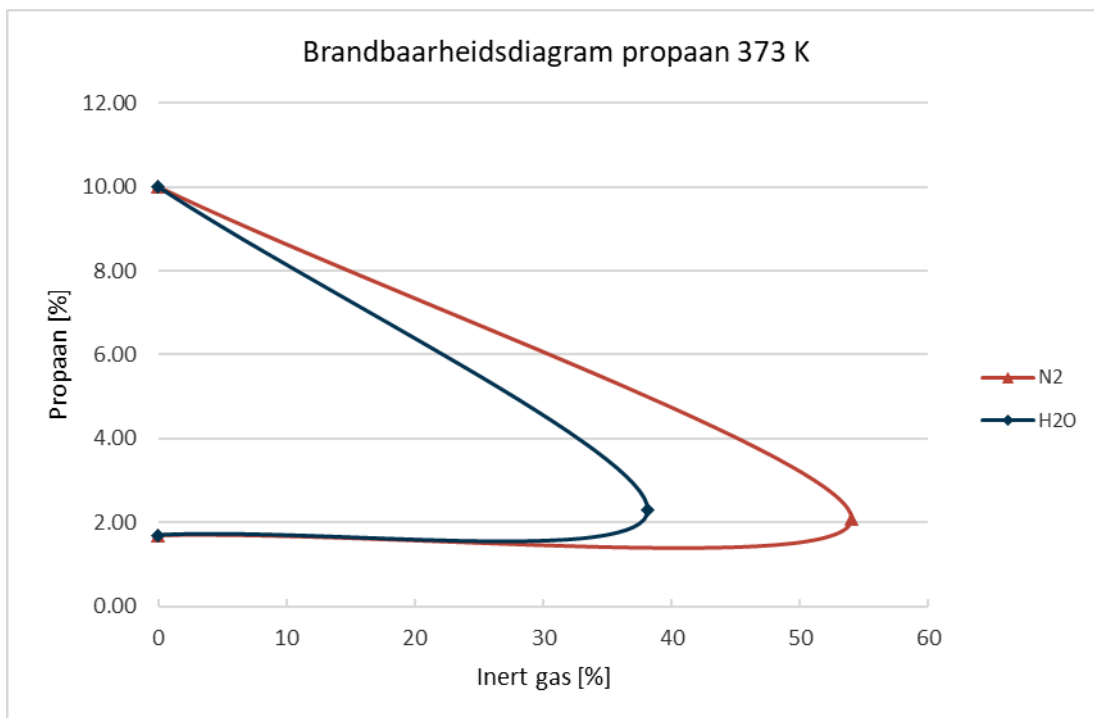
Op basis van onderzoek van Giurcan (Giurcan, 2013) kunnen voor propaan de volgende brandbaarheidsdiagrammen worden afgeleid:

Figuur 5: Brandbaarheidsdiagram Propaan 298 K



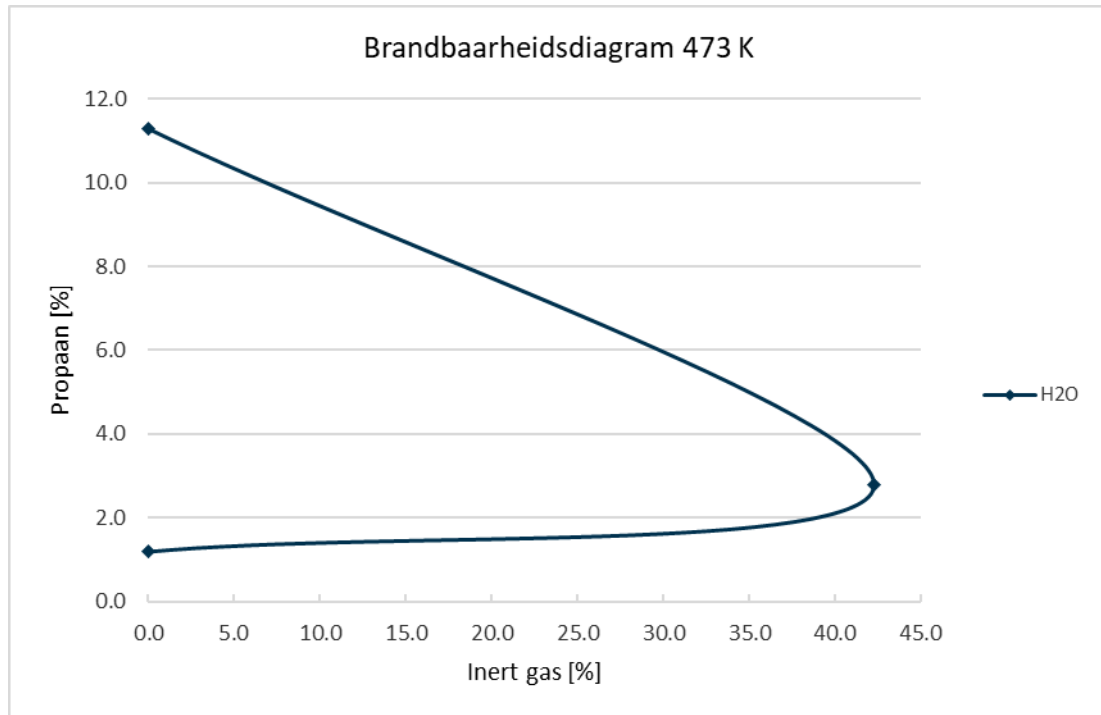
Bij een omgevingstemperatuur en atmosferische druk komt dit neer op een IP voor waterdamp tussen de 28 % en 42 % (volumepercentage).

Figuur 6: Brandbaarheidsdiagram propaan 373 K



Bij een temperatuur van 100 °C en atmosferische druk komt dit neer op een IP voor waterdamp van ongeveer 38% (volumepercentage).

Figuur 7: Brandbaarheidsdiagram 473 K



Bij een temperatuur van ongeveer 200 °C en atmosferische druk komt dit neer op een IP voor waterdamp van ongeveer 42 % (volumepercentage).

Hierbij moet worden opgemerkt dat deze diagrammen zijn samengesteld op basis van drie meetpunten uit diverse beschikbare data (Giurcan, 2013). De grenzen van deze diagrammen staan dus niet exact vast maar zijn afgeleid. Dit betekent dat er enige foutmarge aanwezig is.

1.5 Luchtvochtigheid

Zoals al eerder aangegeven, zijn de brandbaarheids grenzen temperatuurafhankelijk. Dit geldt voor elk brandstof/zuurstofmengsel met inerte gassen. Bij waterdamp als inert gas is de hoeveelheid waterdamp in lucht echter ook temperatuurafhankelijk. Dit kan nader worden toegelicht op basis van de luchtvochtigheid.

De luchtvochtigheid is de hoeveelheid waterdamp aanwezig in lucht. Waterdamp is in gasvorm niet zichtbaar voor het menselijk oog. De luchtvochtigheid is een maat om bijvoorbeeld aan te geven of er kans is op dauw of mist. Lucht kan verzadigd raken waardoor er de hoeveelheid waterdamp daar niet meer kan toenemen. Het punt waarop de lucht verzadigd raakt, wordt het verzadigingspunt of dauwpunt genoemd. De hoeveelheid waterdamp die lucht kan bevatten is onder het kookpunt van water temperatuurafhankelijk.

Indien de temperatuur daalt en de dampdruk gelijk blijft, zal het overtollige deel aan waterdamp gaan condenseren.

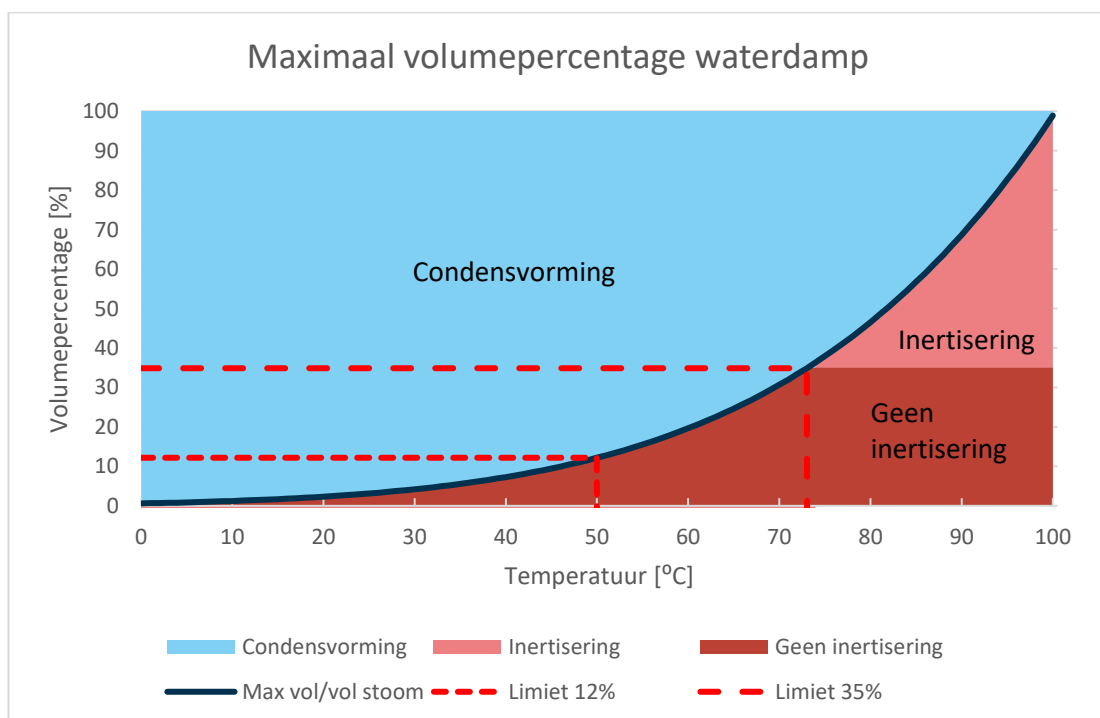
De luchtvochtigheid wordt vaak weergegeven in termen van absolute of relatieve vochtigheid. Absolute vochtigheid is de hoeveelheid waterdamp in lucht weergegeven in gram per kubieke meter of gram per kilogram. De relatieve vochtigheid is de absolute vochtigheid ten opzichte van de maximale vochtigheid bij een bepaalde temperatuur, weergegeven als een percentage.

Gasmengsels zoals lucht kunnen bij temperaturen onder het kookpunt een beperkte hoeveelheid waterdamp bevatten. Die hoeveelheid is temperatuur- (en druk-) afhankelijk. In brandsituaties is er vaak wel sprake van drukverschillen (veelal 10tallen Pascals), maar deze hebben niet of nauwelijks effect op de hoeveelheid waterdamp in gasmengsels vergeleken met de atmosferische druk (1013000 Pascal of 1,013 bar).

Bij temperaturen boven het kookpunt van water kan een gasmengsel grote hoeveelheden (tot zelfs 100 %) waterdamp bevatten zonder dat condensatie optreedt.

In figuur 8 is aangegeven dat een gasmengsel bij omgevingstemperatuur theoretisch geïnertiseerd kan worden. Voor een gasmengsel van propaan ligt het theoretisch inertiseringspunt (IP) van waterdamp tussen de 28 en 42 %. Boven het kookpunt van water kan in de praktijk een dergelijk volumepercentage waterdamp in een gasmengsel van propaan bereikt worden. Bij temperaturen onder het kookpunt echter, is dit in de praktijk niet altijd mogelijk. In figuur 8 is het maximale volumepercentage waterdamp (verticale as) in lucht temperatuurafhankelijk (horizontale as) weergegeven bij een relatieve luchtvochtigheid van 100 %.

Figuur 8: Maximaal volumepercentage waterdamp



Uit de grafiek blijkt dat een gasmengsel bij temperaturen boven de 73 graden Celsius meer dan 35 volumepercent waterdamp kan bevatten. Dit betekent dat boven deze temperatuur

(theoretisch) inertisering door middel van waterdamp mogelijk is voor een gasmengsel van propaan. Bij een lagere temperatuur is dit niet mogelijk.

1.6 Beoordelingscriteria

Uit de voorgaande paragrafen zijn de volgende beoordelingscriteria gedestilleerd die gebruikt kunnen worden bij de analyse van de experimenten die zijn gedaan in het kader van dit onderzoek naar rookgasexplosies.

1.6.1 Brandbaarheidsgrenzen

Het eerste criterium zijn de brandbaarheidsgrenzen. Zoals eerder aangegeven, zijn de brandbaarheidsgrenzen temperatuurafhankelijk. Daarnaast veranderen zij naar mate er meer inerte gassen worden toegevoegd.

Voor de brandbaarheidsgrenzen in de koude experimenten kan worden uitgegaan van figuur 5 en voor de warme experimenten van figuur 7.

De brandbaarheidsgrenzen kunnen worden beoordeeld in combinatie met het inertiseringspunt (het derde criterium, zie verder). Bij een concentratie inert gas liggen de UFL en LFL namelijk op hetzelfde punt.

1.6.2 Minimale zuurstofconcentratie (LOC)

Het tweede criterium is de LOC-waarde. Deze waarde geeft de minimale zuurstofconcentratie weer waarbij nog een ontbranding kan plaatsvinden. Onder deze waarde kan het mengsel niet tot ontbranding komen. De LOC-waarde voor propaan bedraagt 11,6 % (omgevingstemperatuur) bij stikstof als inert gas, zie tabel 7. De LOC-waarde voor propaan bij waterdamp als inert gas bedraagt 11,5 % (bij 200 °C).

1.6.3 Inertiseringspunt (IP)

Het derde criterium is het inertiseringspunt (IP) waarbij totale inertie van het brandstofmengsel wordt bereikt, ongeacht het brandstof- of zuurstofpercentage. Deze minimale inerte concentratie kan worden aangeduid als een volumepercentage inert gas. Door het toevoegen van voldoende inert gas aan een brandbaar mengsel kan de kritische AFT niet bereikt worden. Dit betekent dat de warmteproductie van de vlam lager is dan de warmteverliezen voor het opwarmen van inerte gassen. Hierdoor kan de vlam zichzelf niet onderhouden en vindt er geen ontbranding plaats. Het exacte inertiseringspunt van verschillende inerte gassen is voor propaan niet bekend. Op basis van de publicatie van Giurcan (Giurcan, 2013) kunnen de volgende volumepercentages worden aangehouden, zie ook figuur 5 tot 7.

Tabel 8: Volumepercentage

Inert gas	Volumepercentage [%]
Waterdamp (373 K)	38.1 ¹⁾
Waterdamp (473 K)	42.3 ²⁾
Stikstof (298 K)	41.6 ²⁾

¹ (Zabetakis, 1965)

² (CHEMSAFE, 2009)

2 Onderzoeksmethode

2.1 Algemene beschrijving

De gekozen onderzoeksmethode is een experiment. Hierbij wordt onderscheidt gemaakt tussen twee experimenten:

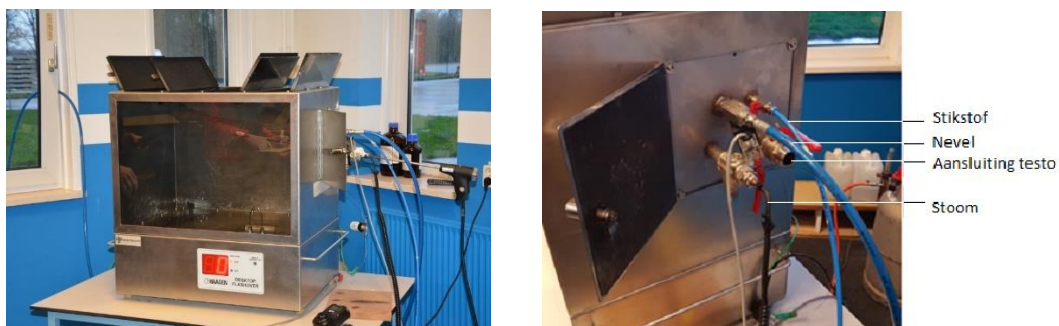
- > experimenten met koude gasen in een 'desktop flashover kast'
- > experimenten met warme gasen in een zelfgemaakt plofvat.

2.1.1 Experiment met koude gasen

'Plofkast' is een andere benaming voor desktop flashover kast. De plofkast wordt in de lesstof voor brandweelieden gebruikt om fenomenen als een rookgasontbranding te simuleren. De plofkast is makkelijk te bedienen en geschikt om meerdere malen eenzelfde situatie te creëren. De resultaten zijn reproduceerbaar.

Bij de experimenten is gebruik gemaakt van deze plofkast, zie afbeelding 1. De werking hiervan is als volgt: eerst wordt een brandbaar gasmengsel in de kast gebracht. Vervolgens wordt er gedurende een bepaald aantal seconden waternevel, stoom of stikstof toegevoegd. Tijdens het hele experiment draait de ventilator en zorgt voor een goede menging van de gasen in de kast. In de kast zit een ontstekingsmechanisme dat op afstand te bedienen is. Na het toevoegen van een vooraf bepaalde hoeveelheid waternevel, stoom of stikstof wordt het mengsel ontstoken. Wanneer de concentratie van het mengsel nog binnen de brandbaarheidsgrenzen valt, zal er een ontbranding plaatsvinden. Wanneer de samenstelling van de brandbare gasen zodanig is veranderd dat de concentraties buiten de brandbaarheidsgrenzen vallen, zal er geen ontbranding plaatsvinden. Aan een zijde van de plofkast is een luik gemonteerd waardoor waternevel, stoom of stikstof in de kast kunnen worden gebracht. De inhoud van de gebruikte plofkast bedraagt 116 liter.

Afbeelding 1: De desktop flashover kast, ook wel de plofkast genoemd



2.1.2 Experimenten met warme gassen

Voor de experimenten met warme gassen is een plofvat ontworpen. Dit plofvat lijkt op de plofkast die gebruikt is bij de experimenten met koude gassen, maar in tegenstelling tot de kast kan in het vat het gasmengsel worden opgewarmd (zie afbeelding 2).



Afbeelding 2: Plofvat met rechtsonder de brander

Net als bij de experimenten met de koude gassen wordt er eerst een brandbaar gasmengsel in de kast gebracht. Vervolgens wordt dit mengsel door middel van een brander onder het vat opgewarmd tot de gewenste temperatuur van ca. 225 graden Celsius. Vervolgens wordt er gedurende een bepaald aantal seconden waternevel of stoom toegevoegd. Tijdens het hele experiment draait de ventilator en zorgt voor een goede menging van de gassen in de kast. In de kast zit een ontstekingsmechanisme dat op afstand te bedienen is. Na het toevoegen van een vooraf bepaalde hoeveelheid waternevel of stoom wordt het mengsel ontstoken. Wanneer de concentratie van het mengsel nog binnen de brandbaarheidsgrenzen valt, zal er een ontbranding plaatsvinden. Wanneer de samenstelling van de brandbare gassen zodanig is veranderd dat de concentraties buiten de brandbaarheidsgrenzen vallen, zal er geen ontbranding plaatsvinden. De inhoud van het gebruikte plofvat bedraagt 343 liter.

2.2 Verantwoording van de gekozen onderzoeksmethode

Tijdens de experimenten is gevarieerd in de omstandigheden door het toevoegen van waternevel, stoom en stikstof (in de plofkast met de koude gassen) en van waternevel en stoom (in het plofvat met de warme gassen).

Er is voor waternevel gekozen omdat de brandweer onder andere dit middel gebruikt bij haar blustechnieken. Water kan als nevel in de laag met rookgassen worden gespoten om zo het koelende effect van water maximaal te benutten. De waternevel heeft een druppelgrootte van 3-8 micrometer. Hoe kleiner de druppelgrootte, hoe groter het raakoppervlak is met de rookgassen en dus het koelend vermogen.

Voor stoom is gekozen vanwege het feit dat het toevoegen van fijnverdeelde waterdruppels in rookgassen zorgt voor stoomvorming. Aan de ene kant leren brandweerlieden om stoomvorming te beperken omdat het tot ongewenste effecten kan leiden, zoals brandwonden, ongemak en slecht zicht. De hoeveelheden waternevel en stoom zijn bepaald met behulp van een gevoelige weegschaal.

Ten slotte is voor de experimenten met koude gassen gekozen voor stikstof, een inert gas. Deze stof koelt de rookgassen niet, maar verdunt (inertiseert) ze (Brandweeracademie, 2017). Het inertiseren met stikstof komt vooral voor in de vorm van 'noodinertiseringssystemen'. Dit zijn beveiligingssysteem die bij bedrijven worden ingezet ter voorkoming van brand en explosies.

Voor beide experimenten is gebruik gemaakt van propaan als brandbaar gas. Het propaangas is opgeslagen in een tank en is met een druk van 29 millibar in de plofkast gebracht. Op de tank zit een 'flowmeter' waarmee de hoeveelheid die wordt toegevoegd per minuut te reguleren is.



Afbeelding 3: De tank propaangas met flowmeter

De waternevel is geproduceerd met behulp van de apparatuur die is weergegeven in afbeelding 4. De gebruikte druppelgrootte van de nevel is 3 tot 8 micrometer.



Afbeelding 4: Regelkast waternevel

De stoom werd geproduceerd met behulp van de Kärcher SC 3.



Afbeelding 5: De Kärcher SC 3

De hoeveelheden waternevel en stoom zijn bepaald met behulp van een gevoelige weegschaal.

De stikstof (N_2) is opgeslagen in de cilinder, die staat afgebeeld op afbeelding 6. De hoeveelheid waarin de stikstof wordt toegevoegd, kan gereguleerd worden.

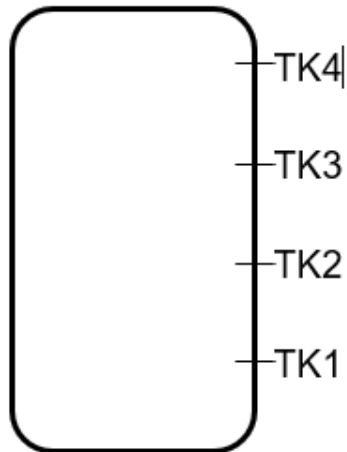


Afbeelding 6: Cilinder met stikstof

2.3 Parameters

2.3.1 Temperatuur

Voor de temperatuurmetingen zijn thermokoppels gebruikt. Bij de experimenten met koude gassen zijn dit er twee: een bovenin de kast en een onderin de kast. Voor de warme experimenten zijn vier thermokoppels gebruikt, verdeeld over het vat. Thermokoppel 3 is als referentiethermokoppel gebruikt.



Afbeelding 7: Schematische voorstelling van de plaatsing van de thermokoppels

2.3.2 Zuurstof

De zuurstofmetingen zijn uitgevoerd met zogenaamde Testo's. De Testo is een emissieanalyser. De analysebox heeft zes gassensoren voor CO, NO, NO₂, SO₂, H₂S, C_xH_y en CO₂. Voor dit experiment is met name het zuurstofgehalte (O₂) van belang. In beide opstellingen met plofkast en plofvat is een opening gemaakt waardoor een lans in de kast of het vat kon worden gebracht. Deze lans zoog het gas/luchtmengsel aan dat vervolgens langs een sensor werd geleid. In afbeelding 8 is de Testo met lans weergegeven.



Afbeelding 8: Testo met lans

2.4 Testprotocol

Allereerst zijn er nulmetingen uitgevoerd om de hoeveelheid propaangas te bepalen die nodig is om een ideaal (stoichiometrisch) gasmengsel te produceren in de plofkast en het plofvat. De brandbaarheids grenzen van propaan liggen tussen de 2 en 10 volumepercentage. De nulmeting is in vijfvoud uitgevoerd. Het ideale gasmengsel is gedurende alle experimenten gebruikt. Daarna is de lek dichtheid van beide testopstellingen bepaald. Hiertoe is het gasmengsel in de testopstelling gebracht; vervolgens is vijf minuten

gewacht waarbij met behulp van de Testo's voortdurend de samenstelling van het mengsel werd gemeten.

Om de hoeveelheid waternevel of stoom te bepalen die per tijdseenheid wordt toegevoegd, is deze opgevangen en gemeten. Daartoe is een plastic beker gevuld met een laagje water; hiervan is het gewicht bepaald. Vervolgens is gedurende 10 seconden het slangetje waarmee de waternevel of stoom in het vat werd gebracht, in het flesje gehangen; daarna is opnieuw het gewicht bepaald. De toename in gewicht geeft dan de hoeveelheid waternevel of stoom weer die per tijdseenheid van 10 seconden in de testopstelling is gebracht. Deze meting is vijfmaal uitgevoerd, waarna de meetwaarden zijn gemiddeld. Deze gemiddelde waarde is gebruikt om de hoeveelheid toegevoegde waternevel per tijdseenheid te bepalen. Voor de experimenten met stikstof (alleen bij de experimenten met koude gassen) is de flowmeter afgesteld op 20 liter per minuut. De temperatuur van de waternevel was kamertemperatuur en die van stoom ca 120 graden Celcius.

Voor de experimenten met de koude gassen is eerst de benodigde hoeveelheid propaan in de testopstelling gebracht, waarna verschillende hoeveelheden waternevel, stoom of stikstof zijn toegevoegd. Deze volgorde is later ook aangehouden bij de experimenten met de warme gassen. Alleen hier is in verband met het opwarmen van het gas 10 seconden gewacht voordat de verschillende hoeveelheden waternevel of stoom zijn toegevoegd. Na iedere toevoeging is getracht het aldus gevormde mengsel te ontsteken. Alle experimenten zijn in duplo uitgevoerd.

Bij de experimenten met warme gassen is het gasmengsel eerst verwarmd tot circa 225 graden Celsius alvorens de verschillende hoeveelheden waternevel of stoom zijn toegevoegd.

Voor de experimenten is het volgende schema gebruikt:

- > 10 seconden waternevel/stoom of stikstof toegevoegd
- > 20 seconden waternevel/stoom of stikstof toegevoegd
- > 30 seconden waternevel/stoom of stikstof toegevoegd
- > 60 seconden waternevel/stoom of stikstof toegevoegd
- > 120 seconden waternevel/stoom of stikstof toegevoegd
- > 180 seconden waternevel/stoom of stikstof toegevoegd
- > 240 seconden waternevel/stoom of stikstof toegevoegd
- > 300 seconden waternevel/stoom of stikstof toegevoegd

Gedurende de experimenten zijn de temperatuur en zuurstofgehalten gemeten.

Experimenten met koude gassen:

Op basis van de nulmeting is bepaald dat er voor ieder experiment 15 seconden gas moest worden toegevoegd. De hoeveelheid propaangas die bij elk experiment is toegevoegd, is 32 liter per minuut gedurende 15 seconden; dit is 8 liter propaangas. Deze 8 liter propaangas is 4,81 volumepercentage ten opzichte van de plofkast, die 166,44 liter is ($8/166,44 = 4,81$), en ligt daarmee ligt binnen de brandbaarheidsgrenzen (2 vol% - 9,5 vol%).

Experimenten met warme gassen:

Op basis van de nulmeting is bepaald dat er voor ieder experiment 50 seconden gas werd toegevoegd. De hoeveelheid propaangas die is toegevoegd, is 31 liter/minuut gedurende 50 seconden; dit is 25,8 liter propaangas. De 25,8 liter propaangas in volumepercentage ten opzichte van het plovat van 343 liter is 7,52 ($25,8/343 \times 100 = 7,52$ vol%). Deze hoeveelheid propaangas ligt binnen de brandbaarheidsgrenzen (2% - 9%).

2.5 Kwaliteit van het onderzoek

2.5.1 Betrouwbaarheid

De nulmetingen om de juiste hoeveel gas te bepalen zijn in vijfvoud uitgevoerd. De feitelijke experimenten werden in duplo uitgevoerd. De temperatuur van het gasmengsel bij de warme gassen varieerde tussen 200 en 250 graden Celsius.

2.5.2 Generaliseerbaarheid

In de experimenten is gebruik gemaakt van propaan als een model voor rookgassen. In de praktijk komen er zeer veel verschillende brandbare rookgassen voor. Hierdoor zijn de resultaten uit de testen niet een op een te vertalen naar de praktijksituatie. In de discussie wordt hier nader op in gegaan.

3 Resultaten

In de onderstaande paragrafen zijn de resultaten van de experimenten weergegeven. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de 'koude' en warme experimenten. Gezien het grote aantal uitgevoerde experimenten is ten behoeve van de leesbaarheid van deze rapportage de keuze gemaakt om niet alle resultaten hier uitgebreid weer te geven, maar enkel in overzichtstabellen. In bijlage 2 en 3 zijn de uitgebreide resultaten van alle experimenten opgenomen.

3.1 Experimenten koude situatie

3.1.1 Nulmeting

Propaangas

De hoeveelheid propaan is een functie van de tijd. Vooraf is bepaald hoe lang de gastoevoer moet duren voordat er een brandbaar mengsel in de plofkast aanwezig is. In deze experimenten is 8 liter propaangas gebruikt, dat overeenkomt met 4,81 volumepercentage en dat ligt binnen de brandbaarheidsgrenzen (2 vol% - 9,5 vol%).

Inerte gassen

Om de toevoerhoeveelheid van inerte gassen te kunnen bepalen is een aantal nulmetingen uitgevoerd. Voor zowel waternevel als stoom zijn vijf metingen uitgevoerd waarbij door middel van weging de massa-afname gedurende een tijdseenheid van 10 seconden is bepaald. Het gemiddelde van deze vijf metingen is aangehouden als gemiddelde massa-afname per seconde. In onderstaand tabel zijn de meetwaarden en het gemiddelde opgenomen. In het vervolg van deze rapportage wordt uitgegaan van deze gemiddelden.

Tabel 9: Meetresultaten hoeveelheid waternevel/stoom per tijdseenheid van 10 seconden

	Test 1 [gr]	Test 2 [gr]	Test 3 [gr]	Test 4 [gr]	Test 5 [gr]	Gemiddelde [gr/s]
Waternevel	15	13	14	14	14	1,4
Stoom	9	7	9	9	9	0,86

De toevoer van stikstof vindt plaats via een cilinder die kan worden ingesteld op een specifiek debiet, in dit geval op 20 l/minuut.

3.1.2 Uitgevoerde experimenten

In tabel Tabel 10: Toegevoegde inerte stoffen/gassen per tijdseenheid' is een overzicht van de uitgevoerde experimenten en de toegevoerde inerte gassen weergegeven.

Tabel 10: Toegevoegde inerte stoffen/gassen per tijdseenheid

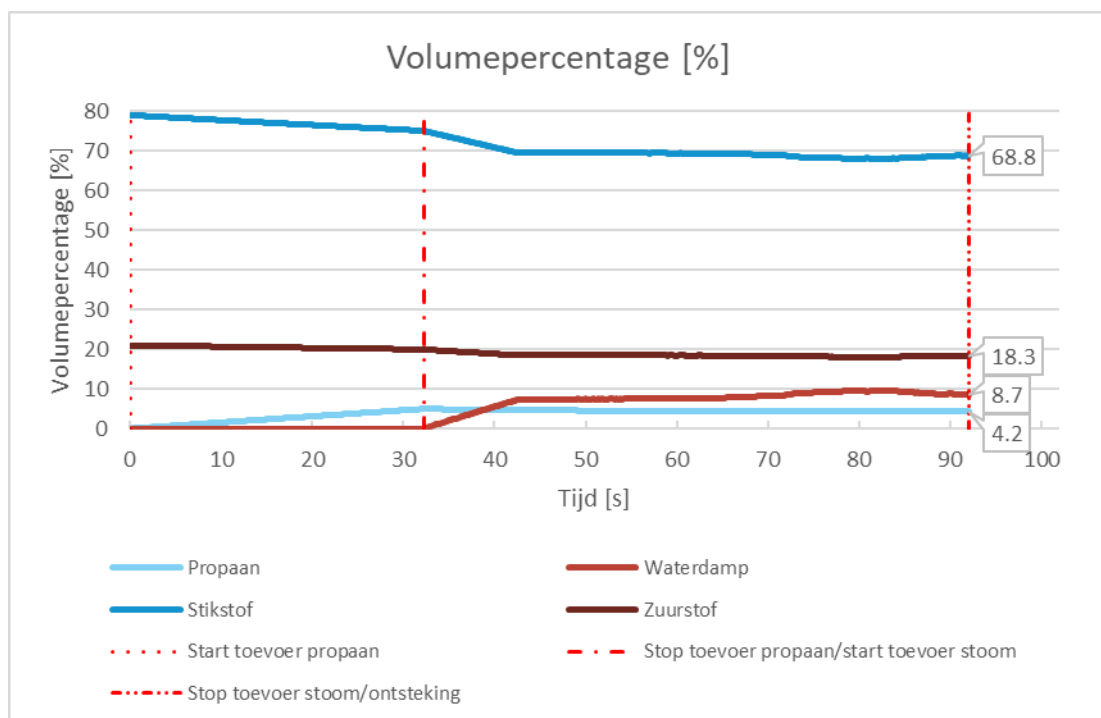
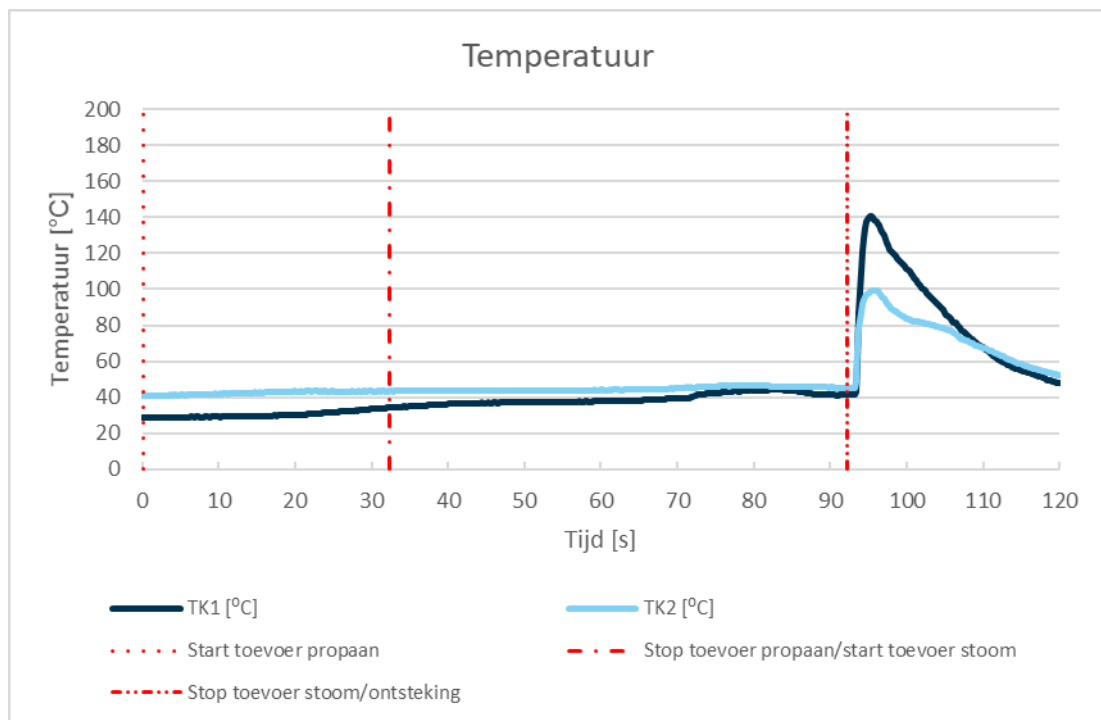
Tijd [s]	Stoom [gr]	Water mist [gr]	Stikstof [l]
10	8,6	14	3,3
20	17,2	28	6,6
30	25,8	42	10
60	51,6	84	20
120	103,2	168	40
180	X	252	60
210	X	X	70
240	X	X	80
300	258	420	X

In de onderstaande paragrafen zijn de resultaten van de experimenten met stoom, nevel en stikstof samengevat. De uitgebreide resultaten van alle experimenten zijn opgenomen in bijlage 3.

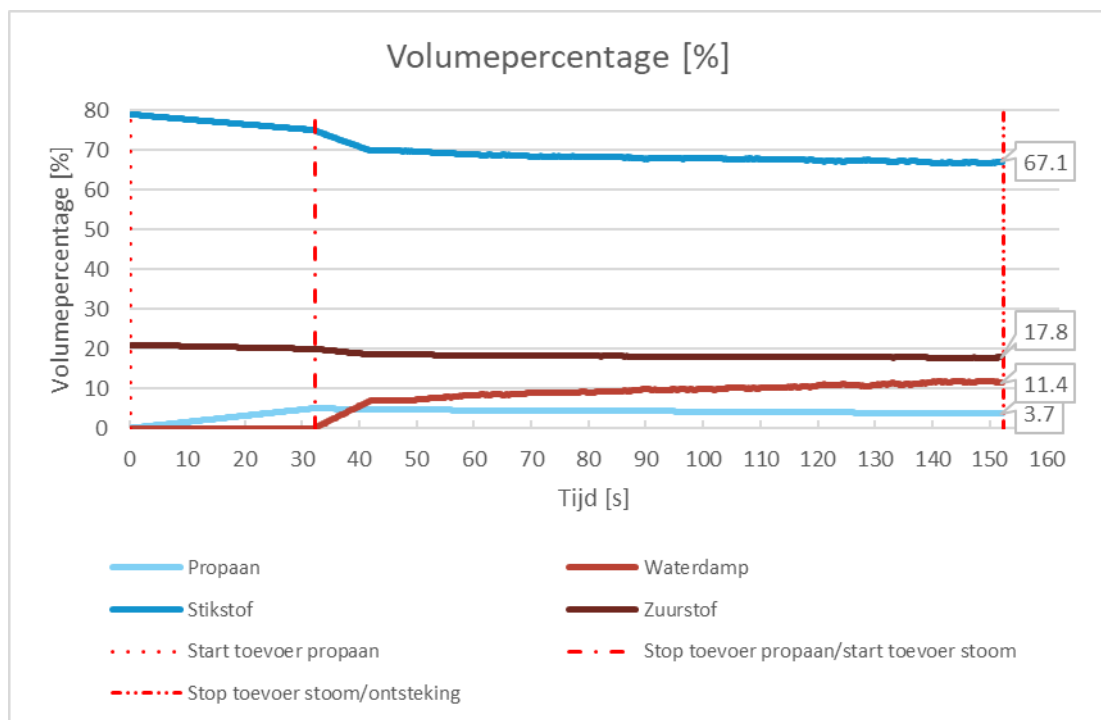
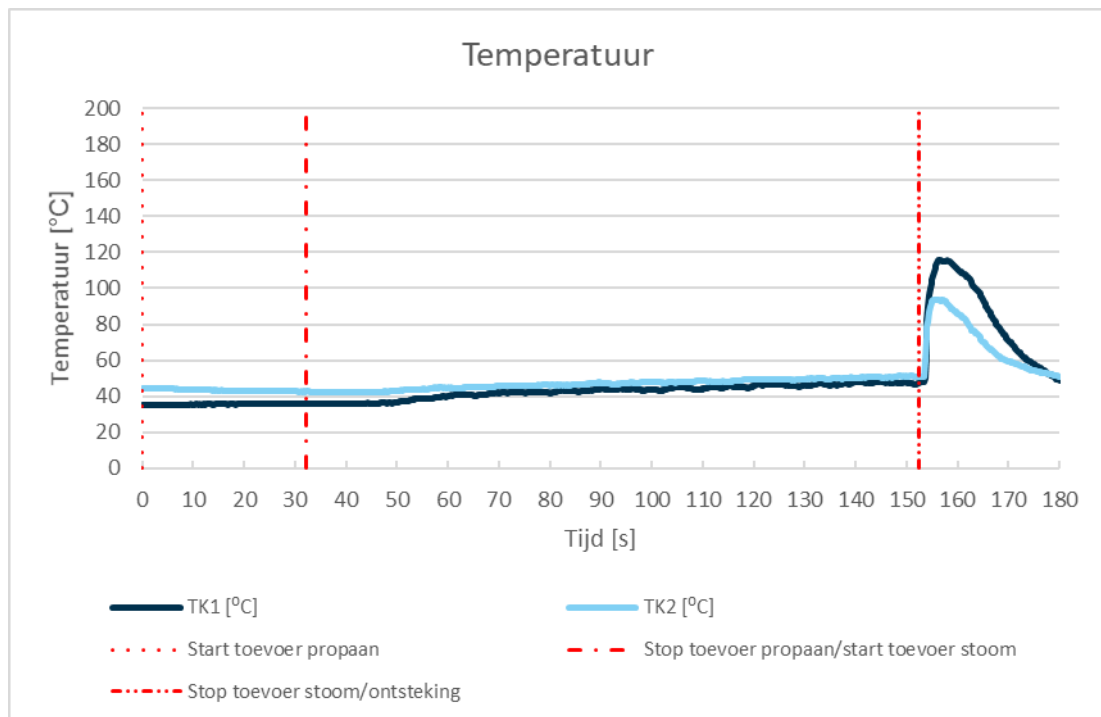
Bij zowel de toevoeging van stoom als stikstof zijn de volumepercentages van de gassen aanwezig in de plofkast bepaald op basis van een volumebalans. De volumebalans inclusief randvoorwaarden en uitgangspunten zijn nader toegelicht in bijlage 5.

3.1.3 Samenvatting resultaten stoom

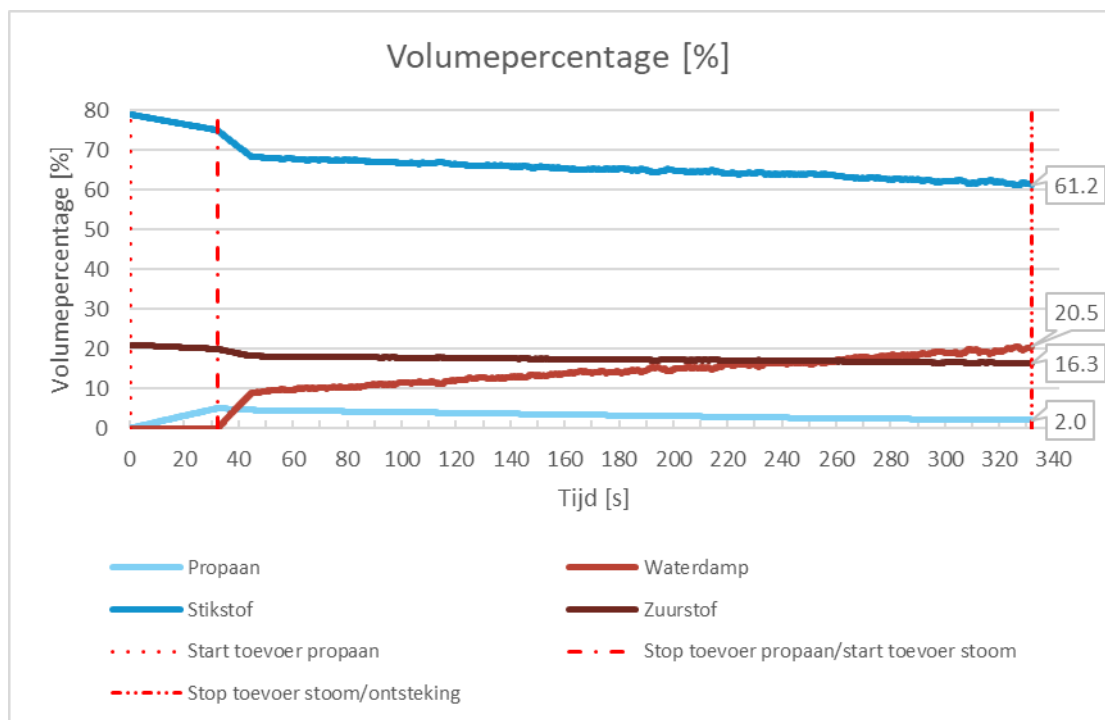
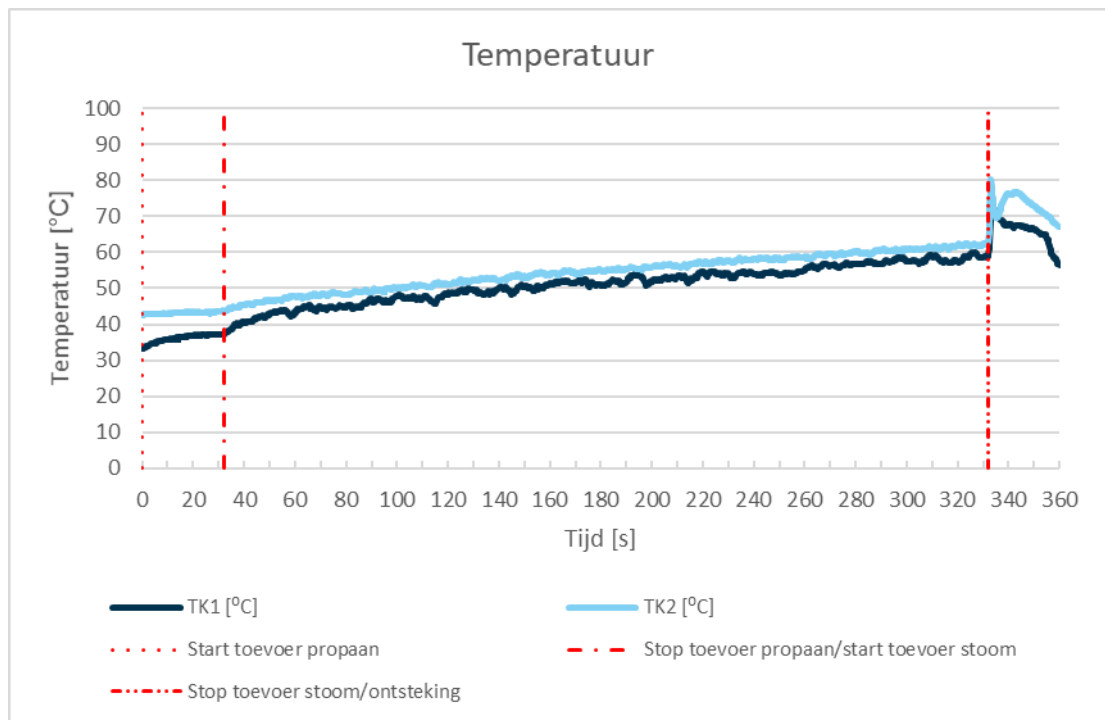
Figuur 9: Toevoer 60 seconden



Figuur 10: Toevoer 120 seconden



Figuur 11: Toevoer 300 seconden



Overzicht

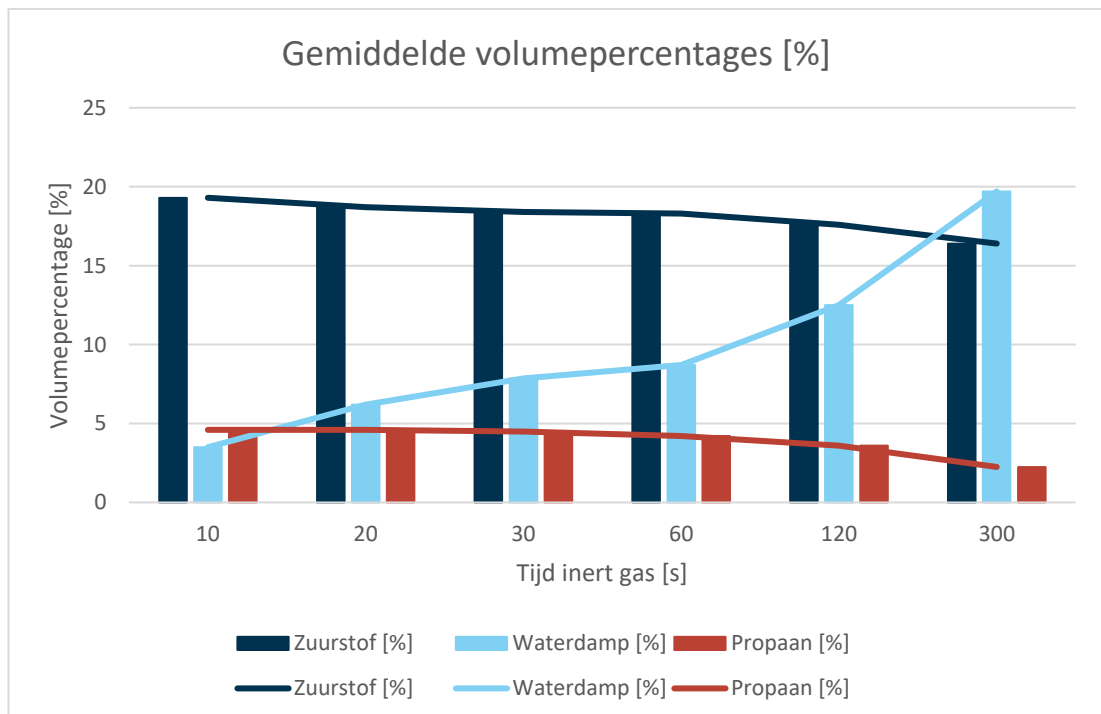
Tabel 11: Samenvatting meetresultaten stoom koude gassen

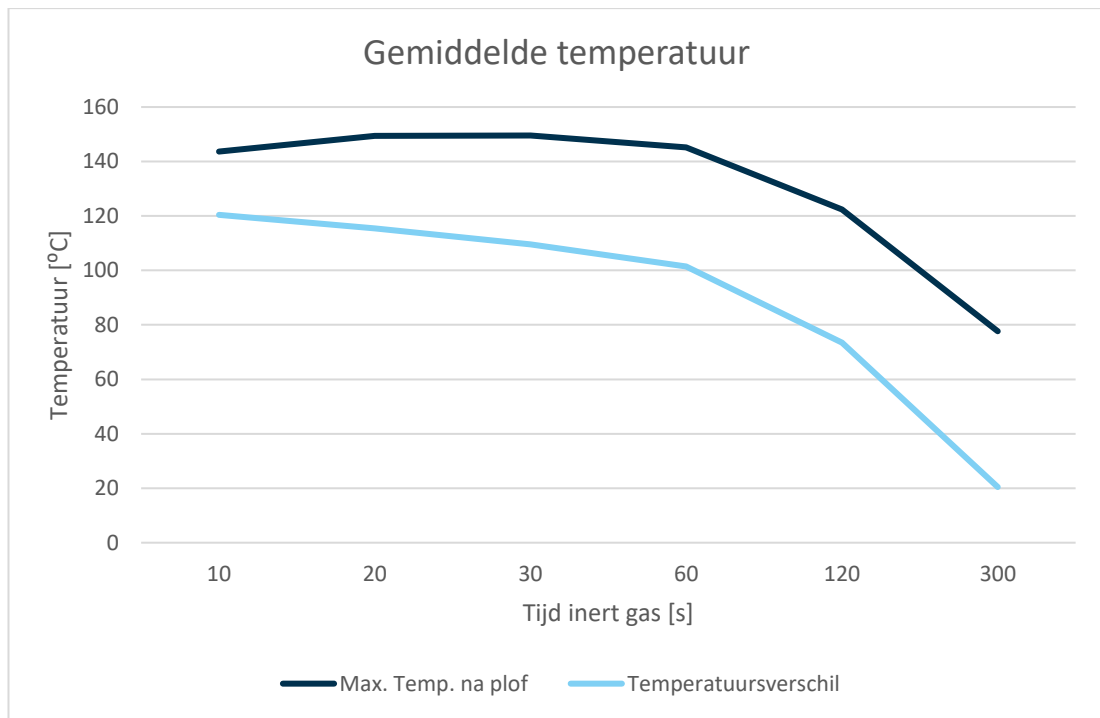
Toevoertijd [s]	Volumepercentage [%]			Ontbranding [-]	Temperatuur [°C] ²⁾	
	Zuurstof	Waterdamp	Propaan		Max. na plof	Verschil
0	20	0	4,8	-	-	-
10	19,3	3,5	4,6	Ja	144	120
20	18,7	6,2	4,6	Ja	149	115
30 ¹⁾	18,4	7,9	4,5	Ja	150	110
60	18,3	8,7	4,2	Ja	145	102
120 ¹⁾	17,6	12,5	3,6	Ja	122	74
300 ¹⁾	16,4	19,7	2,3	Ja	78	20

¹ Van deze experimenten kon de volumebalans maar is één geval worden bepaald vanwege een meetfout.

² De maximale temperatuur en het temperatuurverschil zijn bepaald op basis van thermokoppel 1.

Figuur 12: Gemiddelde volumepercentages (%)





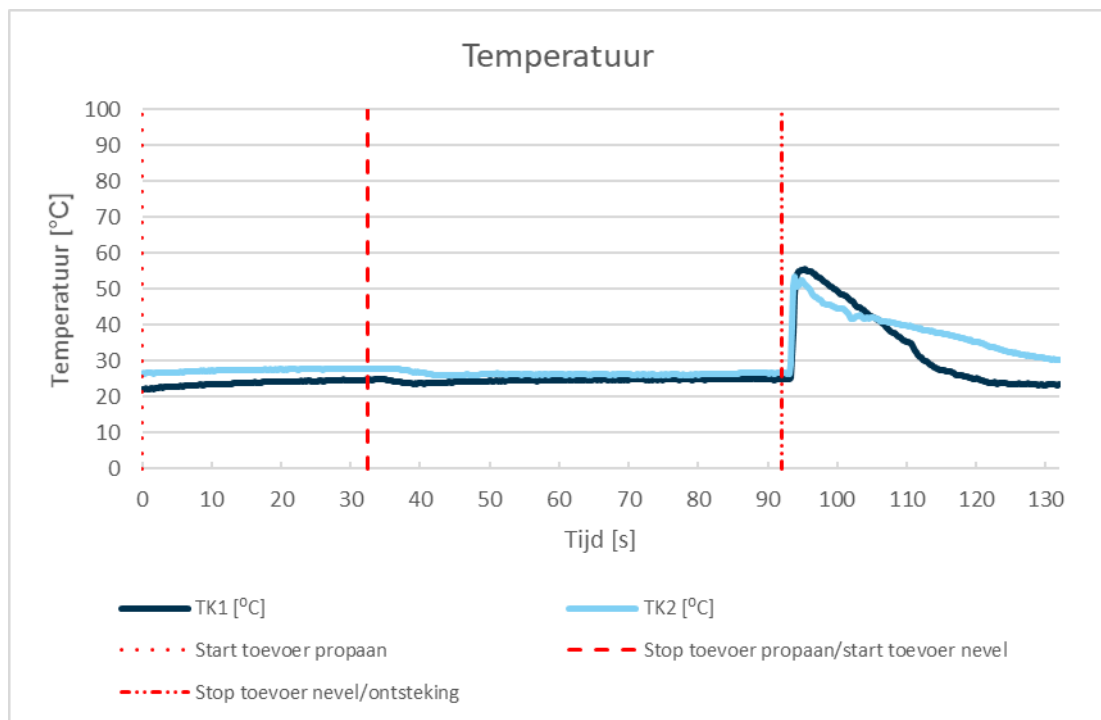
Uit de resultaten blijkt het volgende:

- > Bij alle experimenten vindt een ontbranding plaats.
- > Het volumepercentage propaangas bedraagt 4,8 % voor de toevoeging van stoom en is minimaal ongeveer 2,0 % (300 seconden toevoeging van stoom).
- > Het volumepercentage zuurstof bedraagt voor de toevoeging van stoom 20% en is minimaal ongeveer 16,4 % (300 seconden toevoeging van stoom).
- > Het volumepercentage waterdamp bedraagt maximaal 19,7 % (300 seconden toevoeging van stoom).
- > De maximale temperatuur na ontbranding ligt voor de eerste experimenten (10 tot en met 60 seconden toevoeging van stoom) nagenoeg gelijk, tussen de 140 °C tot 150 °C. Bij een toevoeging van stoom gedurende 120 en 300 seconden is de maximale temperatuur na ontbranding lager (tussen de 122 °C en 78 °C).
- > Het temperatuurverschil tussen de waarden van voor en tijdens de ontbranding neemt af naarmate er meer stoom wordt toegevoegd, van 120 °C naar minimaal 20 °C.

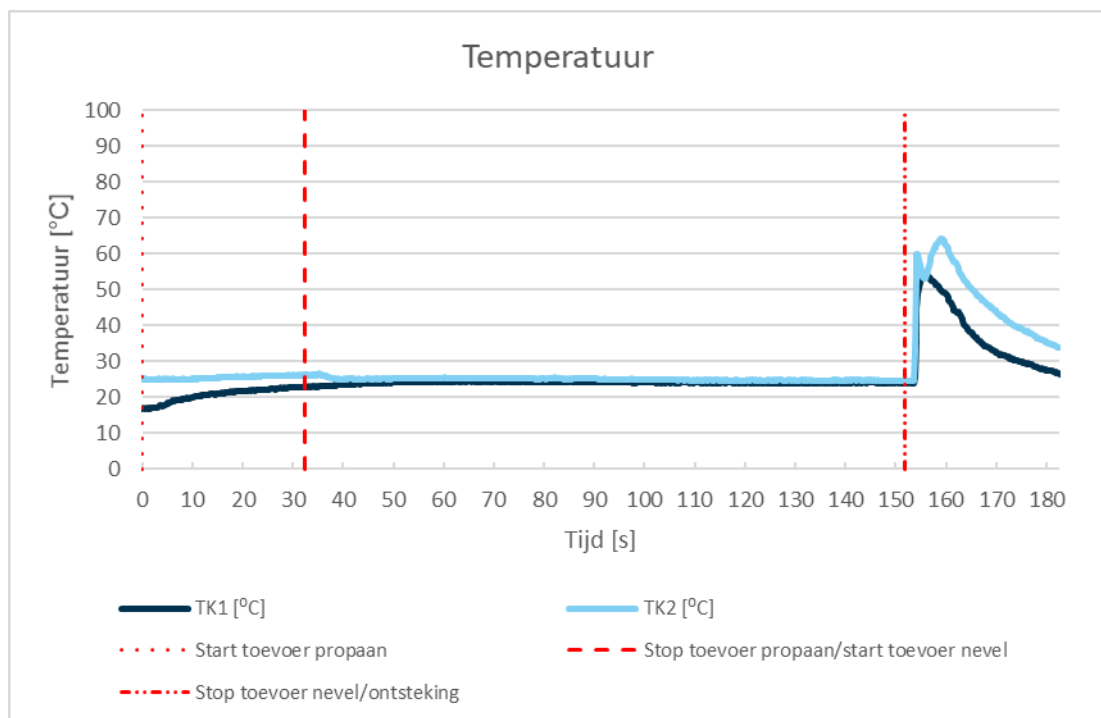
Daarnaast geeft de theorie uit hoofdstuk 1 aan dat hoeveelheid aanwezige waterdamp hoofdzakelijk wordt bepaald door het verzadigingspunt van waterdamp in de lucht, omdat de temperatuur onder het kookpunt van water ligt.

3.1.4 Samenvatting resultaten nivel

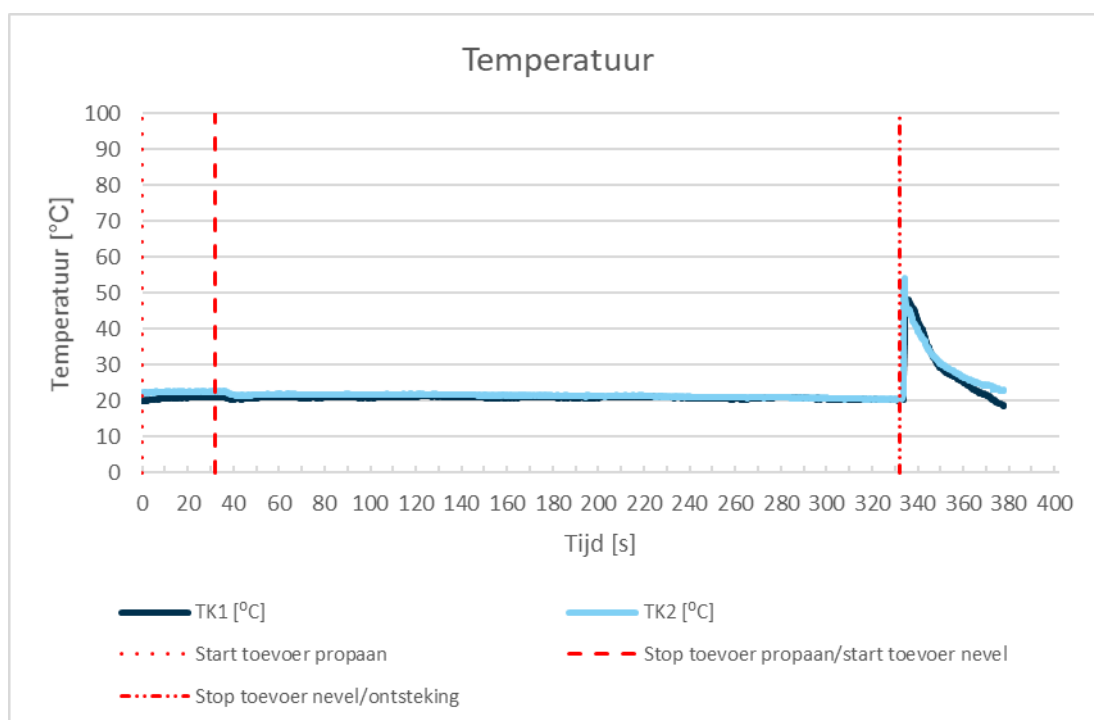
Figuur 13: Toevoer 60 seconden



Figuur 14: Toevoer 120 seconden



Figuur 15: Toevoer 300 seconden



Overzicht

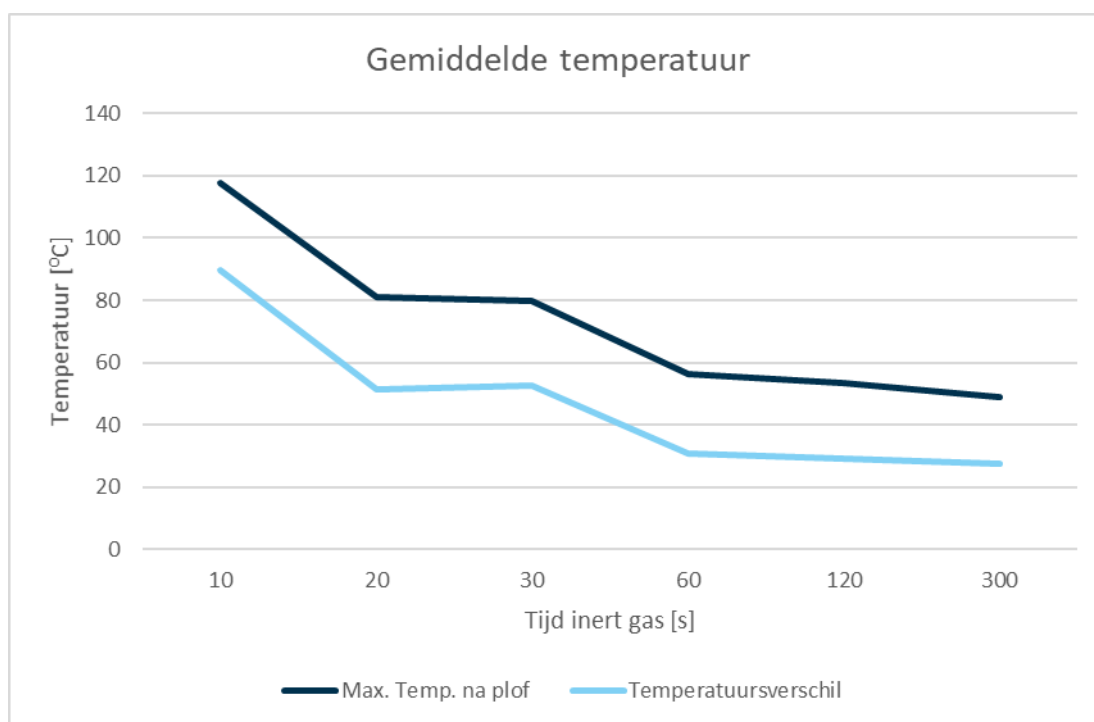
Tabel 12: Samenvatting meetresultaten waternevel koude gassen

Toevoertijd [s]	Volumepercentage [%] ¹⁾			Ontbranding [-]	Temperatuur [°C] ²⁾	
	Zuurstof	Waterdamp	Propaan		Max. na plof	Verskil
10	-	4,0	-	Ja	118	90
20	-	4,4	-	Ja	81	51
30	-	3,7	-	Ja	80	53
60	-	3,4	-	Ja	57	31
120	-	3,1	-	Ja	54	29
300	-	2,5	-	Ja	49	28

¹ De volumebalans kon niet exact worden bepaald, omdat niet duidelijk is hoeveel waternevel daadwerkelijk wordt omgezet naar waterdamp. De opgenomen volumepercentages waterdamp zijn bepaald op basis van het verzadigingspunt.

² De maximale temperatuur en het temperatuurverschil zijn bepaald op basis van thermokoppel 1.

Figuur 16: Gemiddelde temperatuur

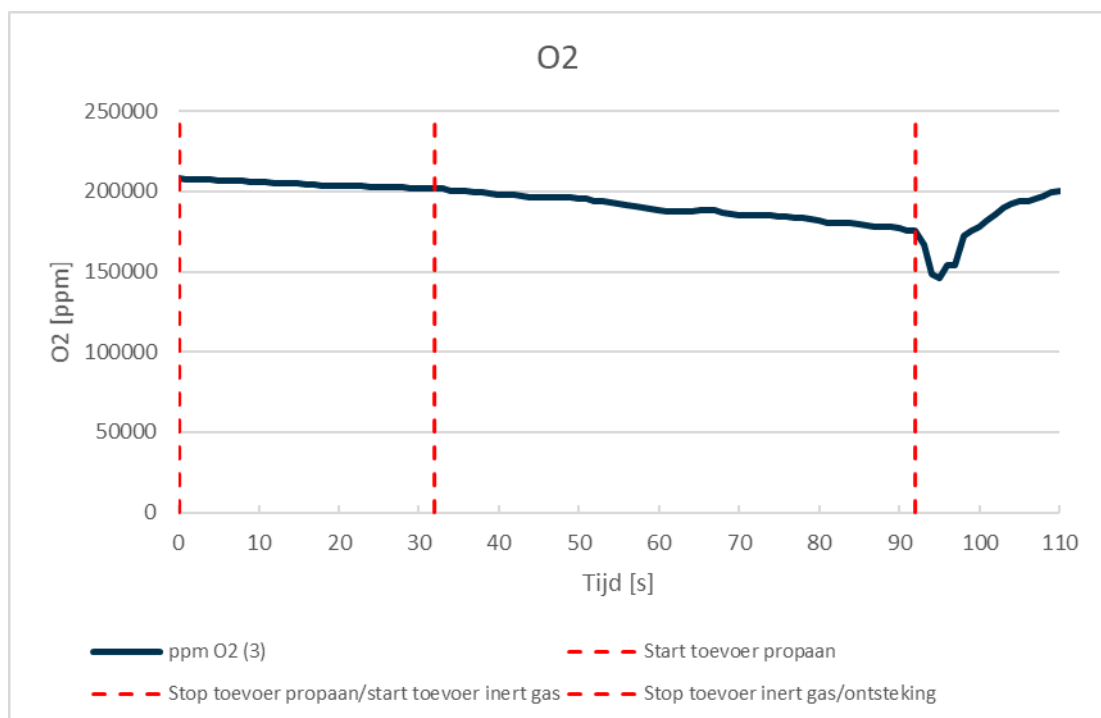
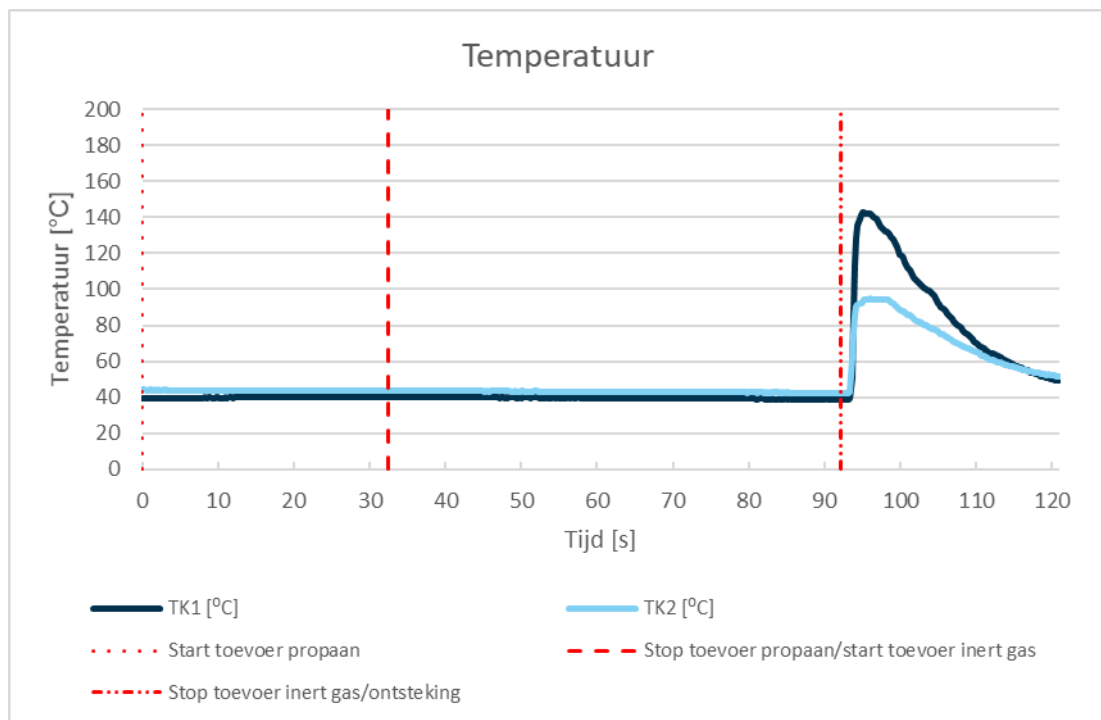


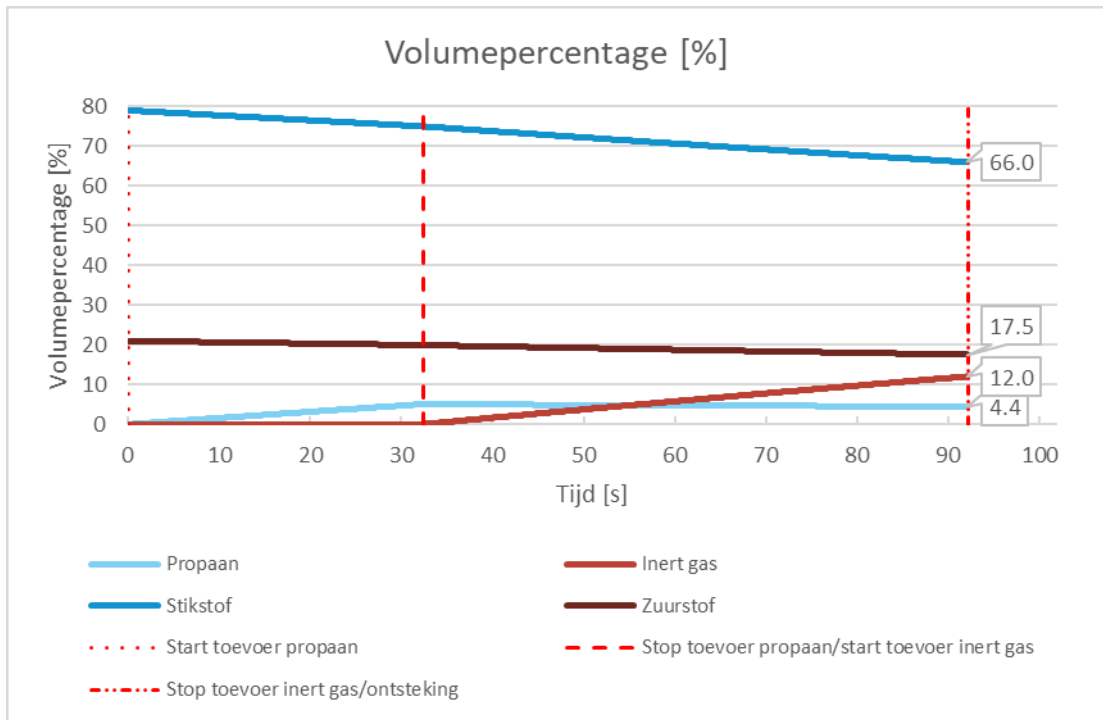
Uit de resultaten blijkt het volgende:

- > Bij alle experimenten vindt een ontbranding plaats.
- > De hoeveelheid aanwezige waterdamp wordt bepaald door het verzadigingspunt van waterdamp in de lucht, omdat de temperatuur onder het kookpunt van water ligt.
- > Het volumepercentage waterdamp bedraagt maximaal 4,4% (20 seconden toevoeging van nevel) en minimaal 2,5 % (300 seconden toevoeging van nevel).
- > De volumepercentages van propaan en zuurstof zijn niet bekend, aangezien niet duidelijk is hoeveel nevel wordt omgezet naar waterdamp. Op basis van het volumepercentage waterdamp (verzadigingspunt) en de ontbranding is de verwachting echter dat de volumepercentages propaan en zuurstof zich tussen respectievelijk 3 tot 5 % en 19 tot 20 % bevinden.
- > De maximale temperatuur na ontbranding neemt af naar mate er meer nevel wordt toegevoegd, van ongeveer 118 °C naar minimaal 49 °C.
- > Het temperatuurverschil tussen de waarden van voor en tijdens de ontbranding neemt af naarmate er meer stoom wordt toegevoegd, van ongeveer 90 °C naar minimaal 28 °C.

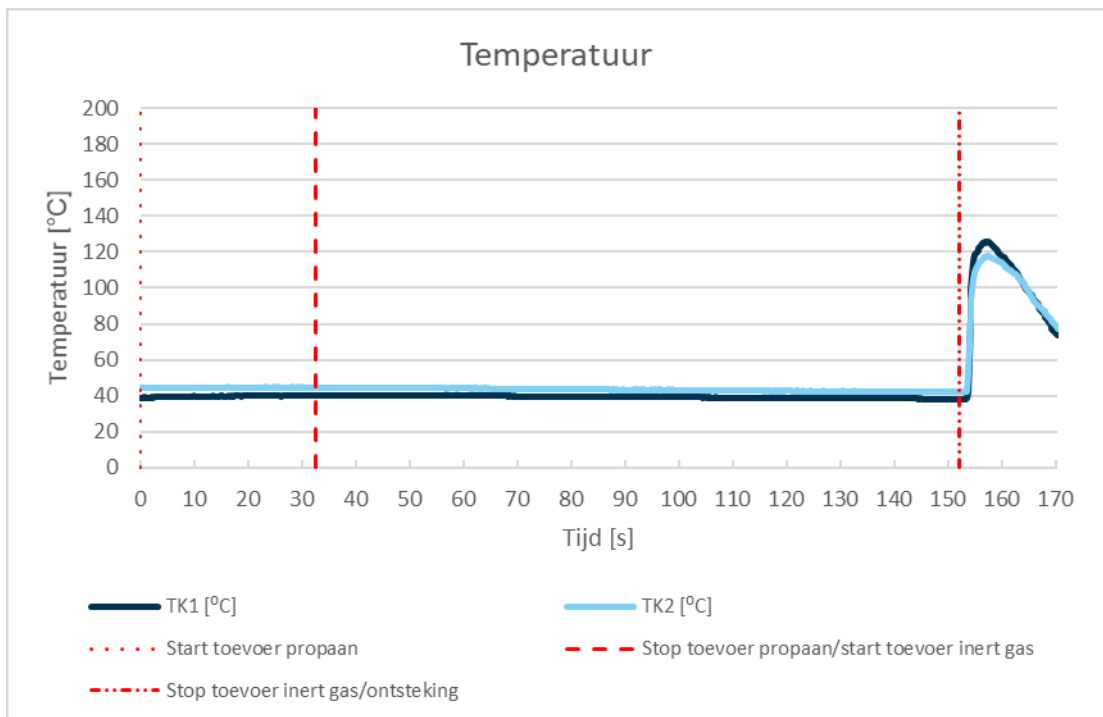
3.1.5 Samenvatting resultaten stikstof

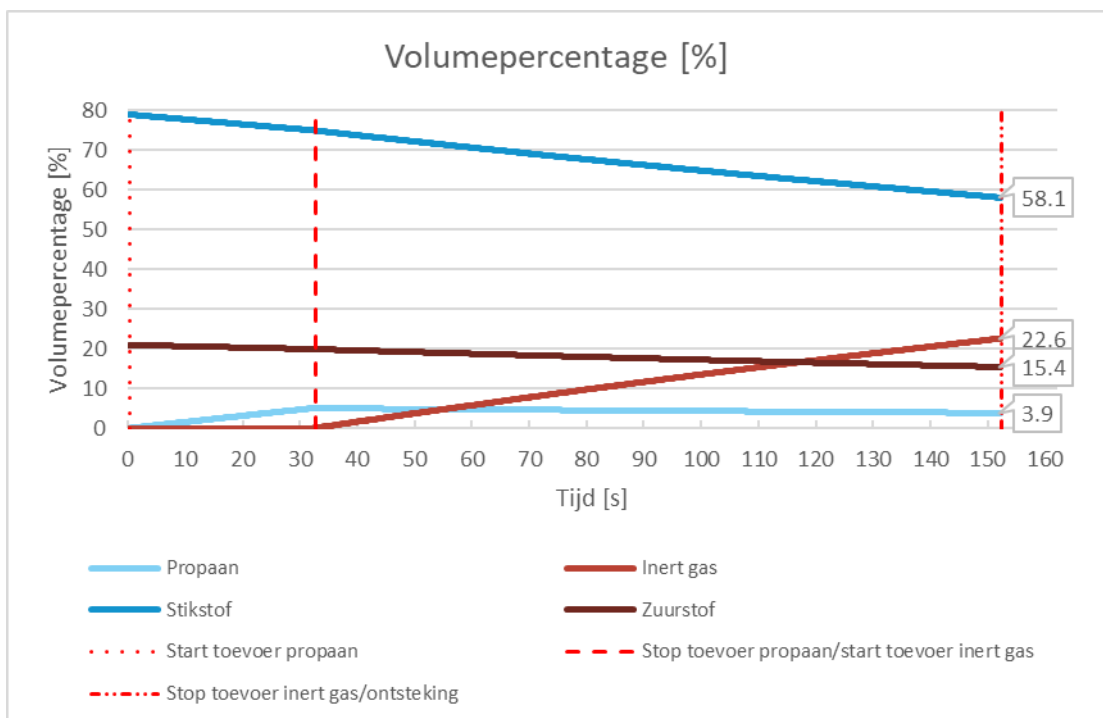
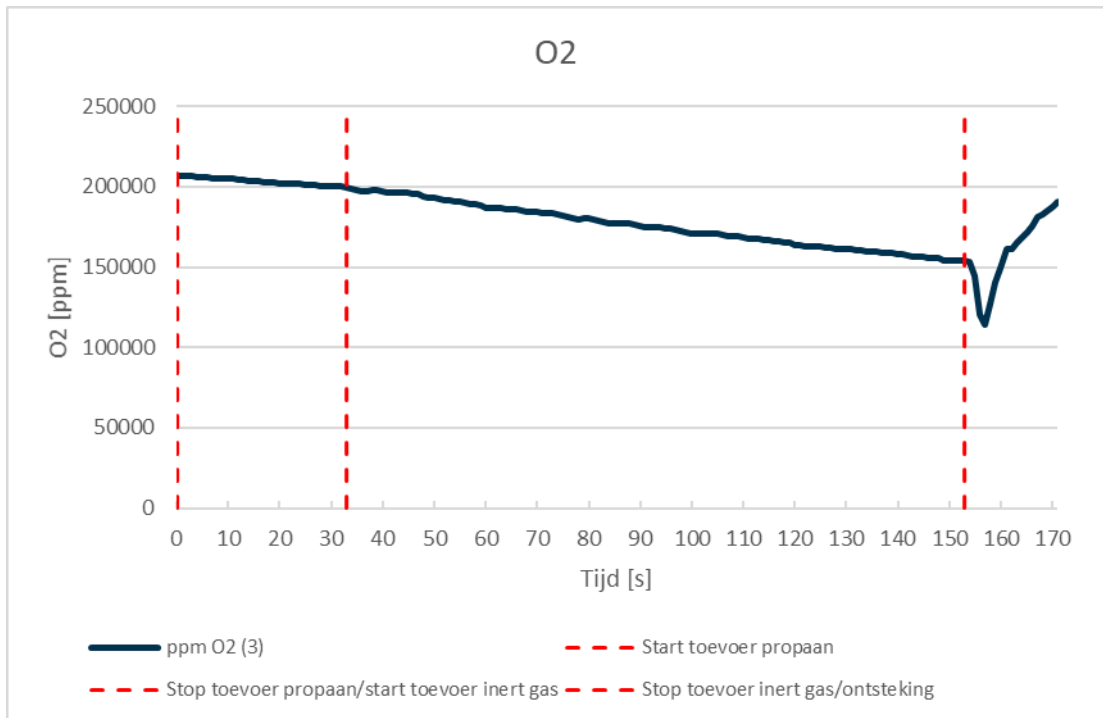
Figuur 17: Toevoer 60 seconden



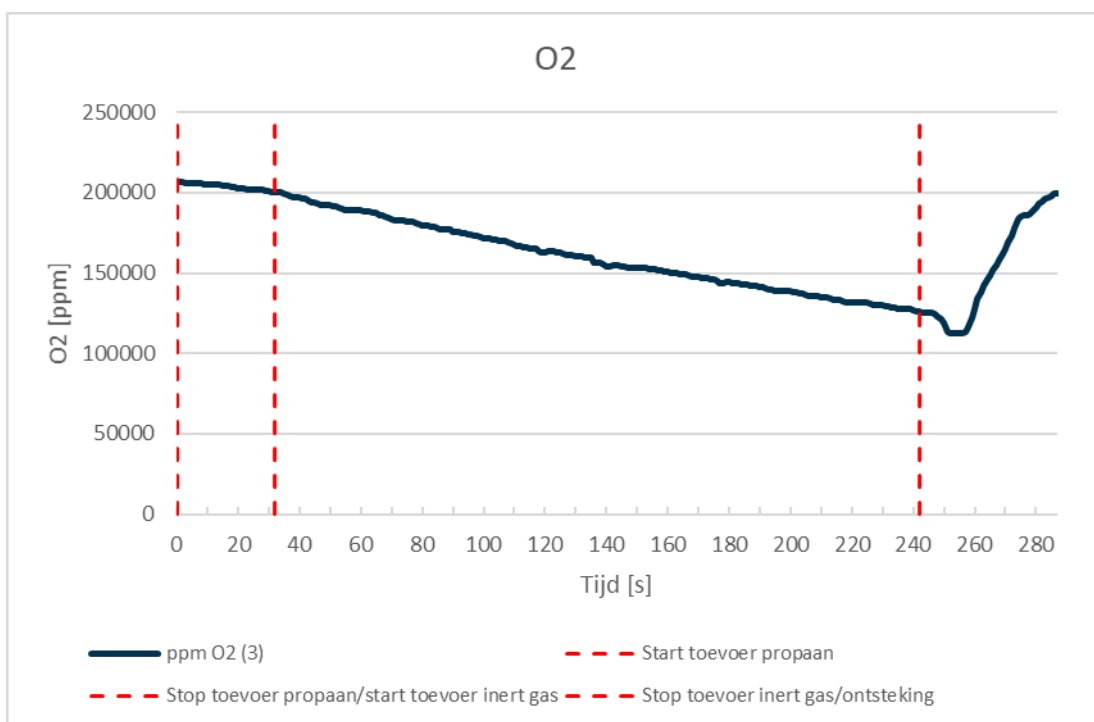
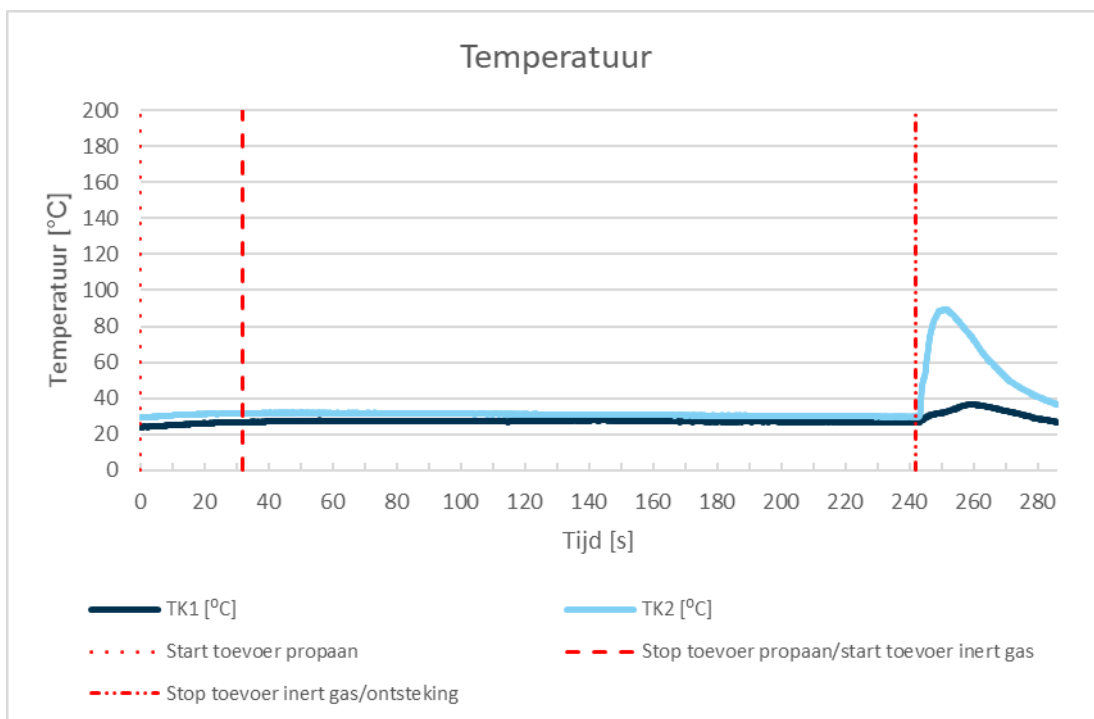


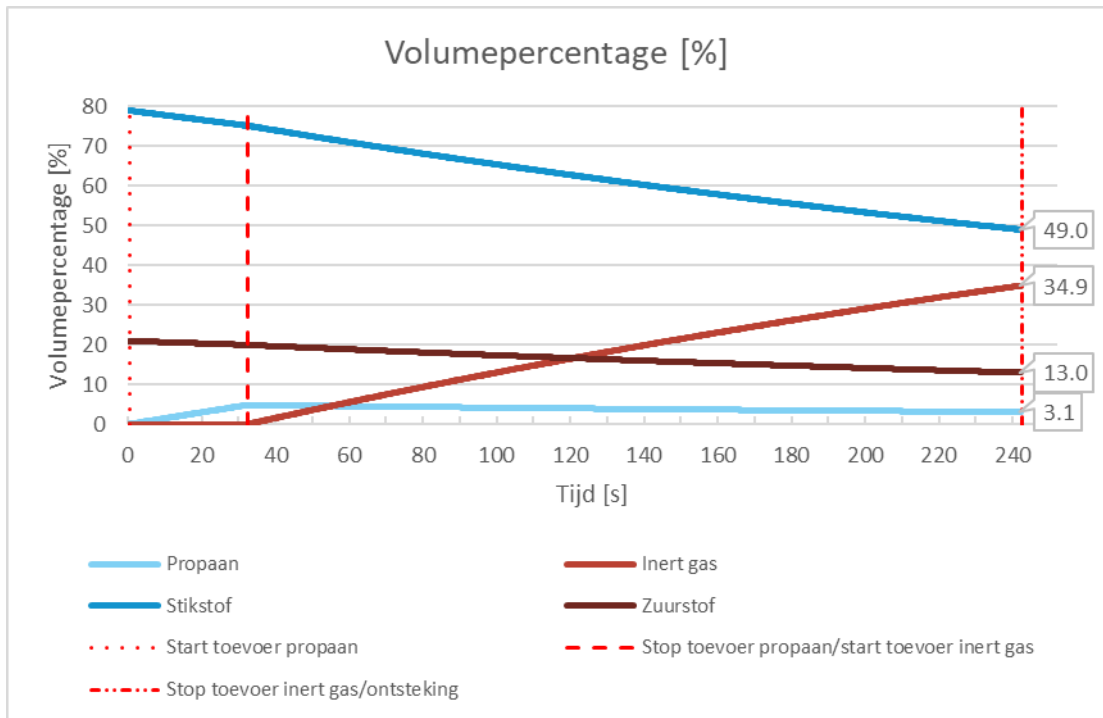
Figuur 18: Toevoer 120 seconden



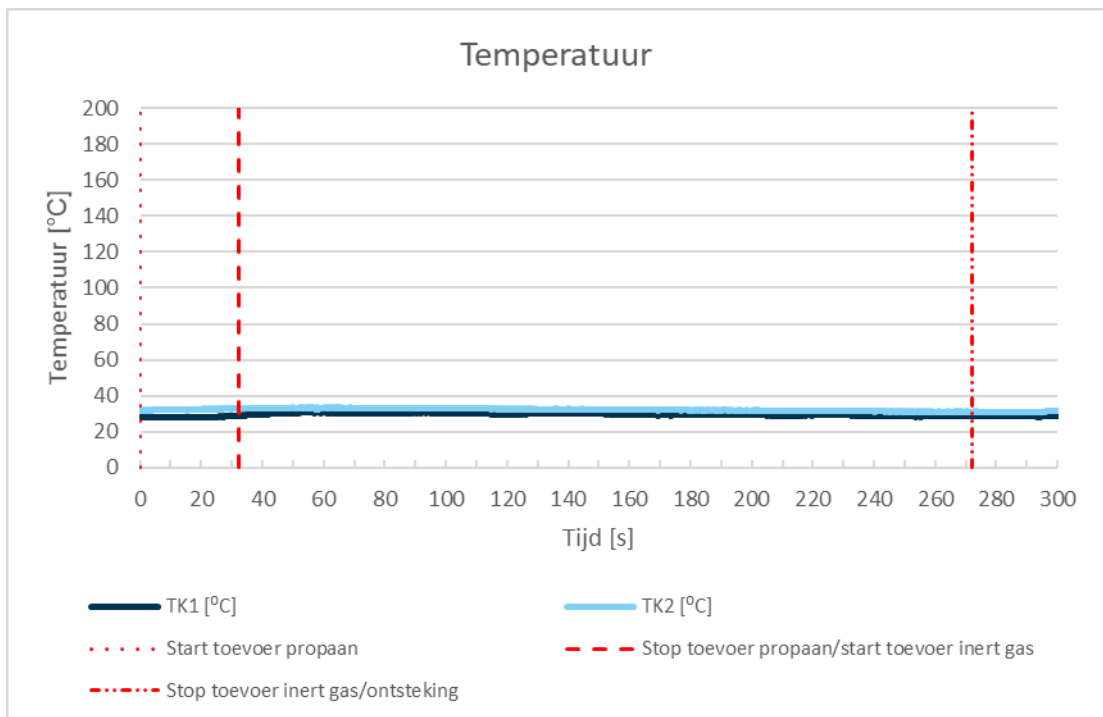


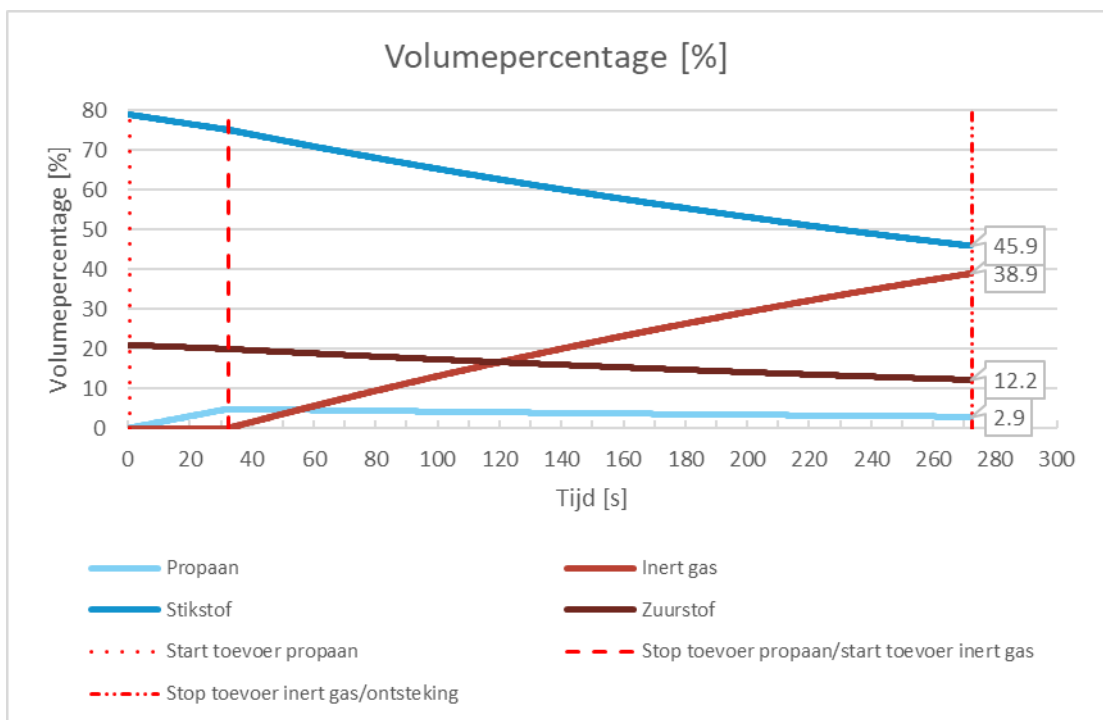
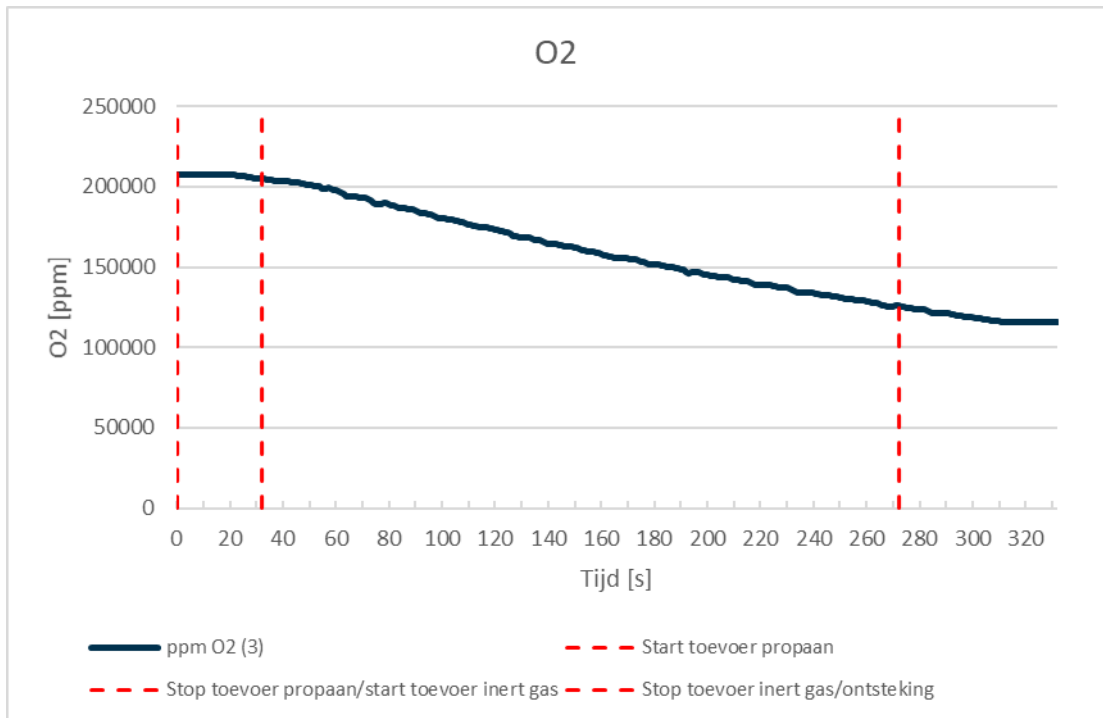
Figuur 19: Toevoer 210 seconden





Figuur 20: Toevoer 240 seconden





Overzicht

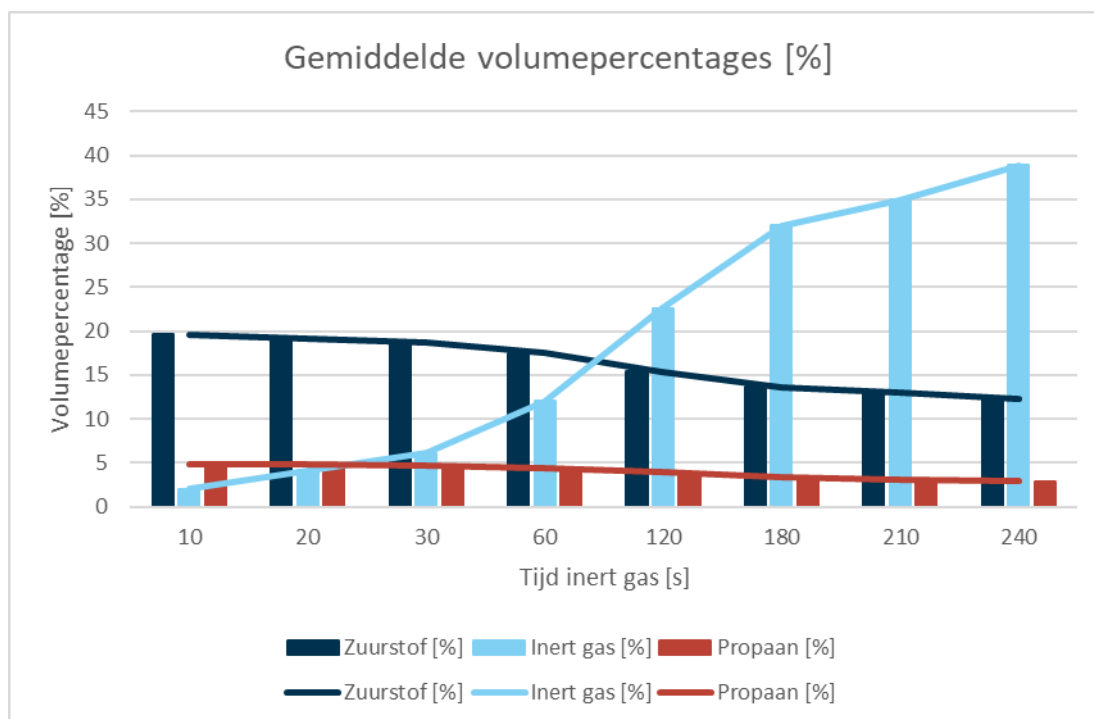
Tabel 13: Samenvatting resultaten stikstof koude experimenten

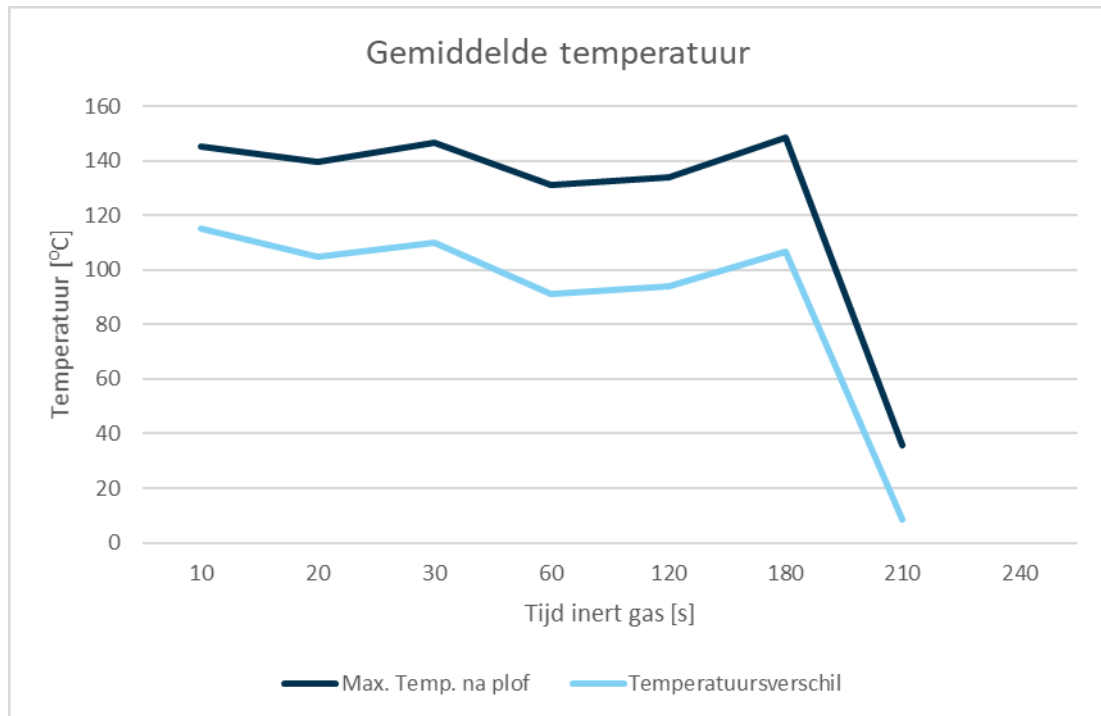
Toevoertijd [s]	Volumepercentage [%]			Ontbranding [-]	Temperatuur [°C] ²⁾	
	Zuurstof	stikstof	Propaan		Max. na plof	Vershil
10	19,6	2	4,8	Ja	145	115
20 ¹⁾	19,1	4,1	4,8	Ja	140	105
30 ¹⁾	18,7	6,1	4,7	Ja	147	110
60 ¹⁾	17,5	12	4,4	Ja	131	91
120 ¹⁾	15,4	22,6	3,9	Ja	134	94
180 ¹⁾	13,6	32	3,4	Ja	149	107
210 ¹⁾	13	34,9	3,1	Ja	36	8
240 ¹⁾	12,2	38,9	2,9	Nee	-	-

¹ Voor deze experimenten kon de volumebalans maar voor één van de twee experimenten worden bepaald.

² De maximale temperatuur en het temperatuurverschil zijn bepaald op basis van thermokoppel 1.

Figuur 21: Gemiddelde volumepercentage (%)





Uit de resultaten blijkt het volgende:

- > Bij toevoeging van 240 seconden stikstof vindt geen ontbranding plaats. Bij alle andere experimenten vindt er wel een ontbranding plaats.
- > Het volumepercentage propaangas bedraagt voor de toevoeging van stoom 4,8 % en is minimaal ongeveer 2,9 % (240 seconden toevoeging van stikstof).
- > Het volumepercentage zuurstof bedraagt voor de toevoeging van stoom 20 % en is minimaal ongeveer 12,2 % (240 seconden toevoeging van stikstof).
- > Het volumepercentage stikstof bedraagt maximaal 38,9 % (240 seconden toevoeging van stikstof).
- > De maximale temperatuur na ontbranding ligt voor de eerste experimenten (10 tot en met 180 seconden toevoeging van stikstof) nagenoeg gelijk, tussen de 130 °C tot 150 °C. Bij een toevoeging van stikstof gedurende 210 seconden is de maximale temperatuur na ontbranding lager (36 °C).
- > Voor het temperatuurverschil geldt hetzelfde. In de eerste experimenten ligt het temperatuurverschil tussen de 90 °C en 110 °C. Bij toevoeging van stikstof gedurende 210 seconden is het temperatuurverschil ongeveer 8 °C.

3.1.6 Samenvatting resultaten experimenten koude situatie

Tabel 14: Samenvatting resultaten experimenten koude situatie

Tijd [s]	Volumepercentage [%]					
	Stoom	Plof	Nevel	Plof	Stikstof	Plof
10	3,5	Ja	4	Ja	2	Ja
20	6,2	Ja	4,4	Ja	4,1	Ja
30	7,9	Ja	3,7	Ja	6,1	Ja
60	8,7	Ja	3,4	Ja	12	Ja
120	12,5	Ja	3,1	Ja	22,6	Ja
180	-	-	-	-	32	Ja
210	-	-	-	-	34,9	Ja
240	-	-	-	-	38,9	Nee
300	19,7	Ja	2,5	Ja	-	-

Uit de resultaten blijkt het volgende:

- > Bij alle experimenten met toevoeging van stoom treedt een ontbranding op.
- > Bij alle experimenten met toevoeging van nevel treedt een ontbranding op.
- > Bij de experimenten met stikstof wordt een ontbranding voorkomen bij toevoeging van 240 seconden stikstof (volumepercentage van ongeveer 39%).

3.2 Experimenten warme situatie

3.2.1 Nulmeting

Propaangas

Voor de bepaling van de juiste hoeveelheid propaangas is een vijftal metingen uitgevoerd. Het was van belang dat ook na 300 seconden nog voldoende gas in het plofvat zat om een ontbranding te veroorzaken.

Tabel 15: Aantal seconden toevoer van propaan

	Aantal seconden gas	Moment van ontsteking	Wel/geen plof
0-1-10	35	Na 10 seconden	Ja
0-2-300	35	Na 300 seconden	Nee
-	50	Na 10 seconden	Ja
-	50	Na 300 seconden	Ja
-	60	Na 10 seconden	Ja

Inerte gassen

Voor de toevoeging van inerte gassen is uitgegaan van dezelfde uitgangspunten als opgenomen in paragraaf 3.1.1. Dit betekent een stoomtoevoer van 0,86 gr/s en een neveltoevoer van 1,4 gr/s.

3.2.2 Uitgevoerde experimenten

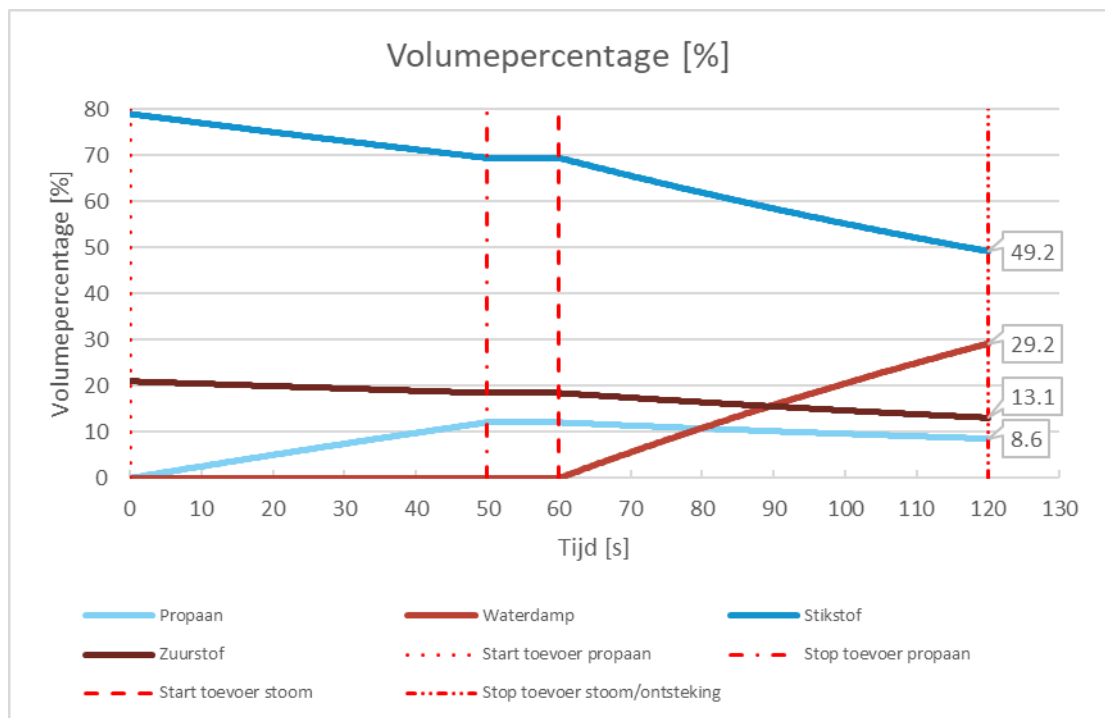
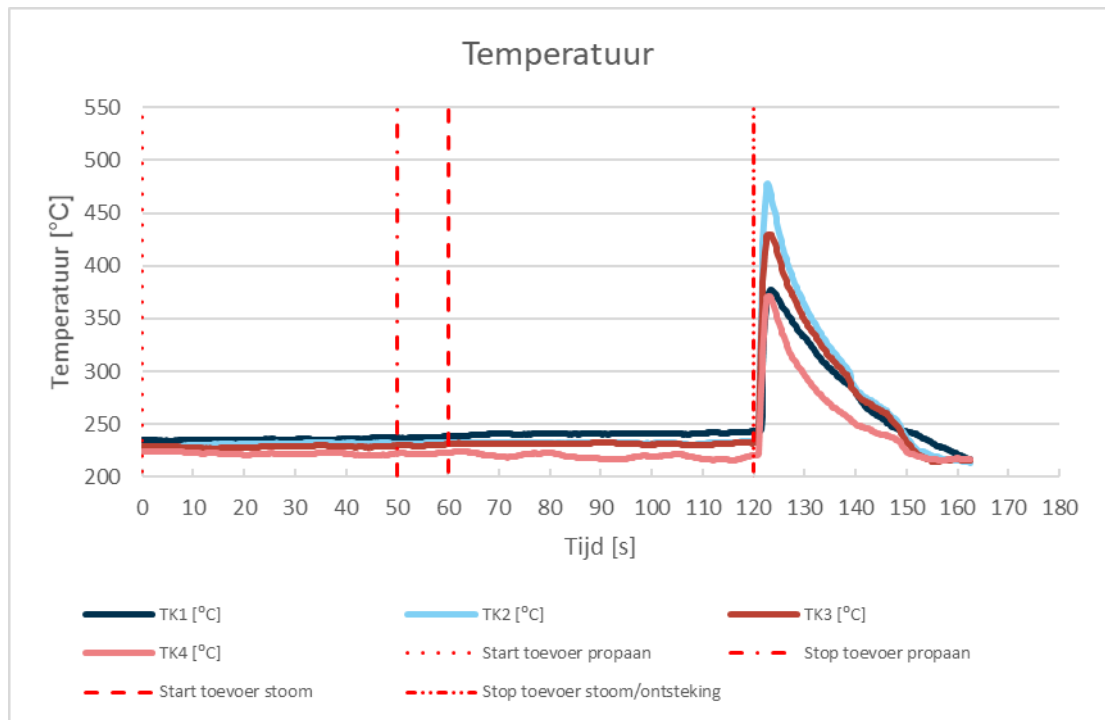
Tabel 16: Uitgevoerde experimenten

Tijd [s]	Stoom [gr]	Water mist [gr]
10	8,6	14
20	17,2	28
30	25,8	42
40	-	56
50	-	70
60	51,6	-
90	77,4	-
100	86	-
120	103,2	-

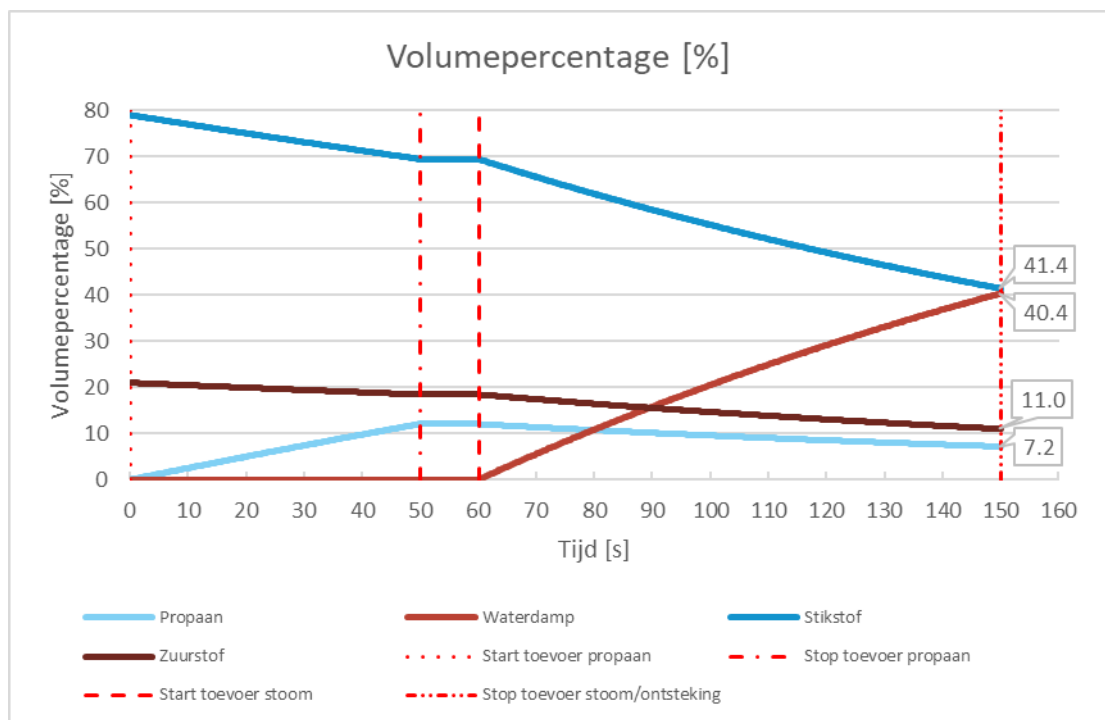
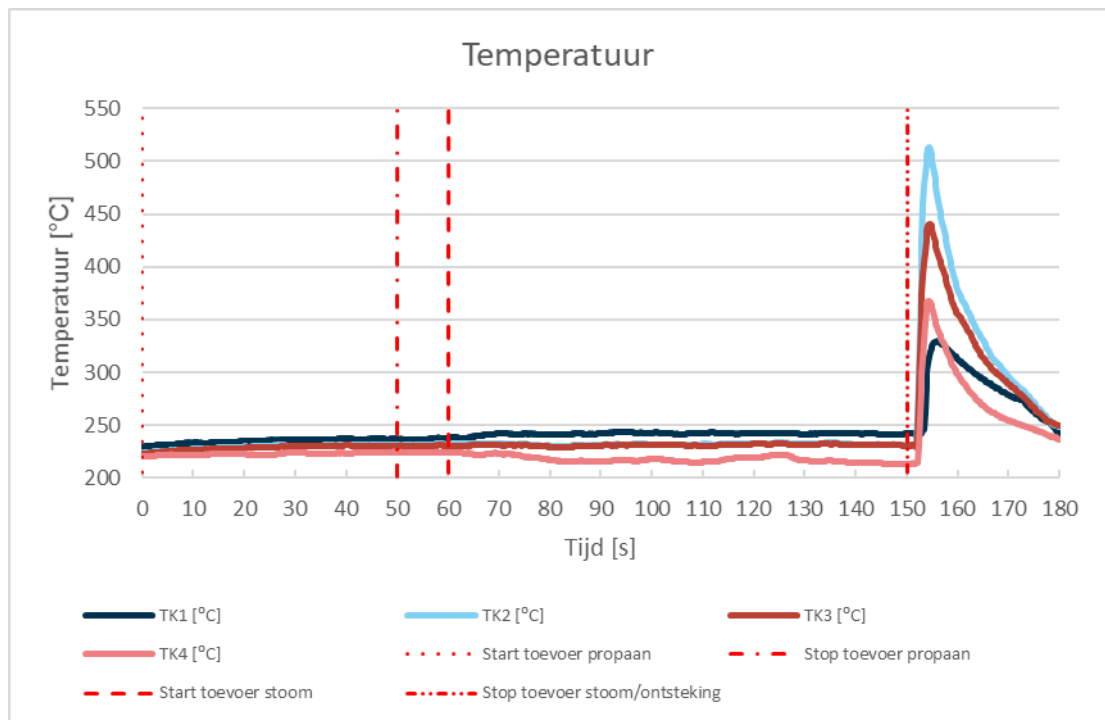
In de onderstaande paragrafen zijn de resultaten van de experimenten met stoom en nevel samengevat. De uitgebreide resultaten van alle experimenten zijn opgenomen in bijlage 4. Bij zowel de toevoeging van stoom als van nevel zijn de volumepercentages van de gassen aanwezig in de plofkast bepaald op basis van een volumebalans. De volumebalans inclusief randvoorwaarden en uitgangspunten is nader toegelicht in bijlage 5.

3.2.3 Samenvatting resultaten stoom

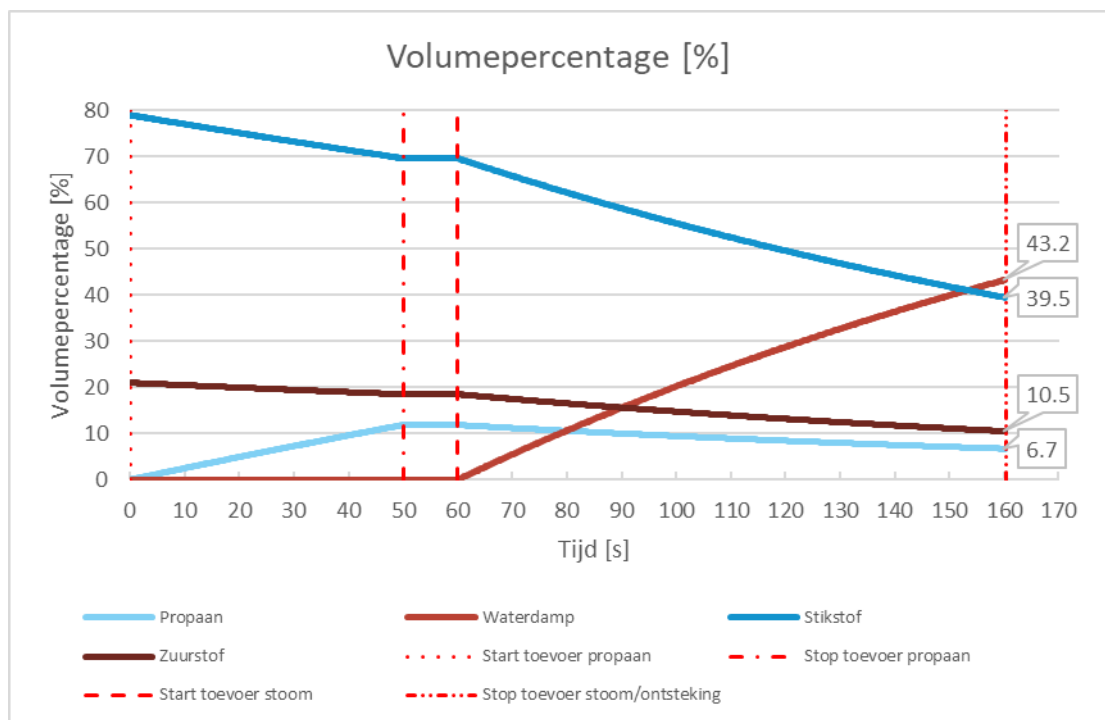
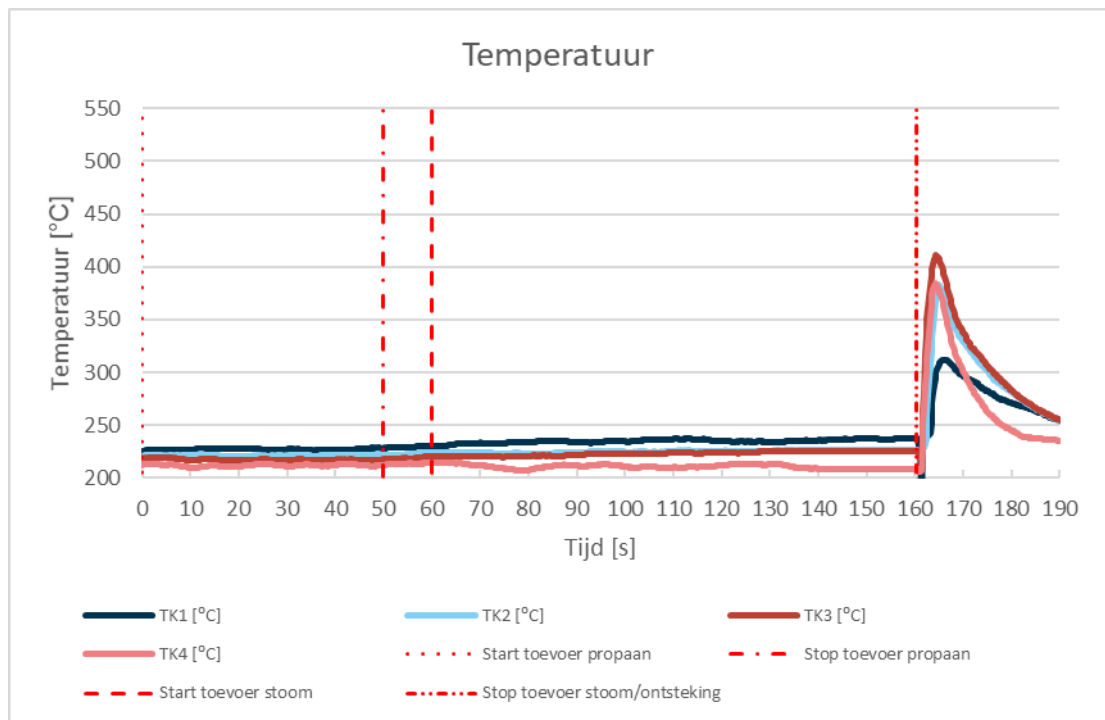
Figuur 22: Test 8 toevoer 60 seconden



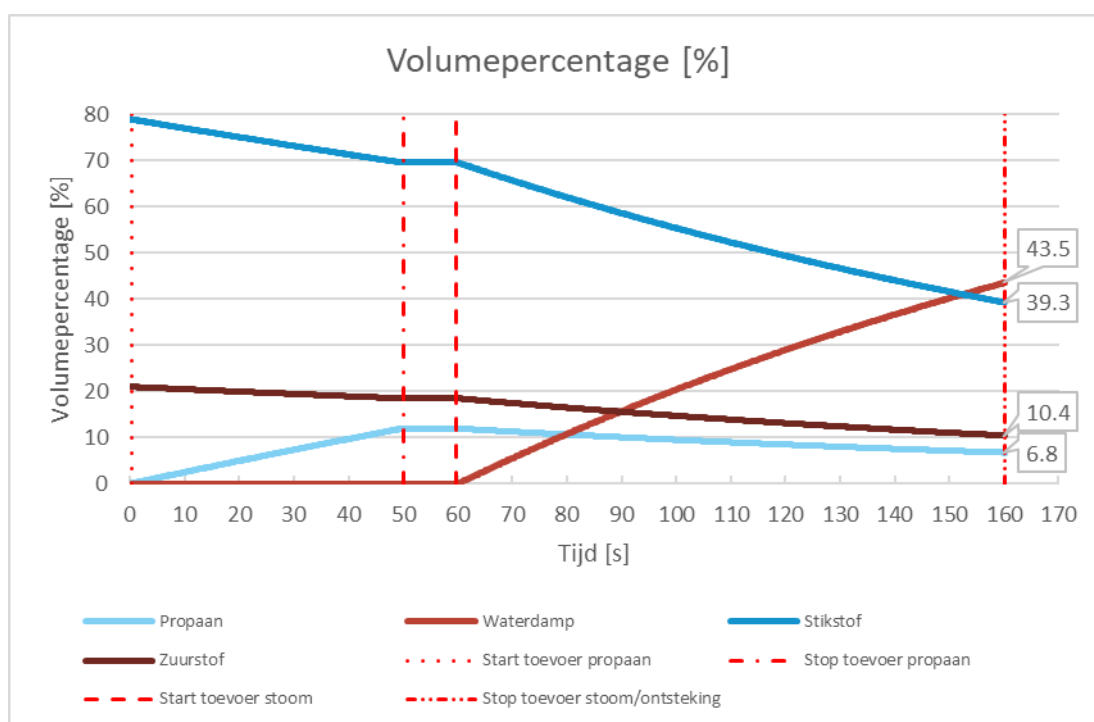
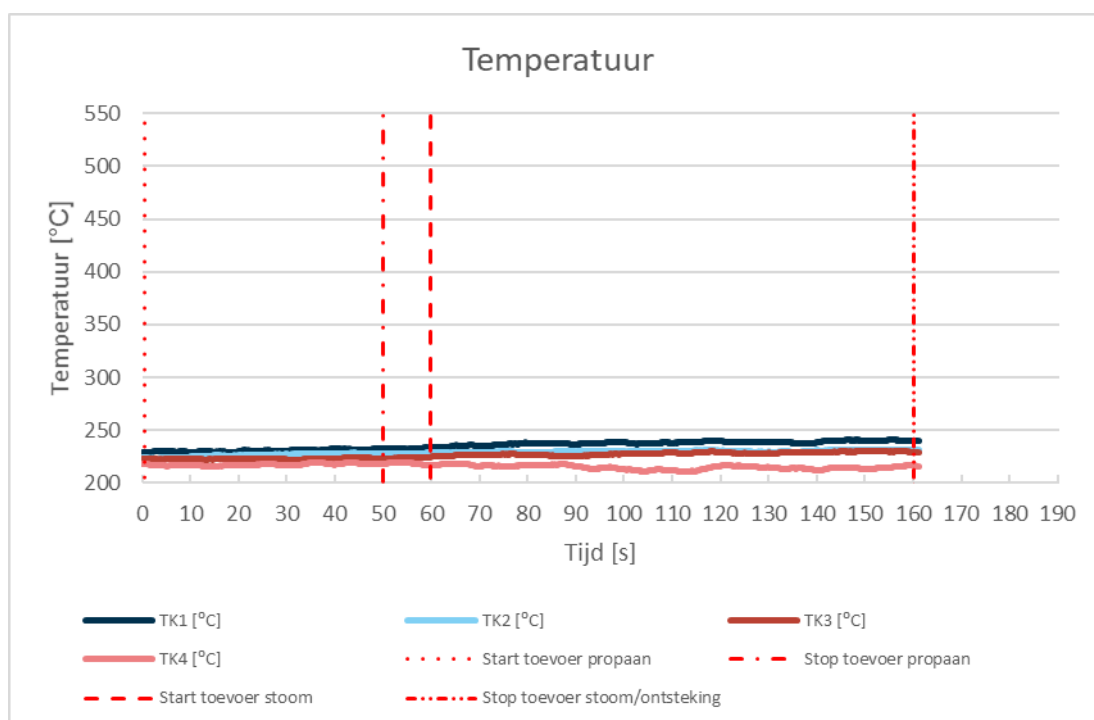
Figuur 23: Test 10 toevoer 90 seconden



Figuur 24: Test 13 toevoer 100 seconden



Figuur 25: Test 14 toevoer 100 seconden



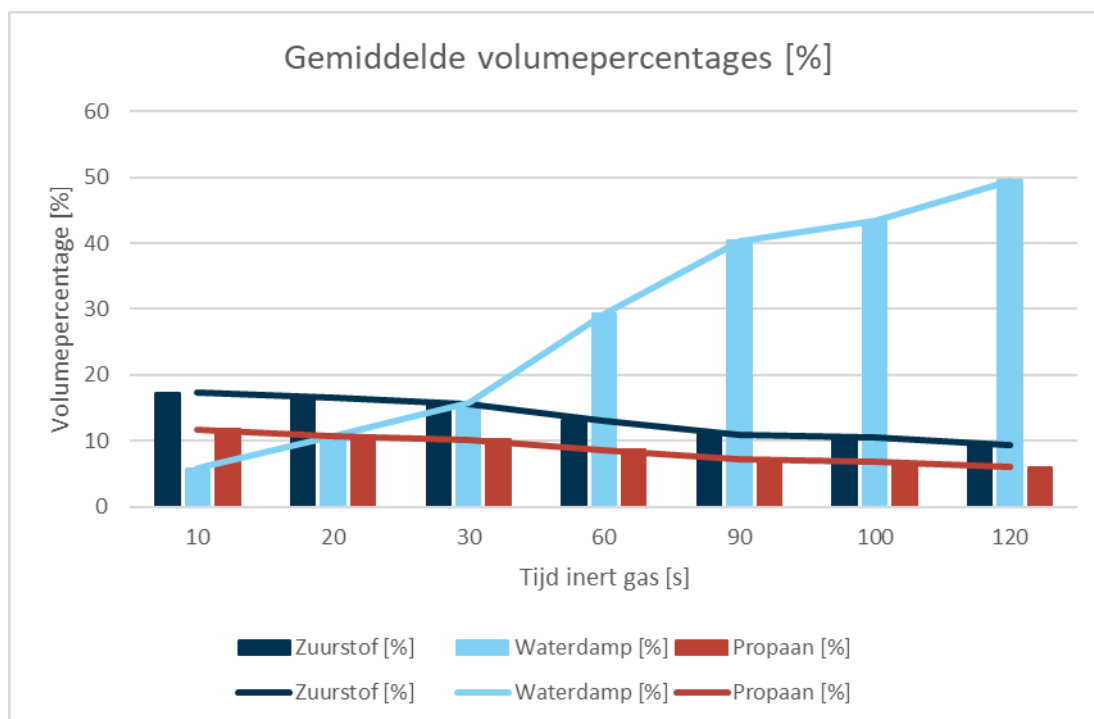
Overzicht

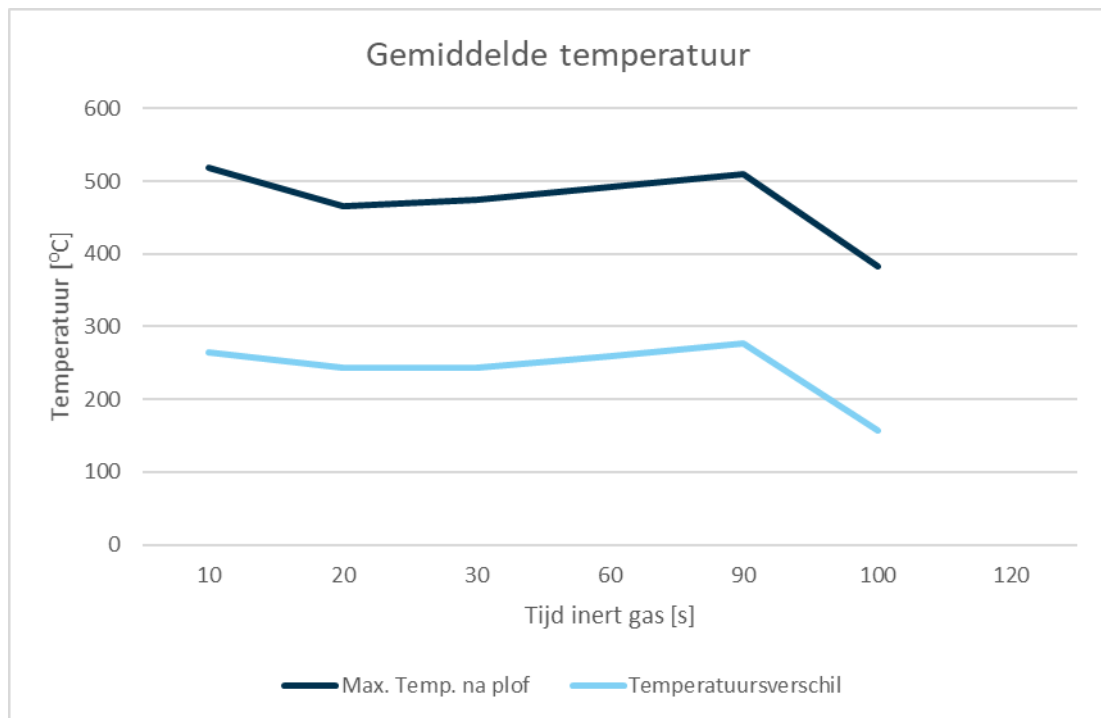
Tabel 17: Overzicht parameters experimenten met stoom

Toevoertijd [s]	Volumepercentage [%]			Ontbranding [-]	Temperatuur [°C] ²⁾	
	Zuurstof	Waterdamp	Propaan		Max. na plof	Verskil
10	17,3	5,8	11,8	Ja	519	265
20	16,5	10,7	10,7	Ja	466	243
30	15,5	18,9	10,2	Ja	475	243
60	13,1	29,3	8,6	Ja	493	259
90	11	40,4	7,2	Ja	509	277
100	10,5	43,4	6,7	Ja/nee	383	156
120	9,4	49,5	6	Nee	-	-

¹ De maximale temperatuur en het temperatuurverschil zijn bepaald op basis van thermokoppel 2.

Figuur 26: Gemiddelde volumepercentages (%)



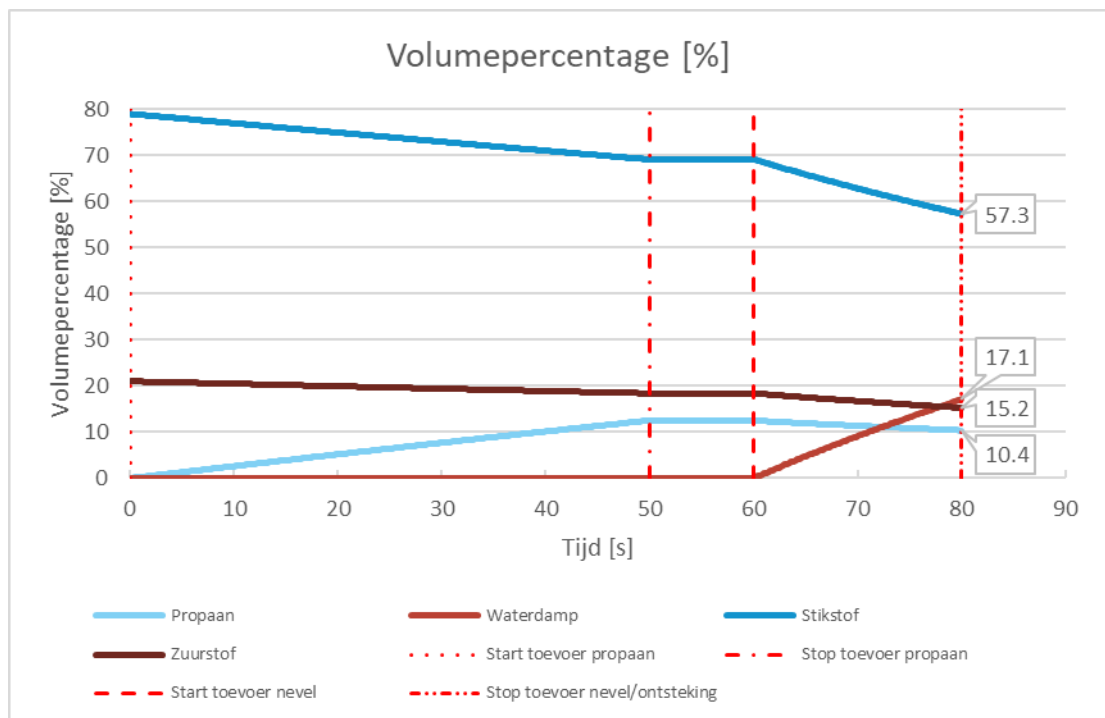
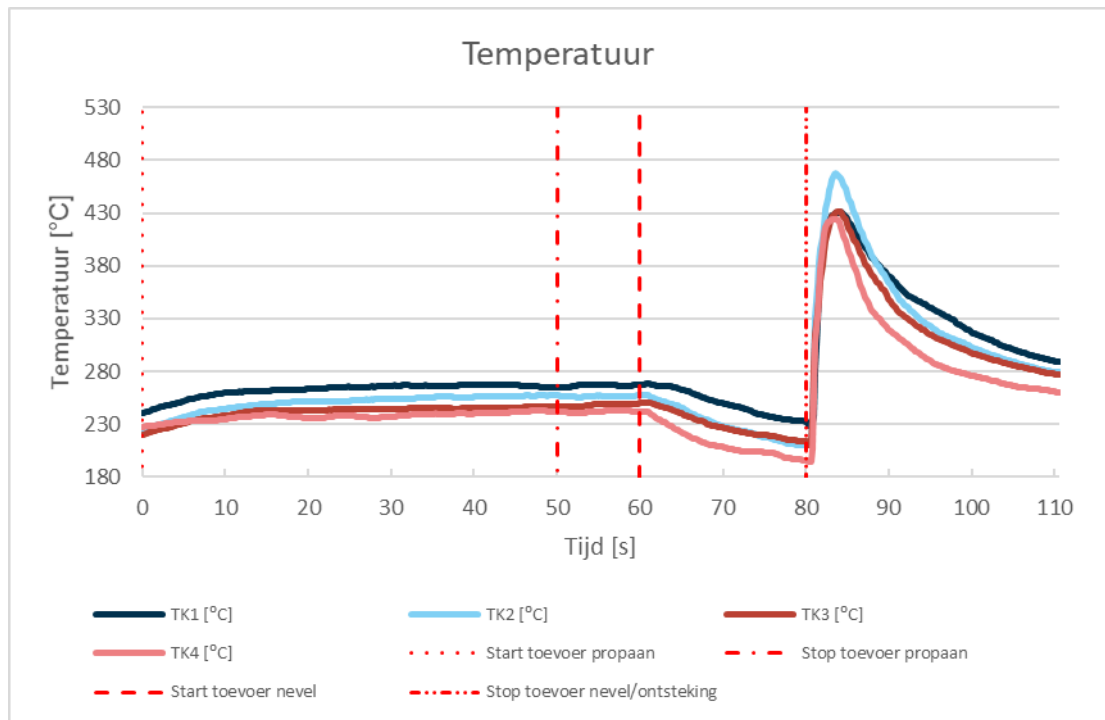


Uit de resultaten blijkt het volgende:

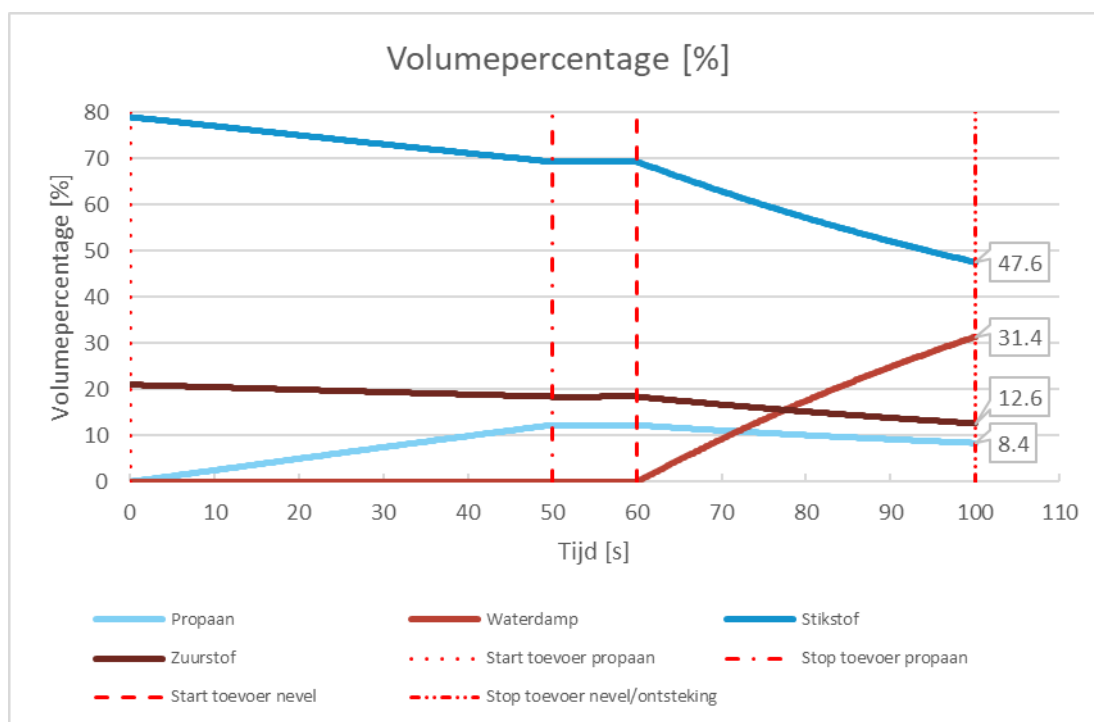
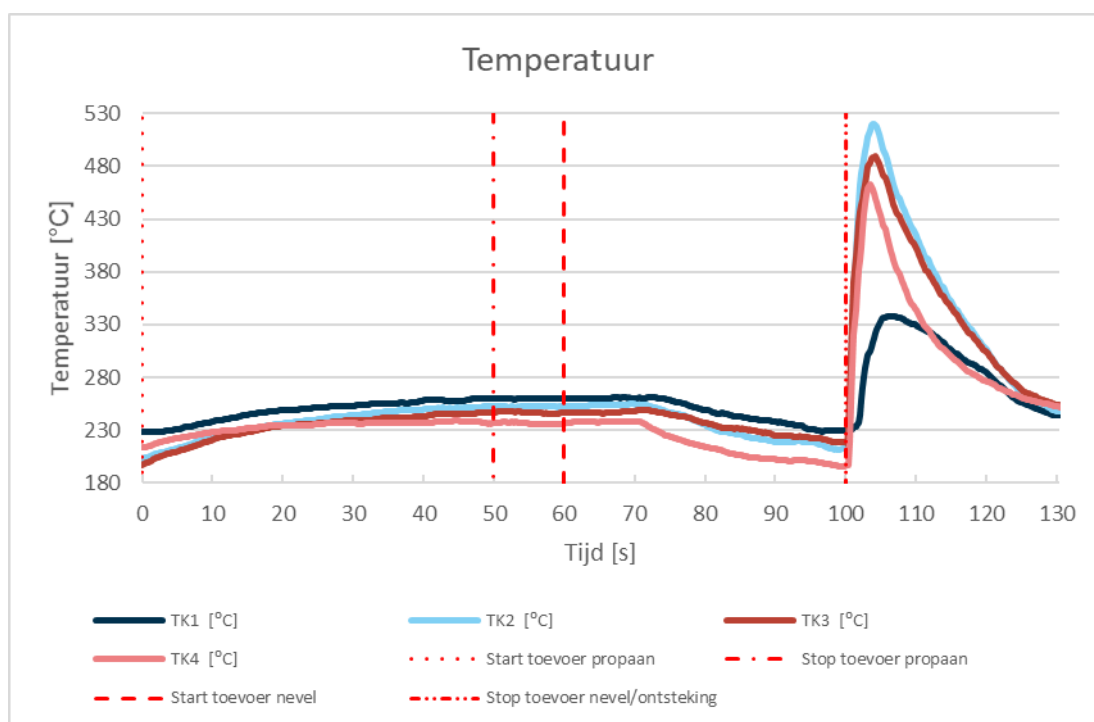
- > Bij alle experimenten met een toevoeging van stoom tot 100 seconden vindt een ontbranding plaats.
- > Bij de experimenten met een toevoeging van 100 seconden stoom vindt één keer een ontbranding plaats en twee keer niet. Bij een toevoeging van 120 seconden stoom vindt geen ontbranding plaats.
- > Het volumepercentage propaan gas bedraagt voor de toevoeging van stoom 12,1 % en is minimaal ongeveer 6,0 % (120 seconden toevoeging van stoom).
- > Het volumepercentage zuurstof bedraagt voor de toevoeging van stoom 18,5 % en is minimaal ongeveer 9,4 % (120 seconden toevoeging van stoom).
- > Het volumepercentage waterdamp bedraagt maximaal 49,5 % (120 seconden toevoeging van stoom).
- > Het omslagpunt voor wel of geen ontbranding ligt ongeveer tussen 43 % en 44 % waterdamp (10-11 % zuurstof en 6-7 % propaan).
- > Voor de bovengenoemde volumepercentages moet worden aangegeven dat deze gelden voor de op dat moment aanwezige temperaturen (200-250 °C) in het plofvat.
- > De maximale temperatuur na ontbranding ligt voor de eerste experimenten (10 tot en met 90 seconden toevoeging van stoom) nagenoeg gelijk, tussen de 470 °C tot 520 °C. Bij een toevoeging van stoom gedurende 100 seconden is de maximale temperatuur na ontbranding lager (283 °C).
- > Voor het temperatuurverschil geldt hetzelfde als de maximale temperatuur: tussen de 240 °C en 280 °C voor de eerste experimenten en 156 °C bij 100 seconden toevoeging van stoom.

3.2.4 Samenvatting resultaten nivel

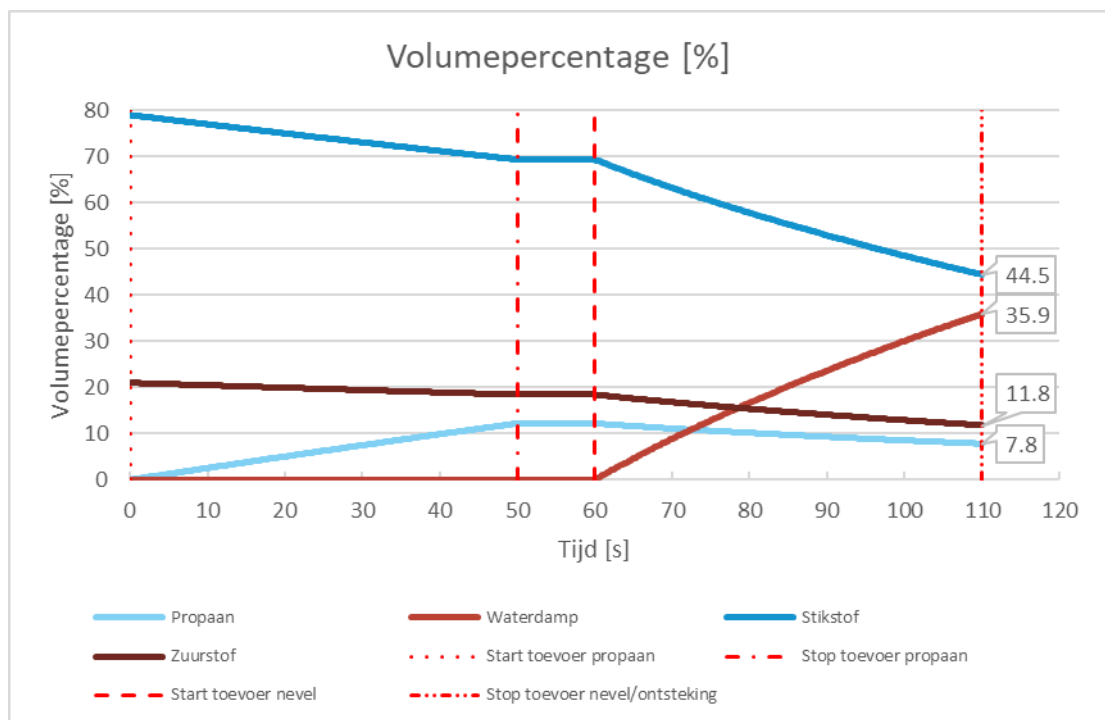
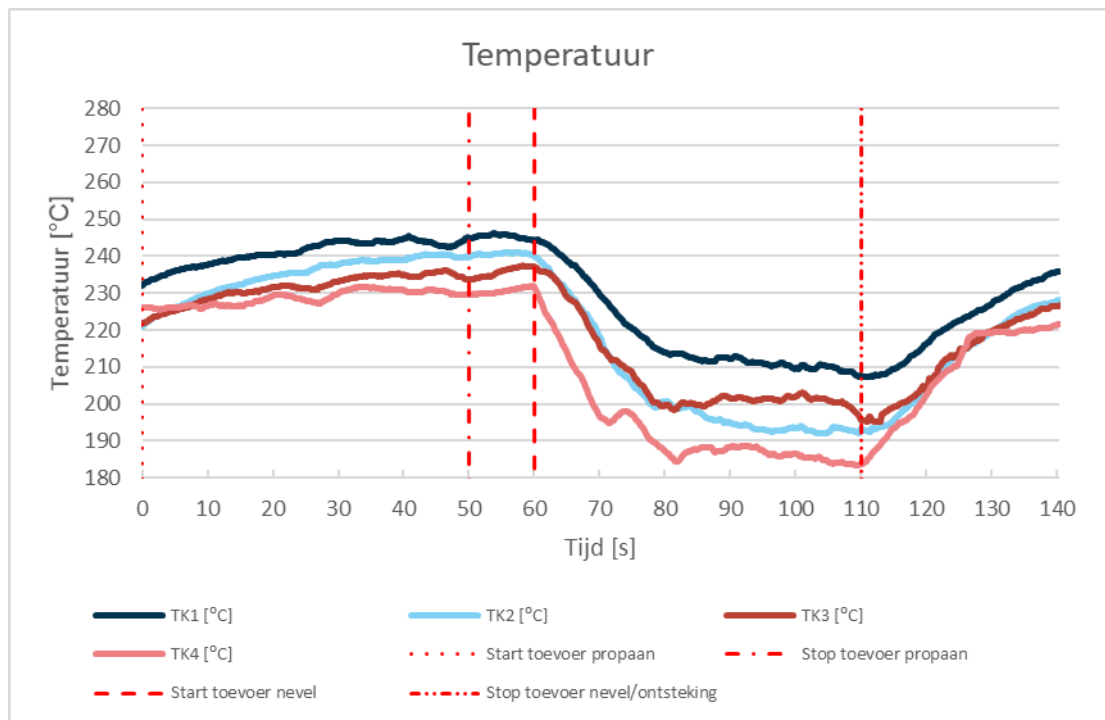
Figuur 27: Test 4 toevoer 20 seconden



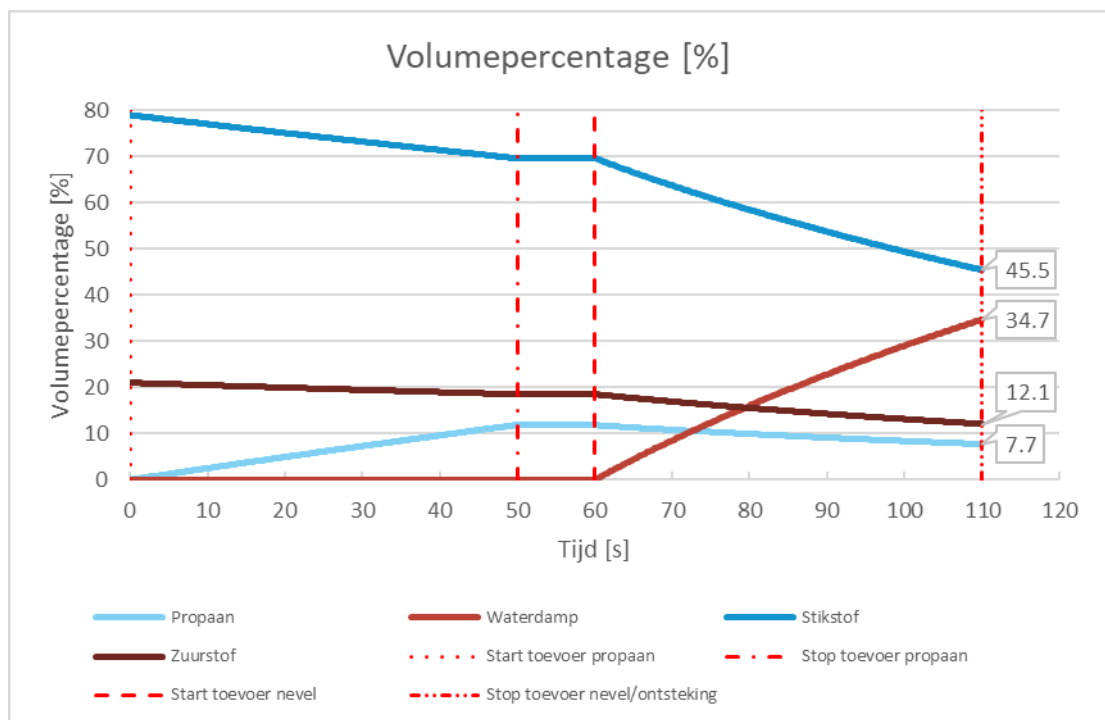
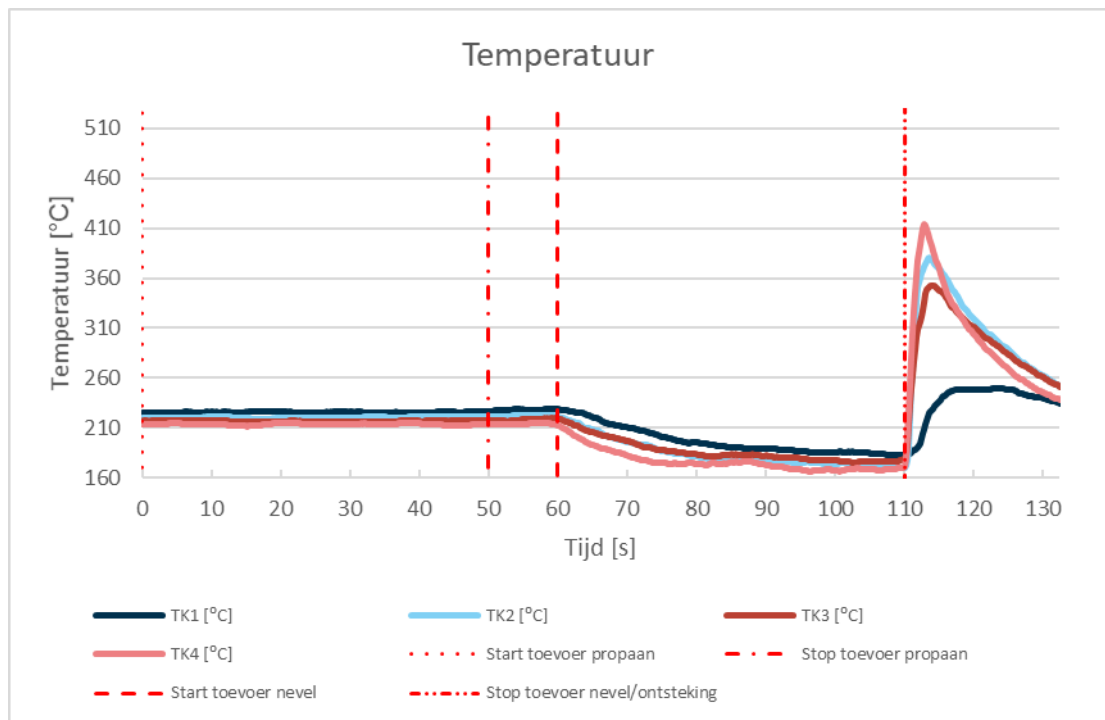
Figuur 28: Test 8 toevoer 40 seconden



Figuur 29: Test 9 toevoer 50 seconden



Figuur 30: Test 10 toevoer 50 seconden



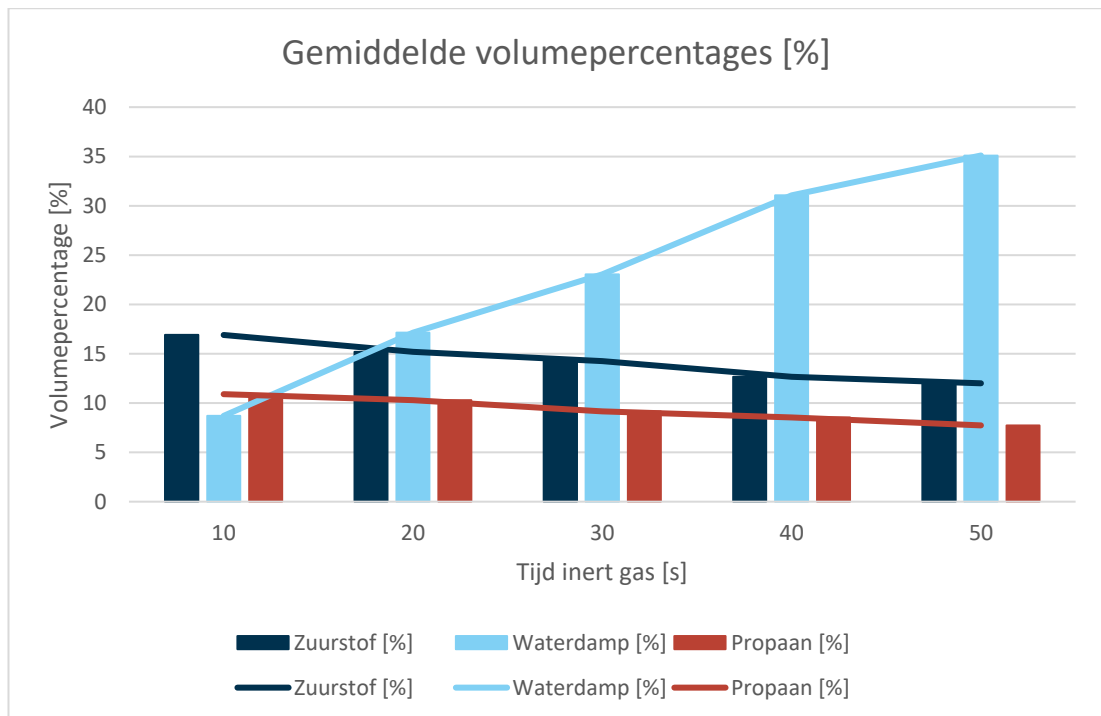
Overzicht

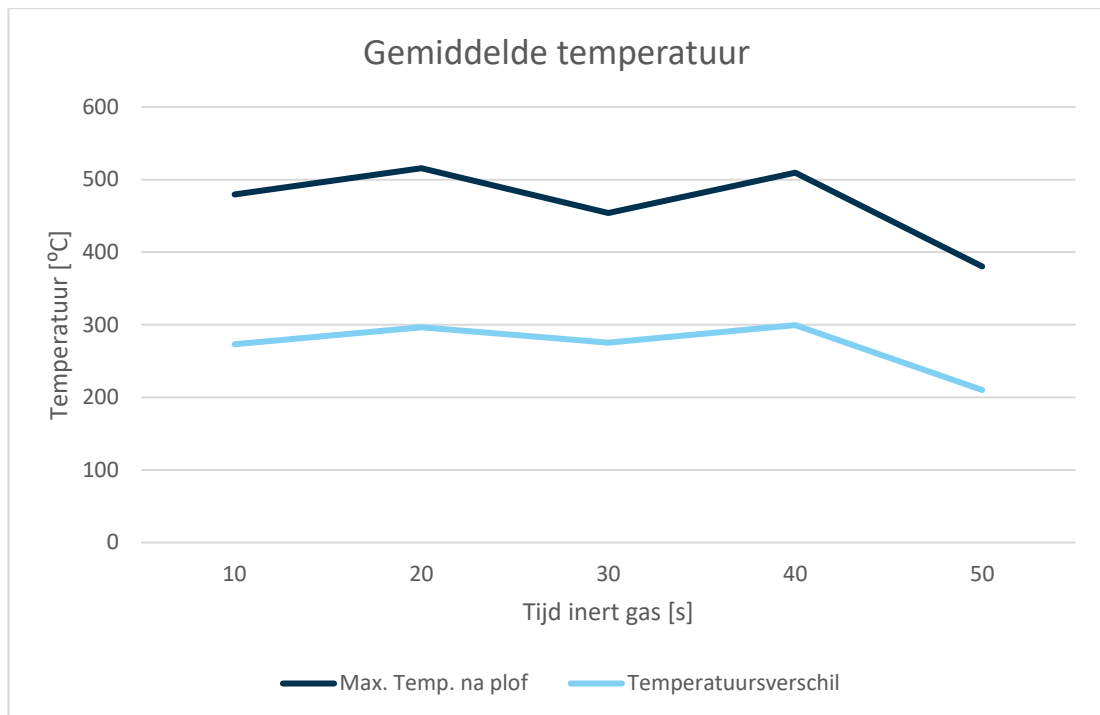
Tabel 18: Overzicht resultaten

Toevoertijd [s]	Volumepercentage [%]			Ontbranding [-]	Temperatuur [°C] ¹⁾	
	Zuurstof	Waterdamp	Propana		Max. na plof	Vershil
10	16.9	8.7	10.9	Ja	480	273
20	15.2	17.2	10.3	Ja	516	296
30	14.3	23.1	9.2	Ja	454	276
40	12.7	31.1	8.6	Ja	510	300
50	12	35.1	7.7	Ja/Nee	380	210

¹ De maximale temperatuur en het temperatuurverschil zijn bepaald op basis van thermokoppel 2.

Figuur 31: Gemiddelde volumepercentages (%)





Uit de resultaten blijkt het volgende:

- > Bij alle experimenten tot toevoeging van 50 seconden nevel vindt een ontbranding plaats.
- > Bij de experimenten met toevoeging van 50 seconden nevel vindt één keer een ontbranding plaats en twee keer niet.
- > Het volumepercentage propaangas bedraagt voor de toevoeging van nevel 12,6 % en is minimaal ongeveer 7,7 % (50 seconden toevoeging van nevel).
- > Het volumepercentage zuurstof bedraagt voor de toevoeging van nevel 18,3 % en is minimaal ongeveer 12 % (50 seconden toevoeging van nevel).
- > Het volumepercentage waterdamp bedraagt maximaal 35,9 % (50 seconden toevoeging van nevel).
- > Het omslagpunt voor wel of geen ontbranding ligt ongeveer tussen 31 % en 36 % waterdamp (12-13 % zuurstof en 7-9 % propaan).
- > Voor de bovengenoemde volumepercentages moet worden aangegeven dat deze gelden voor de op dat moment aanwezige temperaturen (180-210 °C) in het plovvat.
- > De maximale temperatuur na ontbranding ligt voor de eerste experimenten (10 tot en met 40 seconden toevoeging van nevel) nagenoeg gelijk, tussen de 450 °C tot 520 °C. Bij toevoeging van nevel gedurende 50 seconden is de maximale temperatuur na ontbranding lager (380 °C).
- > Voor het temperatuurverschil geldt hetzelfde als de maximale temperatuur: tussen de 270 °C en 300 °C voor de eerste experimenten en 210 °C bij 50 seconden toevoeging van nevel.

3.2.5 Samenvatting resultaten experimenten warme situatie

Tabel 19: Samenvatting resultaten experimenten warme situatie

Tijd [s]	Volumepercentage [%]			
	Stoom	Plof	Nevel	Plof
10	5,8	Ja	8,7	Ja
20	10,7	Ja	17,2	Ja
30	15,9	Ja	23,1	Ja
40	-	-	31,1	Ja
50	-	-	35,1	Nee/Ja
60	29,3	Ja	-	-
90	40,4	Ja	-	-
100	43,4	Nee/Ja	-	-
120	49,5	Nee	-	-

Uit de resultaten blijkt het volgende:

- > Bij de experimenten met stoom wordt een ontbranding voorkomen bij toevoeging van 100 seconden stoom (volumepercentage van ongeveer 43 %).
- > Bij de experimenten met nevel wordt een ontbranding voorkomen bij toevoeging van 50 seconden nevel (volumepercentage van ongeveer 35 %).

4 Analyse

4.1 Algemeen

Op basis van paragraaf 1.6 worden in dit hoofdstuk de resultaten van de experimenten geanalyseerd op basis drie criteria, te weten: de brandbaarheidsgrenzen (LFL en UFL), het inertiseringspunt (IP) en de LOC-waarde. Voor een nadere toelichting zie hoofdstuk 1.

Tabel 20: Criteria brandbaarheidsgrenzen, IP en LOC-waarde

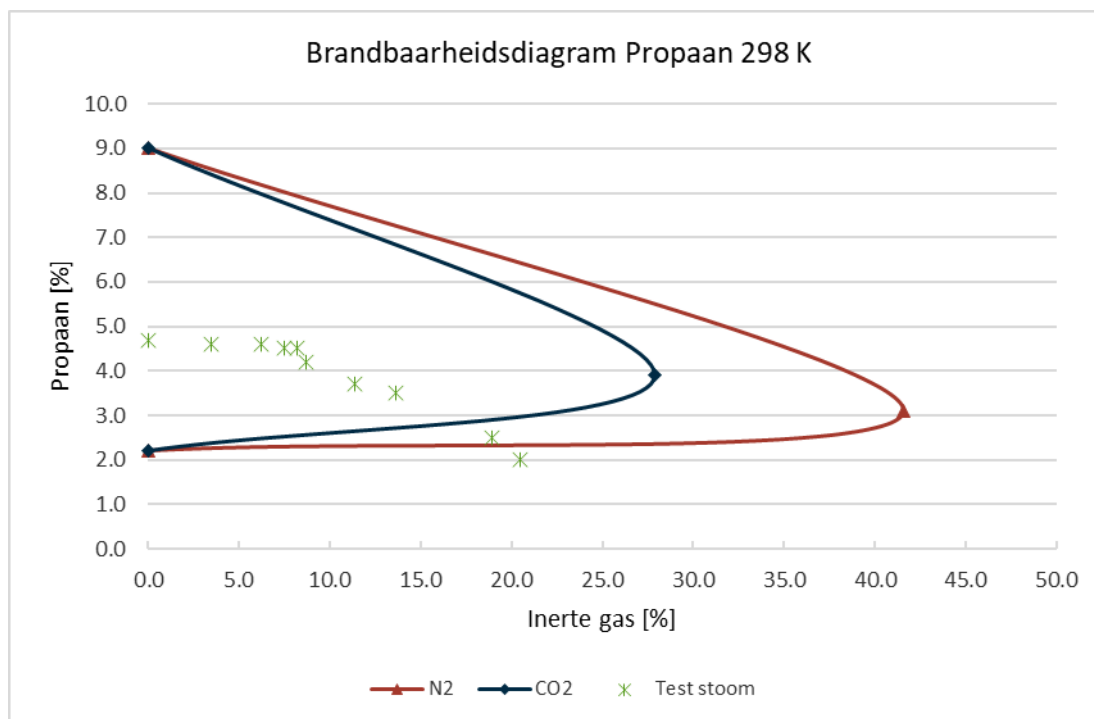
criterium	Propaan LFL – UFL [%]	IP [%]	LOC-waarde [%]
Stoom (koud)	2,2 – 9.5	28 – 42	11.5 – 14.5
Nevel (koud)	2.2 – 9.5	28 – 42	11.5 – 14.5
Stikstof (koud)	2.2 – 9.5	41.6	11.6
Stoom (warm)	1.9 – 11.3	42.3	11.5
Nevel (warm)	1.9 – 11.3	42.3	11.5

4.2 Koude situatie

4.2.1 Stoom

Voor de beoordeling van de criteria brandbaarheidsgrenzen en inertiseringspunt is gebruik gemaakt van figuur 32. In deze figuur zijn de resultaten van de experimenten voor stoom in het brandbaarheidsdiagram opgenomen.

Figuur 32: Brandbaarheidsdiagram Propan 298 K



Uit figuur 32 blijkt dat de resultaten voor stoom grotendeels binnen het brandbaarheidsdiagram liggen. Hoewel in het brandbaarheidsdiagram waterdamp niet is opgenomen, zal deze tussen de lijnen van koolstofdioxide (CO₂) en stikstof (N₂) in liggen. Alleen de testresultaten bij toevoeging van stoom gedurende 300 seconden geven resultaten die mogelijk buiten de brandbaarheidsgrenzen liggen. In beide testen was nog steeds sprake van een ontbranding. Dit kan mogelijk worden verklaard door:

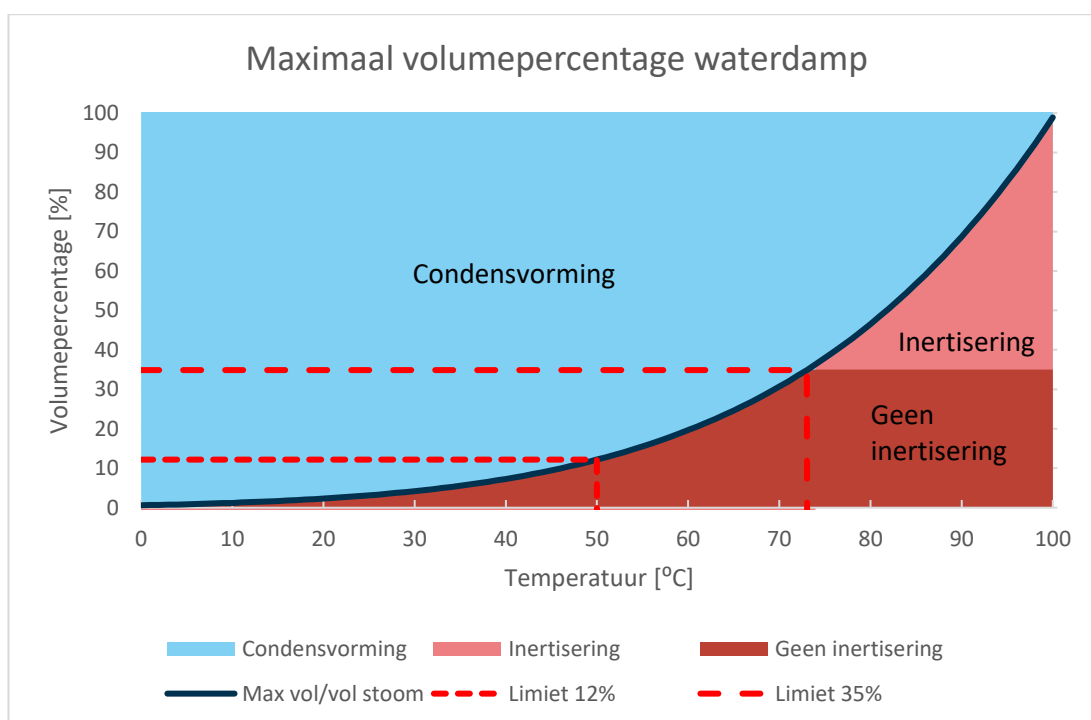
- > De temperatuur tijdens deze experimenten was gemiddeld voor de ontsteking rond de 58 °C. Het brandbaarheidsdiagram (LFL) en de berekende volumepercentages zijn hiervoor niet gecorrigeerd.
- > Er vond weliswaar een ontbranding plaats, maar deze was minder heftig dan bij de andere experimenten met minder toevoeging van stoom. Het verschil tussen de temperaturen van voor en tijdens de ontbranding is ook lager dan bij de andere experimenten. Dit duidt erop dat het mengsel dicht tegen de onderste brandbaarheidsgrens aan zit.
- > Het brandbaarheidsdiagram is een samenstelling van diverse onderzoeken. Zeker rondom de grenzen is sprake van een bepaalde foutmarge. Door deze foutmarge kan het geteste mengsel zich nog juist binnen de brandbaarheidsgrenzen bevinden.
- > De berekende volumepercentages hebben door de aannames in de uitgangspunten en randvoorwaarden ook een foutmarge. Door deze foutmarge kan het geteste mengsel zich nog juist binnen de brandbaarheidsgrenzen bevinden.

Dit betekent dat bij de experimenten met toevoeging van stoom als inerte stof een ontbranding niet is voorkomen. Met waterdamp (stoom) als inert gas zijn de geteste mengsels onvoldoende verdund om het gasmengsel buiten de brandbaarheidsgrenzen te brengen.

Uit figuur 32 blijkt ook dat het inertiseringspunt niet wordt bereikt. De testresultaten liggen nog relatief ver af van het mogelijke inertiseringspunt (28 en 42 %). Het maximale volumepercentage waterdamp bedraagt ongeveer 20 %.

Dit kan verklaard worden doordat het verzadigingspunt bereikt is (zie paragraaf 1.3 en figuur 33). Onder het kookpunt van water kan lucht maar een beperkte hoeveelheid waterdamp bevatten. Door toevoeging van stoom (100 °C) stijgt de temperatuur in de plofkast, waardoor er steeds meer waterdamp in de lucht aanwezig kan zijn. De temperatuur is echter nog niet hoog genoeg (58 °C) om de inertiseringsgrens (van 35 % bij 73 °C) te bereiken.

Figuur 33: Maximaal volumepercentage waterdamp



In principe is er genoeg waterdamp toegevoegd. De maximale toegevoegde hoeveelheid waterdamp bedraagt ongeveer 438 l (300 seconden bij 100 °C). Dit is ruim 2,6 keer de totale inhoud van de plofkast (166 l). Een groot deel van de toegevoegde waterdamp condenseert echter direct door de lagere temperatuur in de plofkast. Dit is ook visueel waargenomen tijdens de experimenten aan de binnenzijde van de omkasting.

Doordat het percentage waterdamp ongeveer 20 % bedraagt, wordt ook de LOC-waarde (11.5 – 14.5 %) niet bereikt. Het zuurstofpercentage bedraagt minimaal ongeveer 16.4 %.

Tabel 21: Samenvatting analyseresultaten stoom op basis van drie criteria

criterium	Grenswaarde	Testen	Inertisering mogelijk?
LFL	2,2%	Min. 2.0%	Ja ¹⁾
IP	28 – 42%	Max. 20%	Nee
LOC	11.5 – 14.5%	16.4%	Nee

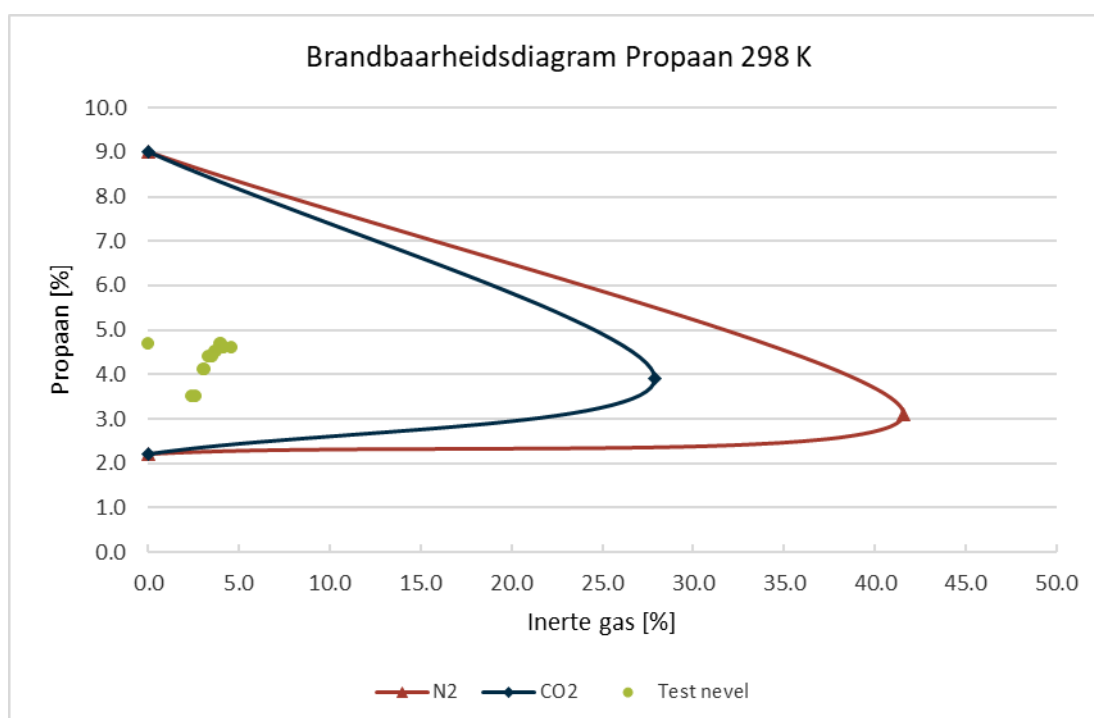
¹ Op basis van de theorie is het criterium onderschreden. In de test vond echter toch een ontbranding plaats.

Uit de analyse blijkt dat op basis van twee van de drie criteria inertisering met waterdamp door toevoeging van stoom bij deze experimenten niet mogelijk is. Inertisering met waterdamp (stoom) als inert gas is onder het verzadigingspunt voor inertisering (73 °C) alleen mogelijk door verdunning van het brandbare gasmengsel tot onder de onderste brandbaarheidsgrens. Boven de 73 °C is inertisering theoretisch ook mogelijk op basis van het inertiseringspunt en de LOC-waarde.

4.2.2 Nevel

Voor de beoordeling van de criteria brandbaarheidsgrenzen en inertiseringspunt is gebruik gemaakt van figuur Figuur 34: Brandbaarheidsdiagram Propaan 298 K. In deze figuur zijn de resultaten van de experimenten voor nevel in een brandbaarheidsdiagram opgenomen.

Figuur 34: Brandbaarheidsdiagram Propaan 298 K



Uit de figuur blijkt dat de resultaten voor nevel binnen het brandbaarheidsdiagram liggen. Hoewel in het brandbaarheidsdiagram waterdamp niet is opgenomen, zal deze tussen de lijnen van koolstofdioxide (CO₂) en stikstof (N₂) in liggen. Dit betekent dat bij toevoeging van nevel als inerte stof een ontbranding niet is voorkomen. Dit is in overeenstemming met de

testresultaten. Met nevel als inerte stof kan het mengsel onvoldoende worden verdund om het buiten de brandbaarheidsgrenzen te brengen.

Uit de figuur blijkt ook dat het inertiseringspunt niet wordt bereikt. De testresultaten liggen relatief dicht bij elkaar ondanks het verschil in de toegevoerde hoeveelheid nevel. Uit de testresultaten van nevel blijkt dat het maximale volumepercentage waterdamp in de lucht ongeveer 4,6 % bedraagt, terwijl het inertiseringspunt bij omgevingstemperatuur tussen de 28 en 42 % ligt.

Dit kan verklaard worden door het verzadigingspunt (zie paragraaf 1.3 en figuur 33). Door toevoeging van nevel blijft de temperatuur in de plofkast relatief laag (omgevingstemperatuur), waardoor de maximale hoeveelheid waterdamp die in de lucht aanwezig kan zijn onder de 5 % blijft. Dit is ook visueel bevestigd tijdens de experimenten, omdat condensatie en/of water aan de binnenzijde van de omkasting zijn waargenomen.

Doordat het percentage waterdamp ongeveer 5 % bedraagt, wordt ook de LOC-waarde (11.5 – 14.5 %) niet bereikt. Het zuurstofpercentage bedraagt minimaal ongeveer 19.1 %.

Tabel 22: Samenvatting analyseresultaten nevel op basis van de drie criteria

criterium	Grenswaarde	Testen	Inertisering mogelijk?
LFL	2,2%	Min. 3.5%	Nee
IP	28 – 42%	Max. 5%	Nee
LOC	11.5 – 14.5%	19.14%	Nee

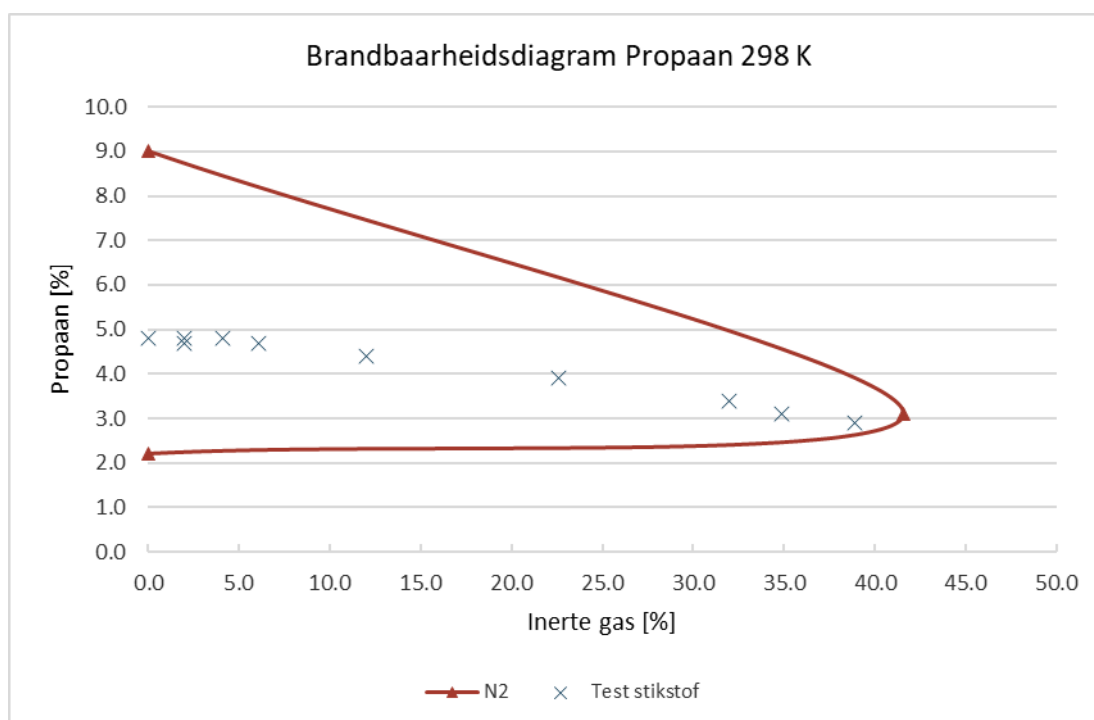
¹ Op basis van de theorie is het criterium onderschreden. In de test vond echter toch een ontbranding plaats.

Uit de analyse blijkt dat op basis alle drie de criteria inertisering met waterdamp door toevoeging van nevel bij deze experimenten niet mogelijk is. Inertisering met waterdamp (nevel) als inert gas is onder het verzadigingspunt voor inertisering (73 °C) alleen mogelijk door verdunning van het brandbare gasmengsel tot onder de onderste brandbaarheidsgrens. Dit vergt echter een lange verdunningstijd. De verdunning vindt in dat geval echter niet plaats met nevel maar met lucht. Omdat de temperatuur met toevoeging van nevel niet stijgt, kan het verzadigingspunt voor inertisering niet worden bereikt. Doordat er onvoldoende verdunning van de lucht plaatsvindt, zal de LOC-waarde niet worden bereikt.

4.2.3 Stikstof

Voor de beoordeling van de criteria brandbaarheidsgrenzen en inertiseringspunt is gebruik gemaakt van figuur 35. In deze figuur zijn de resultaten van de experimenten voor stikstof in een brandbaarheidsdiagram opgenomen.

Figuur 35: Brandbaarheidsdiagram Propaan 298 K



Uit de figuur blijkt dat de resultaten voor stikstof binnen het brandbaarheidsdiagram liggen. De brandbaarheidsgrenzen worden (net) niet onder- of overschreden.

Uit de figuur blijkt ook dat het inertiseringspunt (net) niet wordt bereikt. Bij 240 seconden toevoer van stikstof bedraagt het volumepercentage stikstof ongeveer 39 %; dit is nog onder het inertiseringspunt van 41,6 %.

Ook de LOC-waarde voor stikstof als inertiseringsgas 11,6 % wordt (net) niet bereikt. Deze waarde bedraagt minimaal circa 12.2 % (bij 240 seconden toevoer stikstof).

Tabel 23: Samenvatting analyseresultaten stikstof op basis van de drie criteria

criterium	Grenswaarde	Testen	Inertisering mogelijk?
LFL	2,2%	Min. 2.9%	Nee
IP	41.6%	Max. 38.9%	Nee
LOC	11.6%	Min. 12.2%	Nee

Op basis van bovenstaande tabel kan geconcludeerd worden dat met de toegevoegde hoeveelheid stikstof geen inertisering kan worden bereikt. Uit de resultaten van de testen echter, blijkt dat bij toevoeging van 240 seconden stikstof geen ontbranding plaats vindt. Bij deze testen is dus wél sprake van een inertisering, die mogelijk kan worden verklaard door een tweeledige foutmarge:

- > Het brandbaarheidsdiagram is een samenstelling van diverse onderzoeken en zeker rondom de grenzen is er hierom sprake van een bepaalde foutmarge. Hierdoor kan het geteste mengsel zich net buiten de brandbaarheidsgrenzen bevinden.
- > De berekende volumepercentages hebben door de aannames in de uitgangspunten en randvoorwaarden ook een foutmarge, waardoor het geteste mengsel zich eveneens net buiten de brandbaarheidsgrenzen zou kunnen bevinden.

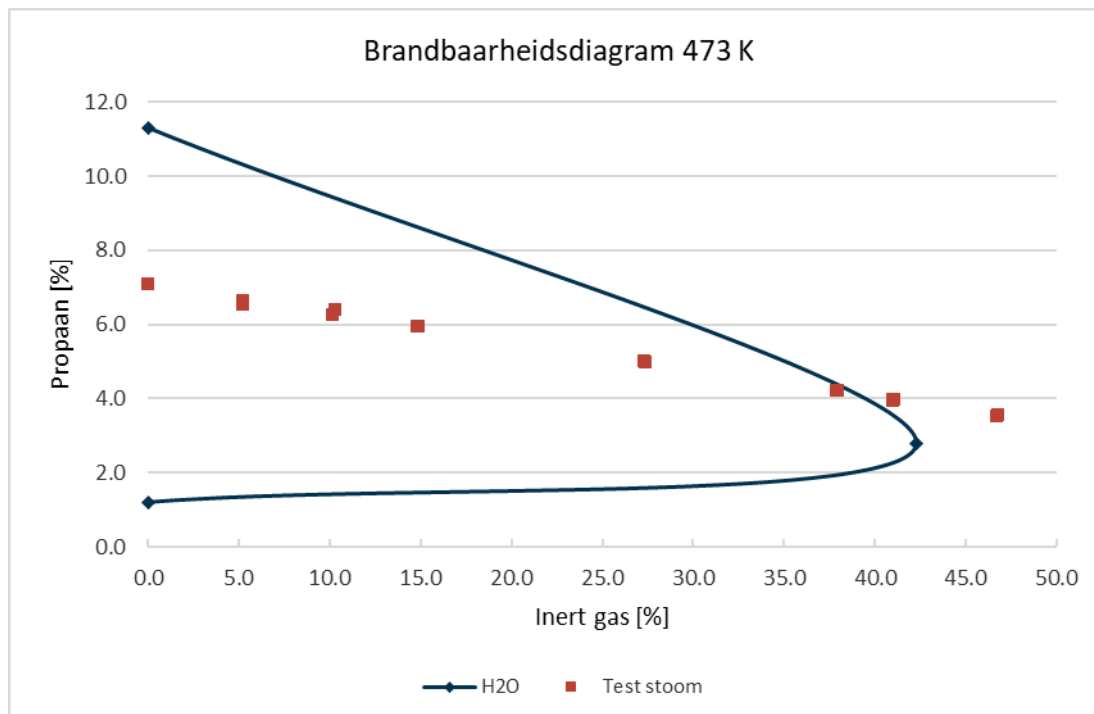
Uit de analyse blijkt dat inertisering door toevoeging van stikstof bij omgevingstemperatuur mogelijk is; dit wordt ook ondersteund door diverse ander onderzoeken (Zabetakis, 1965; CHEMSAFE, 2009). De resultaten uit de testen zijn eveneens in overeenstemming met waarden die genoemd worden in hoofdstuk 1. Wat het maatgevende mechanisme (LFL/UFL, IP of LOC) in de uitgevoerde testen is geweest, kan echter niet met zekerheid worden bepaald. Waarschijnlijk is het een combinatie van deze mechanismen dat ervoor zorgt dat inertisering plaats vindt.

4.3 Warme situatie

4.3.1 Stoom

Voor de beoordeling van de criteria brandbaarheidsgrenzen en inertiseringspunt is gebruik gemaakt van figuur 36. In deze figuur zijn de resultaten van de experimenten voor nevel in het brandbaarheidsdiagram opgenomen.

Figuur 36: Brandbaarheidsdiagram 473 K



Uit de figuur blijkt dat de resultaten voor stoom tot 90 seconden toevoer binnen het brandbaarheidsdiagram liggen. Bij een toevoer van 100 en 120 s liggen de resultaten buiten het diagram.

Uit de figuur blijkt ook dat het inertiseringspunt wordt overschreden. Bij 120 seconden toevoer van stoom bedraagt het volumepercentage waterdamp ongeveer 46,8%. Dit is boven het inertiseringspunt van 42,3%.

Daarnaast wordt de LOC-waarde voor waterdamp als inertiseringsgas van 11,5% onderschreden. Deze bedraagt minimaal circa 9,4% (bij 120 seconden toevoer van stoom).

Tabel 24: Samenvatting analyseresultaten stoom op basis van de drie criteria

criterium	Grenswaarde	Testen	Inertisering mogelijk?
LFL	1.9%	Min. 3.5% ¹⁾	Nee
IP	42.3%	Max. 46.8%	Ja
LOC	11.5%	Min. 9.4%	Ja

¹ De berekende volumepercentages zijn terug gerekend naar omgevingstemperatuur (20 °C).

² De berekende volumepercentages zijn terug gerekend naar de diagramtemperatuur (200 °C).

Op basis van bovenstaande tabel kan geconcludeerd worden dat met de toegevoegde hoeveelheid stoom van 100 en 120 seconden inertisering kan worden bereikt. Uit de resultaten van de testen blijkt echter dat bij één van de drie testen met toevoeging van 100 seconden stoom er toch een ontbranding plaats vindt. Hierover valt het volgende op te merken:

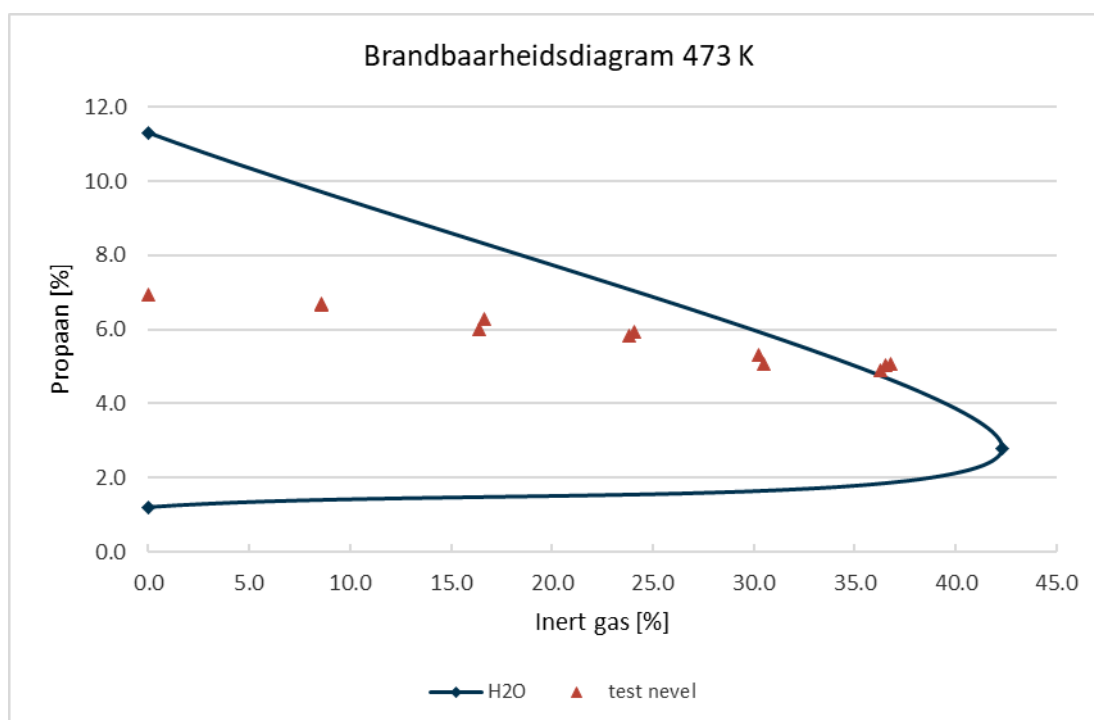
- > Er vond weliswaar een ontbranding plaats, maar deze was minder heftig dan bij de andere experimenten met minder toevoeging van stoom. Het verschil in temperatuur voor en tijdens de ontbranding is ook lager (ongeveer 100 °C) dan bij de andere experimenten. Dit duidt erop dat het mengsel dicht tegen de brandbaarheidsgrens aan zit.
- > Het brandbaarheidsdiagram is een samenstelling van diverse onderzoeken en zeker rondom de grenzen is er hierom sprake van een bepaalde foutmarge. Door deze foutmarge zou het geteste mengsel zich nog juist binnen de brandbaarheidsgrenzen kunnen bevinden.
- > De berekende volumepercentages hebben door de aannames in de uitgangspunten en randvoorwaarden ook een foutmarge. Ook door deze foutmarge zou het geteste mengsel zich nog juist binnen de brandbaarheidsgrenzen kunnen bevinden.

Uit de analyse blijkt dat inertisering door toevoeging van stoom bij een temperatuur van ongeveer 225 °C mogelijk is; dit wordt ook ondersteund in diverse andere onderzoeken (Zabetakis, 1965; CHEMSAFE, 2009). De resultaten uit de testen zijn dan ook in overeenstemming met waarden uit de literatuur. Wat het maatgevende mechanisme (IP of LOC) in de uitgevoerde testen is geweest, kan niet met zekerheid worden bepaald. Waarschijnlijk is het een combinatie van deze mechanismen die ervoor zorgt dat inertisering plaats vindt.

4.3.2 Nevel

Voor de beoordeling van de criteria brandbaarheidsgrenzen en inertiseringspunt is gebruik gemaakt van figuur 37. In deze figuur zijn de resultaten van de experimenten voor nevel in het brandbaarheidsdiagram opgenomen.

Figuur 37: Brandbaarheidsdiagram 473 K



Uit de figuur blijkt dat de resultaten voor nevel tot 50 seconden toevoer binnen het brandbaarheidsdiagram liggen; bij een toevoer van 50 seconden liggen de resultaten daarbuiten.

Uit de figuur blijkt ook dat het inertiseringspunt niet wordt overschreden. Bij 50 seconden toevoer van nevel bedraagt het volumepercentage waterdamp ongeveer 36,8 %, wat onder het inertiseringspunt van 42,3 % ligt.

Daarnaast wordt de LOC-waarde voor waterdamp als inertiseringsgas van 11,5 % niet overschreden. Deze bedraagt minimaal circa 12 % (bij 50 seconden toevoer van nevel).

Tabel 25: Samenvatting analyseresultaten stoom op basis van drie criteria

criterium	Grenswaarde	Testen	Inertisering mogelijk?
UFL	UFL	> UFL 5% ¹⁾	Ja
IP	42.3%	Max. 36.8%	Nee
LOC	11.5%	Min. 12%	Nee

¹⁾ De berekende volumepercentages zijn terug gerekend naar omgevingstemperatuur (20 °C).

²⁾ De berekende volumepercentages zijn terug gerekend naar de diagramtemperatuur (200 °C).

Op basis van bovenstaande tabel kan geconcludeerd worden dat op één criterium met de toegevoegde hoeveelheid nevel van 50 seconden inertisering kan worden bereikt. Uit de resultaten van de testen blijkt echter dat bij één van de drie testen met toevoeging van 50

seconden nevel er toch een ontbranding plaats vindt. Dit kan mogelijk worden verklaard door de volgende zaken:

- > Er vond weliswaar een ontbranding plaats maar deze was minder heftig dan bij de andere experimenten met minder toevoeging van nevel. Zowel de maximale temperatuur tijdens de ontbranding (ongeveer 380 °C) als het verschil tussen de temperatuur voor en tijdens de ontbranding zijn lager (ongeveer 210 °C) dan bij de andere experimenten (ongeveer 490 °C en 390 °C). Dit duidt erop dat het mengsel dicht tegen de brandbaarheidsgrens aan zit.
- > Het brandbaarheidsdiagram is een samenstelling van diverse onderzoeken; zeker rondom de grenzen is er hierom sprake van een bepaalde foutmarge. Door deze foutmarge kan het geteste mengsel zich nog juist binnen de brandbaarheidsgrenzen bevinden.
- > De berekende volumepercentages hebben door de aannames in de uitgangspunten en randvoorwaarden ook een foutmarge. Door deze foutmarge kan het geteste mengsel zich nog juist binnen de brandbaarheidsgrenzen bevinden.

Uit de analyse blijkt dat inertisering door toevoeging van nevel bij een temperatuur van ongeveer 225 °C mogelijk is. Dit wordt ook ondersteund in diverse andere onderzoeken (Zabetakis, 1965; CHEMSAFE, 2009). De resultaten uit de testen zijn dan ook in overeenstemming met de waarden gevonden in de literatuur. In de uitgevoerde testen is het maatgevende mechanisme waarschijnlijk de bovenste brandbaarheidsgrens.

4.4 Samenvatting analyse

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat zowel met stikstof als verdunningsgas als met waterdamp als verdunningsgas een brandbaar gasmengsel - in dit geval propaan - geïnertiseerd kan worden. Uit de analyse komt naar voren dat inertisering kan plaatsvinden door meerdere mechanismen. Door verdunning kan het gasmengsel buiten de brandbaarheidsgrenzen worden gebracht. Door verdunning kan het inertiseringspunt worden bereikt (IP), zodat de brandbaarheidsgrenzen op elkaar komen te liggen. Door verdunning kan het zuurstofpercentage onder de LOC-waarde worden gebracht waardoor ontbranding niet meer mogelijk is. Uit de testen blijkt ook dat niet altijd duidelijk is wat het maatgevende mechanisme is geweest. In de meeste situaties is er waarschijnlijk sprake van een combinatie van mechanismen. De resultaten van de testen zijn in overeenstemming met gevonden waarden uit internationale literatuur.

Voor waterdamp als verdunningsgas is daarnaast de temperatuur van het mengsel van belang. Bij een toevoeging van waterdamp wordt immers energie onttrokken aan het gasmengsel waardoor dit zal afkoelen. Indien het gasmengsel onder het kookpunt van water komt, is de hoeveel waterdamp die zich in de lucht kan bevinden beperkt, zeker bij omgevingstemperaturen. Dit betekent dat het niet realistisch is te verwachten dat bij waterdamp het inertiseringspunt (IP) en de LOC-waarde bij omgevingstemperatuur en omgevingsdruk bereikt kunnen worden. Alleen verdunning van het brandbare mengsel kan dan tot inertisering leiden.

5 Conclusie en discussie

5.1 Beantwoording onderzoeksvraag

In deze paragraaf wordt de hoofdvraag beantwoord. De hoofdvraag van dit onderzoek luidde:

Kan door het inbrengen van water (stoom of nevel), of stikstof in een rookgaslaag een rookgasontbranding (inertisering) worden voorkomen?

Op basis van de uitgevoerde experimenten kan geconcludeerd worden dat, in overeenstemming met gevonden waarden uit internationale literatuur, zowel met stikstof als verdunningsgas als met waterdamp als verdunningsgas een brandbaar gasmengsel (in deze experimenten propaan) geïnertiseerd kan worden en daarmee een rookgasontbranding voorkomen kan worden.

Deze inertisering kan op verschillende manieren bereikt worden. Op de eerste plaats kan het gasmengsel buiten de brandbaarheidsgrenzen (LFL-UFL) worden gebracht door toevoeging van inert gas.

Op de tweede plaats kan het inertiseringspunt worden bereikt (IP) doordat de brandbaarheidsgrenzen van het brandbare gasmengsel naar elkaar toe bewegen naar mate er meer inert gas wordt toegevoegd. Na het IP kan de vlam zichzelf niet onderhouden en vindt er geen ontbranding plaats.

Ten slotte kan bij verdere verdunning het zuurstofpercentage onder de LOC-waarde komen waardoor ontbranding niet meer mogelijk is.

Uit de testen is niet altijd duidelijk gebleken wat het maatgevende mechanisme is geweest. In de meeste situaties is er waarschijnlijk sprake van een combinatie van mechanismen.

Over het gebruik van waterdamp als verdunningsgas moet nog worden opgemerkt dat de temperatuur van het mengsel van belang is. Dit komt doordat bij toevoeging van waterdamp energie onttrokken wordt aan het gasmengsel waardoor het zal afkoelen. Indien het gasmengsel onder het kookpunt van water komt, is de hoeveel waterdamp die zich in de lucht kan bevinden beperkt, zeker bij omgevingstemperaturen. Dit betekent dat het niet realistisch is om te verwachten dat het inertiseringspunt (IP) en de LOC-waarde bij omgevingstemperatuur en omgevingsdruk bereikt kunnen worden. Alleen verdunning van het brandbare mengsel kan dan tot inertisering leiden.

5.2 Discussie

De experimenten zijn uitgevoerd met propaan als brandbaar gas; de berekeningen en conclusies zijn dan ook gebaseerd op de eigenschappen van propaan. Dit maakt een directe vertaling van de resultaten uit deze experimenten naar de praktijk niet eenvoudig. In de praktijk kunnen een groot aantal verschillende gassen aanwezig zijn die ieder hun specifieke eigenschappen hebben op het gebied van brandbaarheidsgrenzen, IP en LOC-waarde.

Koolmonoxide en methaan zijn veel voorkomende gassen in de rookgassen in de brandruimte. Koolmonoxide heeft een relatief hoge onderste brandbaarheidsgrens (12,5%) en zal dus niet snel binnen de brandbaarheidsgrenzen aanwezig zijn. Indien het volumepercentage koolmonoxide in de rookgassen zich wel binnen de brandbaarheidsgrenzen bevindt, zal dit dichtbij de onderste brandbaarheidsgrens zijn. Dit betekent dat dit mengsel met het inbrengen van waterdamp relatief makkelijk te beïnvloeden is (verdunnen). Voor methaan geldt dit niet. De onderste explosiegrens ligt weliswaar hoger dan propaan (5% ten opzichte van 2,1%), echter is relatief laag. Dit maakt het inertiseren van een mengsel met methaan binnen de brandbaarheidsgrenzen door het inbrengen van waterdamp minder eenvoudig.

Dit kan ook gelden voor pyrolysegassen in de rookgassen. Indien er sprake is van synthetische brandstoffen zullen de pyrolyse gassen te vergelijken zijn met propaan. Deze gassen hebben een relatief lage onderste brandbaarheidsgrens, die zelf nog lager kan liggen dan propaan. Dit betekent dat deze gassen al bij lage volumepercentages tot ontbranding kunnen komen. Hierdoor is al snel meer waterdamp nodig om dergelijke mengsels te kunnen inertiseren, met name om voorbij het IP te komen.

Daarnaast zijn de experimenten uitgevoerd in een statische situatie. Hiermee wordt bedoeld dat er uitgegaan is van een begin samenstelling van het mengsel die alleen maar veranderd door het inbrengen van een inert gas. In de praktijk is er veelal sprake van een dynamische situatie waarbij de toevoer van rookgassen met daarin brandbare gassen continue blijft doorgaan. Dit betekent dat ook het gasmengsel continue verandert. Dit maakt het inertiseren van een gasmengsel nog ingewikkelder. De verwachting is dan ook dat in een dergelijke situatie veel meer water nodig is om een mengsel te inertiseren.

6 Duiding

Uit het voorliggende onderzoek blijkt dat het (theoretisch) mogelijk is om een rookgaslaag te inertiseren door het inbrengen van waterdamp. Echter in de praktijk is vaak niet duidelijk welke brandbare gassen in de rookgaslaag aanwezig zijn en welke eigenschappen (brandbaarheidsgrenzen, IP en LOC) deze gassen hebben. De vraag is dus wat betekent dit onderzoek nu voor de praktijk. Om hier nader op in te gaan wordt onderscheid gemaakt in drie onderdelen:

1. In hoeverre is rookgaskoeling ook inertisering
2. Voorkomen van rookgasexplosies
3. Het nut van rookgaskoeling?

6.1 In hoeverre is rookgaskoeling ook inertisering

De huidige methode van rookgaskoeling bestaat uit (korte) pulsen water in de rooklaag. In de basisprincipes brandbestrijding (Brandweeracademie, 2018) worden de volgende kengetallen als beperkingen genoemd voor rookgaskoeling: maximaal 70 m² en maximale hoogte 4 m. Dit betekent een maximaal volume van 280 m³. In het onderstaande voorbeeld wordt beoordeeld of met de pulsen een rooklaag geïnertiseerd kan worden.

Op basis van voorliggende rapport en de volgende uitgangspunten kan het volumepercentage waterdamp worden bepaald voor een dergelijk volume:

- > Het volume van de ruimte in liter bedraagt 280.000 l.
- > Om zeker te zijn dat inertisering optreedt wordt het IP aangehouden. Uit voorliggende onderzoek blijkt dat het IP van waterdamp ongeveer 42 % bedraagt.
- > 42% van 280.000 liter is 117600 liter
- > In dit voorbeeld wordt uitgegaan van een temperatuur van de rookgaslaag van 400 °C.
- > Op basis van de ideale gaswet bedraagt het volume van 1 liter water na omzetting naar stoom ongeveer 3065 l (omgevingsdruk, temperatuur 400 °C, hoeveelheid gas in mol/l; waterdamp 55,6 mol/l en een gasconstante 0,082057338 l.atm/K.mol)
- > Het volume van 1 liter water wordt na omzetting naar stoom ongeveer 3065 liter waterdamp bij 400 °C (ideale gaswet).
- > Uitgangspunt is dat ongeveer 50 % van het water verdampt dat wordt ingebracht. Dit komt dus neer op een efficiëntie van 50 %.

Dit betekent dat voor het inertiseren van 280 m³ rookgassen ongeveer 77 liter water (117600/3065 x 50%) nodig is. In de huidige methode van rookgaskoeling met korte pulsen (enkele seconden) wordt dit met hoge druk (125 l/min. = ongeveer 2,08 l/s) pas na 37 seconden (77/2,08) en bij lage druk 450 l/min. = 7,5 l/s) na ongeveer 11 seconden (77/7,5) bereikt.

Een dergelijk voorbeeld kent natuurlijk allerlei aannames en onzekerheden, die van invloed zijn op de bovenstaande uitkomst:

- > De aard van de brandbare gassen en de temperatuur van de rookgaslaag zijn bepalend voor het inertiseringspunt (IP). Bij bijvoorbeeld langere of kortere koolstofketens zal er sprake zijn van een hoger of lager inertiseringspunt; bij een lagere temperatuur zal het inertiseringspunt afnemen.
- > Het voorbeeld gaat uit van een statische situatie, terwijl er, zoals reeds vermeld, in de praktijk meestal sprake is van een dynamische situatie waarin de verhouding van gassen continue verandert. Dit betekent ook dat er meer water nodig is.
- > De statische situatie geldt ook voor de temperatuur. Onder invloed van de toevoer van rookgassen vanuit de brandhaard kan de temperatuur stijgen, maar door koeling middels het inbrengen van waterdamp zal de temperatuur in de rookgaslaag dalen.
- > In de praktijk is vaak niet duidelijk welke brandbare gassen in de rookgaslaag aanwezig zijn en welke eigenschappen (brandbaarheidsgrenzen, IP en LOC) deze hebben. Daarom wordt in het voorbeeld uitgegaan van het IP voor inertisering. Echter op basis van de andere eigenschappen (brandbaarheidsgrenzen en/of LOC) kan al eerder inertisering optreden.
- > Ook de hoeveelheid brandbare gassen is in de praktijk niet bekend. Het is dus niet duidelijk of er sprake is van een rijk of arm mengsel. Door toevoeging van water aan een rookgaslaag kan deze opgemengd worden met zuurstof waardoor de rookgaslaag, bij een te rijk mengsel, juist binnen de brandbaarheidsgrenzen wordt gebracht.
- > De efficiëntie voor omzetting van vloeibaar water naar stoom is niet bekend. Deze is situatieafhankelijk. Bijvoorbeeld de gebruikte techniek, de uitvoering (sproei patroon, hoek, waterdruppels) en de vakkbekwaamheid van de brandweermensen zijn hierbij van belang.

Het voorbeeld laat zien dat bij grote volumes relatief veel water nodig is om inertisering te bereiken. Bij kleinere volumes is het niet ondenkbaar dat op enig moment sprake kan zijn van inertisering. Dit moment is echter niet waarneembaar en meetbaar voor de brandweermensen ter plaatse. Dit betekent dat er in de praktijk dus niet vanuit gegaan kan worden. Rookgaskoeling is dus niet inertisering.

6.2 Voorkomen van rookgasexplosies

In de praktijk zijn er situaties waarbij rookgasontbrandingen en soms rookgasexplosies plaats vinden in nevenruimtes van de brandruimte. In deze situaties is veelal sprake van een ophoping van relatief koude pyrolysegassen in een ruimte die niet in direct contact staat met de brand in de brandruimte. Doordat de pyrolysegassen relatief koud zijn lijkt het inbrengen van water in deze rookgaslaag niet of nauwelijks zinvol. Zeker bij een lage temperatuur van de rookgaslaag is inertisering niet haalbaar. Immers: bij temperaturen dicht rond het kookpunt van water zal er onvoldoende waterdamp gecreëerd kunnen worden voor inertisering. Daarnaast bestaat het risico dat bij een te rijk mengsel door opmenging van de rookgaslaag er juist een brandbaar mengsel zal ontstaan. Zeker voor gassen met een lage onderste en een lage bovenste brandbaarheidsgrens (bijvoorbeeld bitumen en styreen) bestaat al snel het risico op een ontbranding. Omdat het niet of nauwelijks waarneembaar of meetbaar is dat de situatie verandert, bestaat het risico dat tijdens een dergelijke inzet er een ontbranding plaatsvindt.

6.3 Het nut van rookgaskoeling?

In de voorgaande paragrafen is mogelijk de suggestie gewekt dat rookgaskoeling niet zinvol zou zijn. Het tegendeel is echter waar. Het is nog steeds zeer zinvol om de rookgassen te koelen bij het vorderen naar de brandhaard. Echter zoals de beschrijving van de techniek al aangeeft, gaat het om het koelen van de rookgassen. Door het koelen van de rookgassen kan (tijdelijk) worden voorkomen dat een brandbaar mengsel de zelfontbrandingstemperatuur bereikt. Daarnaast is het een goede manier om de directe omgeving van de straalpijpvoerder veiliger te maken. De rookgaslaag wordt (tijdelijk) gekoeld waardoor het risico een hoge hittebelasting afneemt.

Echter een ontbranding van een gasmengsel blijft nog steeds mogelijk. Er kan dus niet vanuit worden gegaan dat met de huidige methode van rookgaskoeling een ontbranding wordt voorkomen. De techniek waarmee effectieve koeling en het vorderen naar de brandhaard kan worden bereikt zijn onderdeel van aanvullende onderzoek.

6.4 Samenvattend

Op basis van de uitgevoerde experimenten is inertisering in de praktijk op enig moment niet ondenkbaar. Het optreden daarvan is echter niet waarneembaar en meetbaar voor de brandweermensen ter plaatse. Dit betekent dat er in de praktijk dus **niet** vanuit gegaan kan worden. In de praktijk dient er dus altijd rekeningen gehouden te worden met de mogelijkheid van een ontbranding van rookgassen ongeacht of er rookgaskoeling is toegepast.

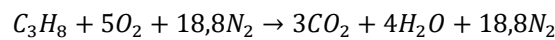
Literatuur

- Abdelkhalik, A. et al. (2016). Explosion regions of propane, isopropanol, acetone, and methyl acetate/inert gas/air mixtures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 43, 669-675.
- Brandweeracademie. (2013). *Verkoelende experimenten met water en schuim*. Arnhem: IFV.
- Brandweeracademie. (2018). *Hernieuwde kijk op brandbestrijding*. Arnhem: IFV.
- CHEMSAFE. (2009). CHEMSAFE database for Safety Characteristics. *Version 1.4.2*. BAM, PTB, DECHEMA-Germany.
- Giurcan, V., D. Razus, M. Mitu en V. Schröder (2013). *Limiting Oxygen Concentration and Minimum Inert Concentration of Fuel-air-inert Gaseous Mixtures Evaluation by means of Adiabatic Flame Temperatures and Measured Fuel-air Lower Flammability Limits*. Boekarest: REV.CHIM.
- Onderzoeksraad voor Veiligheid. (2009). *Brand, De Punt*. Onderzoeksrapport, Den Haag.
- Saito, N. en C. Liao. (2004). Suppression Effect of Water Vapor on Flammability Limits of Hydrocarbon Fuels - A Study on Fire Suppression by Water Mist-. *6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*, 17-20. Daegu.
- SFPE. (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition*. New York: Springer.
- Tonnaer, C. (2017). *Literatuuronderzoek rookgasontbranding*. Arnhem: IFV.
- Van den Schoor, F. (2007). *Influence of pressure and temperature on flammability limits of combustible gases in air*. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven.
- Wikipedia. (2019). Opgehaald van Flammability limit: https://en.wikipedia.org/wiki/Flammability_limit.
- Zabetakis, M.G. (1965). Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors. *U.S. Bureau of Mines Bulletin*, 627. Washington: U.S. Department of the Interior.

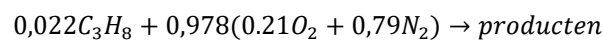
Bijlage 1 Kritische adiabatische vlamtemperatuur

Propan

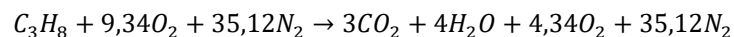
De kritische AFT kan worden bepaald op basis van de stoichiometrische oxidatiereactie van propaan:



Deze reactie geeft voor elke verbrande mol propaan 2044 kJ aan energie vrij (SFPE, 2016). Van propaan is bekend dat de onderste explosiegrens bij omgevingstemperatuur ongeveer 2,2% bedraagt. De oxidatiereactie kan bij een dergelijk mengsel als volgt worden weergegeven:



Door te delen door 0,022 kan de vergelijking als volgt worden weergegeven:



De vrijkomende energie gaat naar het verwarmen van de reactieproducten. Voor bovenstaande reactievergelijking is dat 3 mol koolstofdioxide, 4 mol waterdamp, 4,34 mol zuurstof en 35,12 mol stikstof voor elke verbrande mol propaan. De thermische warmtecapaciteit van deze reactieproducten kan worden berekend uit de thermische warmtecapaciteit van de individuele gassen. In de tabel is deze berekening weergegeven.

Thermische warmtecapaciteit van de reactieproducten van een verbranding van een propaan/lucht mengsel bij de onderste explosiegrens

	Aantal mollen	Thermische warmtecapaciteit bij 1000 °K	
		(J/mol.K)	(J/K)
CO ₂	3	54,3	162,9
H ₂ O	4	41,2	164,8
O ₂	4,34	34,9	151,5
N ₂	35,12	32,7	1.148,4
Totale thermische warmtecapaciteit = (per mol propaan)			1.627,6 J/K

^a De thermische warmtecapaciteit is temperatuurafhankelijk. De gebruikte 1000 graden K wordt gebruikt als gemiddelde.

Op basis van de vrijkomende energie bij de verbranding van één mol propaan kan de maximale temperatuurstijging worden bepaald:

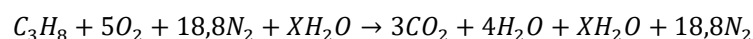
$$\Delta T = \frac{2044000}{1627,6} = 1256 \text{ K}$$

Uitgaande van een begin temperatuur van 298 K (25°C) betekent dit een AFT van 1554 K.

De kritische AFT kan ook worden gebruikt om bijvoorbeeld te bepalen bij welke samenstelling van een gas/luchtmengsel en een toegevoegd inert gas er geen ontbranding meer kan plaats vinden.

Waterdamp als inert gas

Bijvoorbeeld, in een ruimte is een stoichiometrisch propaan/luchtmengsel aanwezig. Om te voorkomen dat het gasmengsel tot ontbranding komt, wordt waterdamp als inert gas toegevoegd. Op basis van de kritische AFT kan het minimale volume percentage waterdamp berekend worden waarbij ontbranding voorkomen kan worden. In de reactievergelijking kan dat als volgt worden weergegeven:



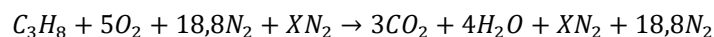
Hierin is X het aantal mollen waterdamp dat minimaal toegevoegd moet worden. Op basis van de tabel moet de totale warmtecapaciteit van het mengsel reactieproducten daarvoor hoger zijn dan 1627,6 J/K.

$$3CO_2 + (4 + X)H_2O + 18,8N_2 \rightarrow 3 \times 54,3 + 18,8 \times 32,7 + (4 + X) \times 41,2 = 1627,6 \rightarrow X = 16,6$$

Dit betekent dat 16,6 mol waterdamp nodig is bij 23,8 (5 + 18,8) mol lucht om het gasmengsel inert te maken. Dit komt overeen met volumepercentage van ongeveer 41%.

Stikstof als inert gas

Zoals in voorgaande voorbeeld is weergegeven kan op basis van de kritische AFT het minimale volume percentage inert gas berekend worden waarbij ontbranding voorkomen kan worden ongeacht de ontstekingsbron. In dit geval dus stikstof:



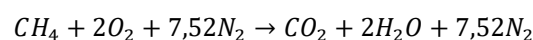
Hierin is X het aantal mollen stikstof dat minimaal toegevoegd moet worden. Op basis van tabel 4 moet de totale warmtecapaciteit van het mengsel reactieproducten daarvoor hoger zijn dan 1627,6 J/K.

$$3CO_2 + 4H_2O + (18,8 + X)N_2 \rightarrow 3 \times 54,3 + 4 \times 41,2 + (18,8 + X) \times 32,7 = 1627,6 \rightarrow X = 20,9$$

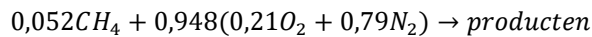
Dit betekent dat 20,9 mol stikstof nodig is bij 23,8 (5 + 18,8) mol lucht om het gasmengsel inert te maken. Dit komt overeen met volumepercentage van ongeveer 47%.

Methaan

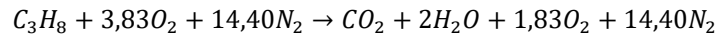
Bovenstaande uiteenzetting kan ook voor methaan worden uitgevoerd. De stoichiometrische oxidatiereactie van methaan kan als volgt worden weergegeven:



Deze reactie geeft voor elke verbrande mol methaan 800 kJ aan energie vrij. Van methaan is bekend dat de onderste explosiegrens bij omgevingstemperatuur ongeveer 5,2% bedraagt (SFPE, 2016). De oxidatiereactie kan bij een dergelijk mengsel als volgt worden weergegeven:



Door te delen door 0,052 kan de vergelijking als volgt worden weergegeven:



De vrijkomende energie gaat naar het verwarmen van de reactieproducten. Voor bovenstaande reactievergelijking is dat 1 mol koolstofdioxide, 2 mol waterdamp, 1,83 mol zuurstof en 14,40 mol stikstof voor elke verbrande mol methaan. De thermische warmtecapaciteit van deze reactieproducten kan worden berekend uit de thermische warmtecapaciteit van de individuele gassen. In tabel is deze berekening weergegeven.

Thermische warmtecapaciteit van de reactieproducten van een verbranding van een methaan/lucht mengsel bij de onderste explosiegrens

	Aantal mollen	Thermische warmtecapaciteit bij 1000 K	
		(J/mol.K)	(J/K)
CO ₂	1	54,3	54,3
H ₂ O	2	41,2	82,4
O ₂	1,83	34,9	63,87
N ₂	14,40	32,7	470,96
Totale thermische warmtecapaciteit = (per mol methaan)			671,52 J/K

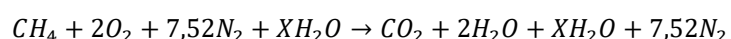
Op basis van de vrijkomende energie bij de verbranding van één mol methaan kan de maximale temperatuurstijging worden bepaald:

$$\Delta T = \frac{800000}{671,52} = 1191 \text{ K}$$

Uitgaande van een begin temperatuur van 298 K (25°C) betekent dit een AFT van 1489 K.

Waterdamp als inert gas

De reactievergelijking kan als volgt worden weergegeven:

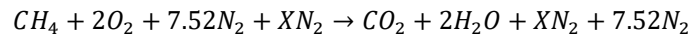


$$CO_2 + (2 + X)H_2O + 7,52N_2 \rightarrow 54,3 + 7,52 \times 32,7 + (2 + X) \times 41,2 = 671,5 \rightarrow X = 7,01$$

Dit betekent dat 7,01 mol waterdamp nodig is bij 9,52 (2 + 7,52) mol lucht om het gasmengsel inert te maken. Dit komt overeen met volumepercentage van ongeveer 42%.

Stikstof als inert gas

De reactievergelijking kan als volgt worden weergegeven:

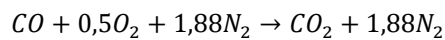


$$CO_2 + 2H_2O + (7.52 + X)N_2 \rightarrow 54.3 + 2 \times 41.2 + (7.52 + X) \times 32.7 = 671.5 \rightarrow X = 8.8$$

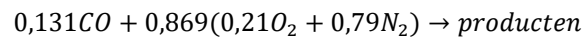
Dit betekent dat 8,8 mol stikstof nodig is bij 9,52 (2 + 7,52) mol lucht om het gasmengsel inert te maken. Dit komt overeen met volumepercentage van ongeveer 48%.

Koolstofmonoxide

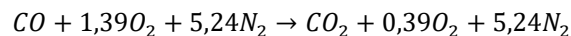
Bovenstaande uiteenzetting kan ook voor koolstofmonoxide worden uitgevoerd. De stoichiometrische oxidatiereactie van koolstofmonoxide kan als volgt worden weergegeven:



Deze reactie geeft voor elke verbrande mol koolstofmonoxide 283 kJ aan energie vrij. Van koolstofmonoxide is bekend dat de onderste explosiegrens bij omgevingstemperatuur ongeveer 13.1% bedraagt (SFPE, 2016). De oxidatiereactie kan bij een dergelijk mengsel als volgt worden weergegeven:



Door te delen door 0,131 kan de vergelijking als volgt worden weergegeven:



De vrijkomende energie gaat naar het verwarmen van de reactieproducten. Voor bovenstaande reactievergelijking is dat 1 mol koolstofdioxide, 0,39 mol zuurstof en 5,24 mol stikstof voor elke verbrande mol koolstof monoxide. De thermische warmtecapaciteit van deze reactieproducten kan worden berekend uit de thermische warmtecapaciteit van de individuele gassen. In tabel is deze berekening weergegeven.

Thermische warmtecapaciteit van de reactieproducten van een verbranding van een koolstofmonoxide/lucht mengsel bij de onderste explosiegrens

	Aantal mollen	Thermische warmtecapaciteit bij 1000 K	
		(J/mol.K)	(J/K)
CO ₂	1	54,3	54,3
H ₂ O	0	41,2	0
O ₂	0,39	34,9	13,72
N ₂	5,24	32,7	171,37
Totale thermische warmtecapaciteit = (per mol koolstofmonoxide)			239,38 J/K

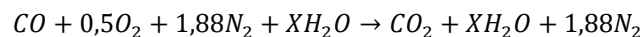
Op basis van de vrijkomende energie bij de verbranding van één mol propaan kan de maximale temperatuurstijging worden bepaald:

$$\Delta T = \frac{283000}{239,38} = 1182 \text{ K}$$

Uitgaande van een begin temperatuur van 298 K (25°C) betekent dit een AFT van 1480 K.

Waterdamp als inert gas

De reactievergelijking kan als volgt worden weergegeven:

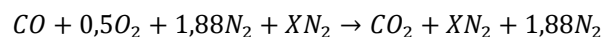


$$CO_2 + XH_2O + 1,88N_2 \rightarrow 54,3 + 1,88 \times 32,7 + X \times 41,2 = 239,38 \rightarrow X = 3,0$$

Dit betekent dat 3,0 mol waterdamp nodig is bij 2,38 (0,5 + 1,88) mol lucht om het gasmengsel inert te maken. Dit komt overeen met volumepercentage van ongeveer 56%.

Stikstof als inert gas

De reactievergelijking kan als volgt worden weergegeven:



$$CO_2 + (1,88 + X)N_2 \rightarrow 54,3 + (1,88 + X) \times 32,7 = 239,38 \rightarrow X = 3,78$$

Dit betekent dat 3,78 mol stikstof nodig is bij 2,38 (0,5 + 1,88) mol lucht om het gasmengsel inert te maken. Dit komt overeen met volumepercentage van ongeveer 61%.

Samenvattend

In onderstaande tabel is een samenvatting opgenomen van bovenstaande berekeningen.

Samenvattend kritische AFT en volumepercentages inert gas op basis van AFT en reactievergelijking

Gas	Kritische AFT [K]	Waterdamp [%]	Stikstof [%]
Propaan	1554	41	47
Methaan	1489	42	48
Koolstofmonoxide	1480	56	61

Zowel bij waterdamp als stikstof als inert gas worden bij koolstofmonoxide de hoogste waarden gevonden. In eerste instantie zou men dat misschien niet verwachten, omdat de verbrandingswarmte van koolstofmonoxide een factor 7 lager ligt dan die van propaan. Echter doordat de brandbaarheids grenzen van koolstofmonoxide ver uit elkaar liggen (LFL 12,5% en UFL 74%) is er veel inert gas nodig om het inertiseringspunt (IP) te bereiken. De stoichiometrische beginwaarde ligt voor koolstofmonoxide dan ook bij 34,8%, dit is in vergelijking tot propaan (3.8%) en methaan (9.6%).

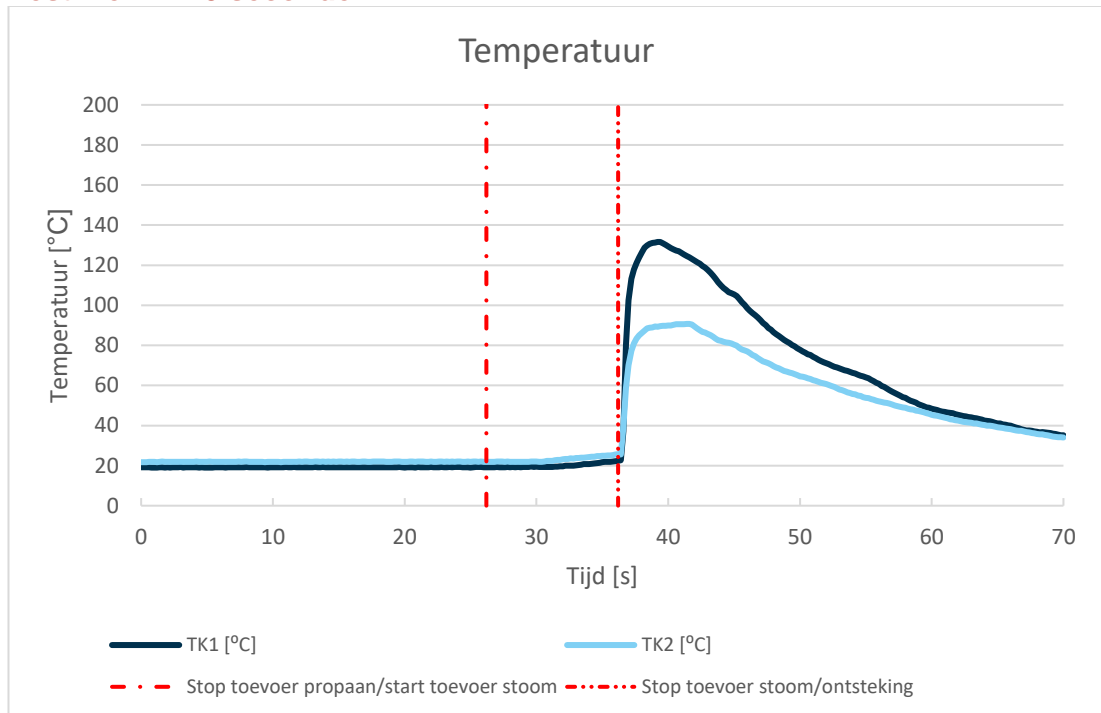
Bijlage 2 Experimenten met koude gassen

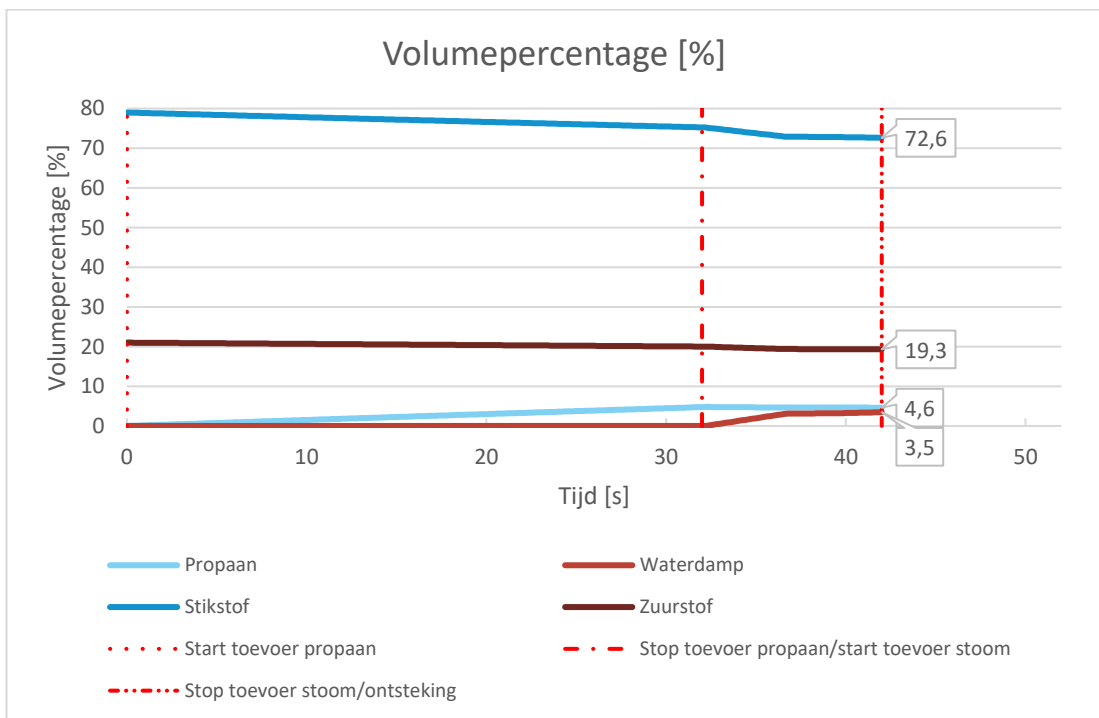
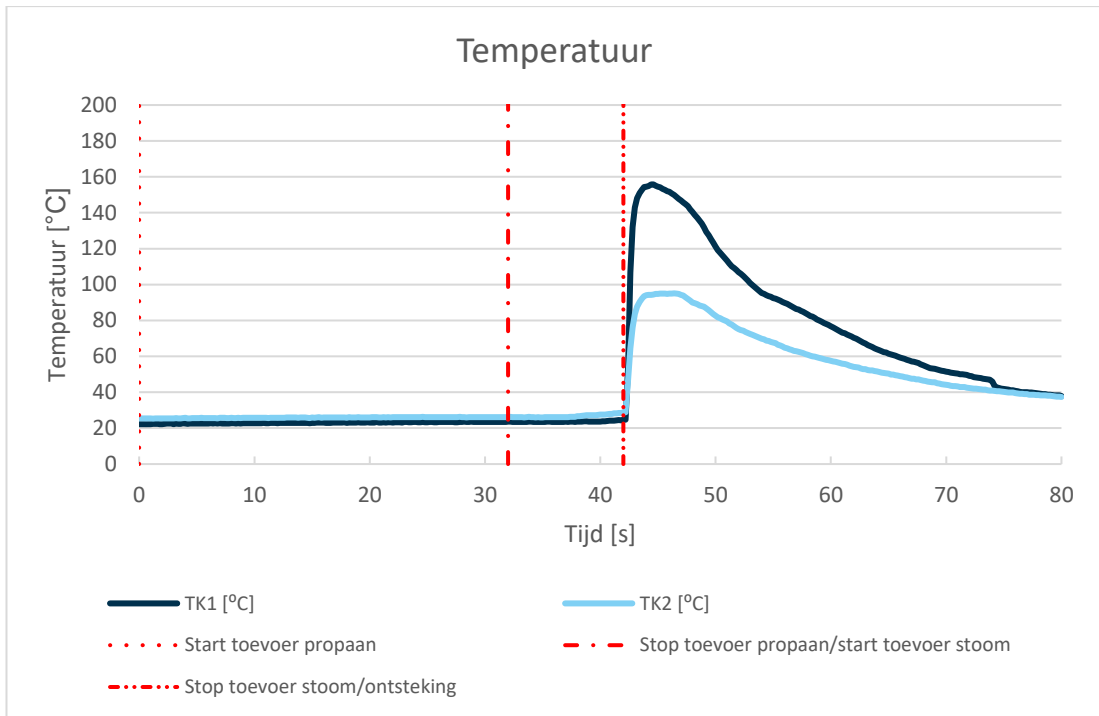
Algemeen

In deze bijlage zijn de uitgebreide resultaten van de experimenten met koude gassen weergegeven. Niet van alle experimenten kon een volumebalans worden opgesteld door het ontbreken van relevante gegevens.

Stoom

Test 1 en 2: 10 seconden





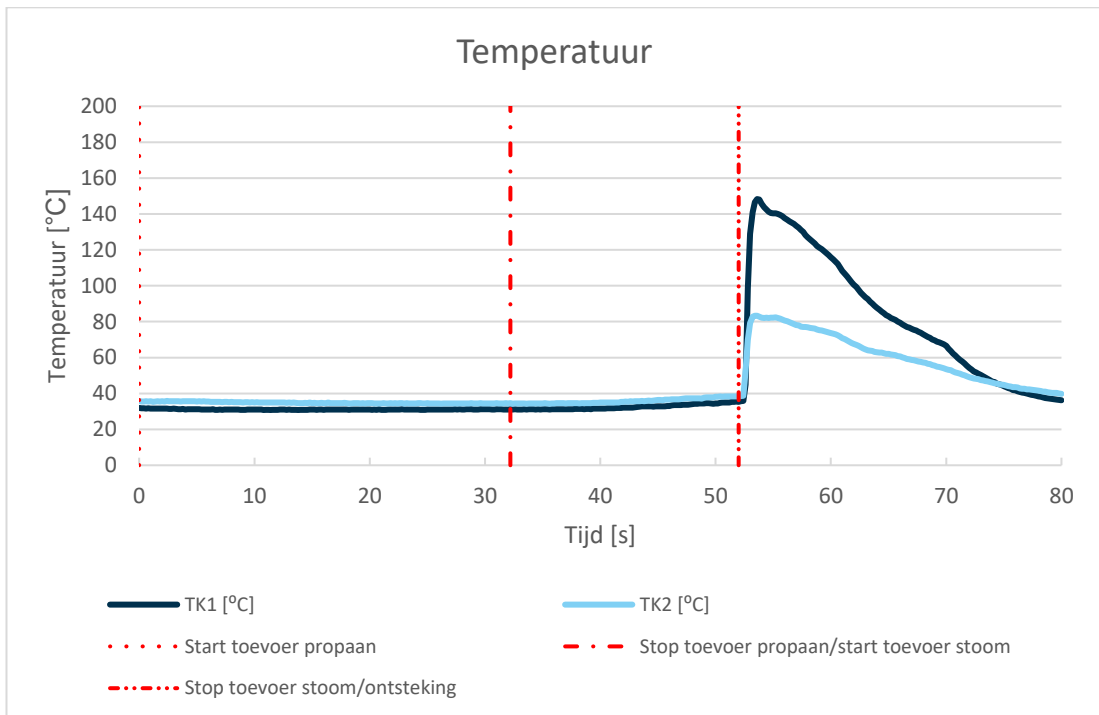
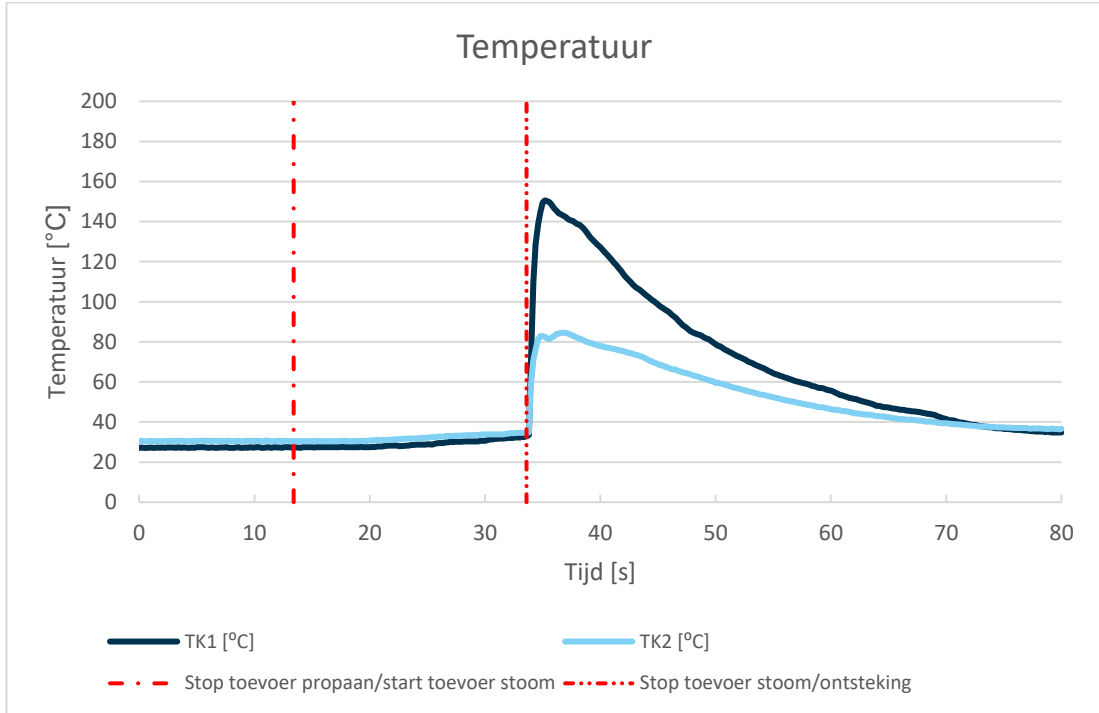
Test 1: Ontbranding bij 10 sec stoom

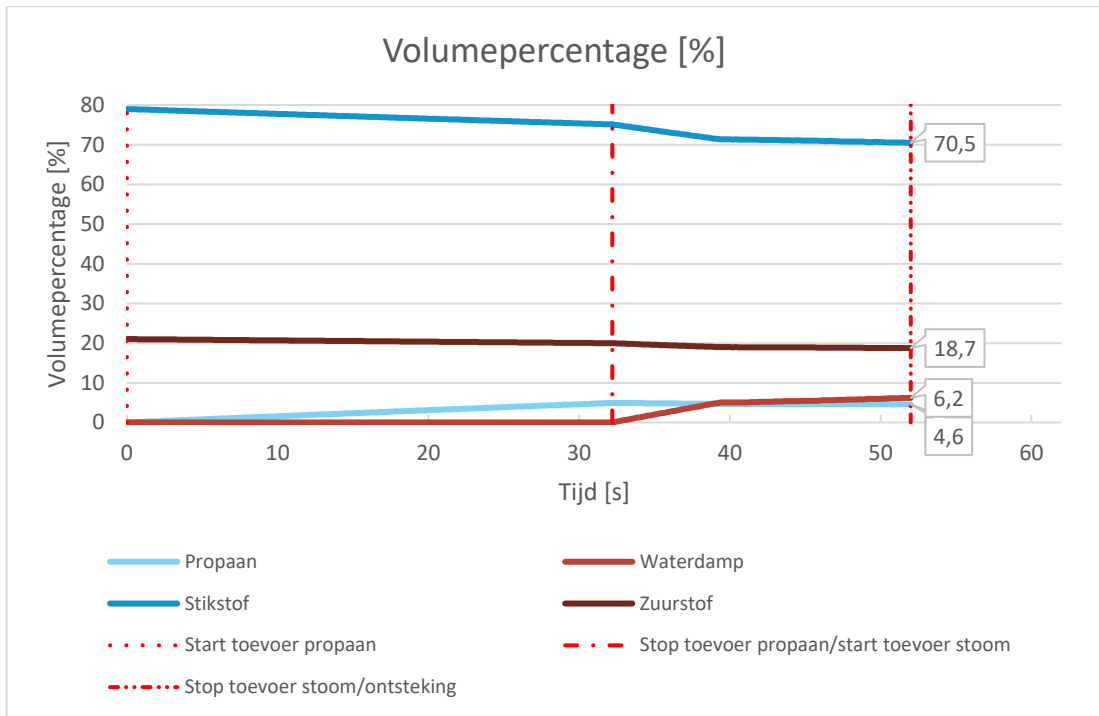


Test 2: Ontbranding bij 10 sec stoom



Test 3 en 4: 20 seconden





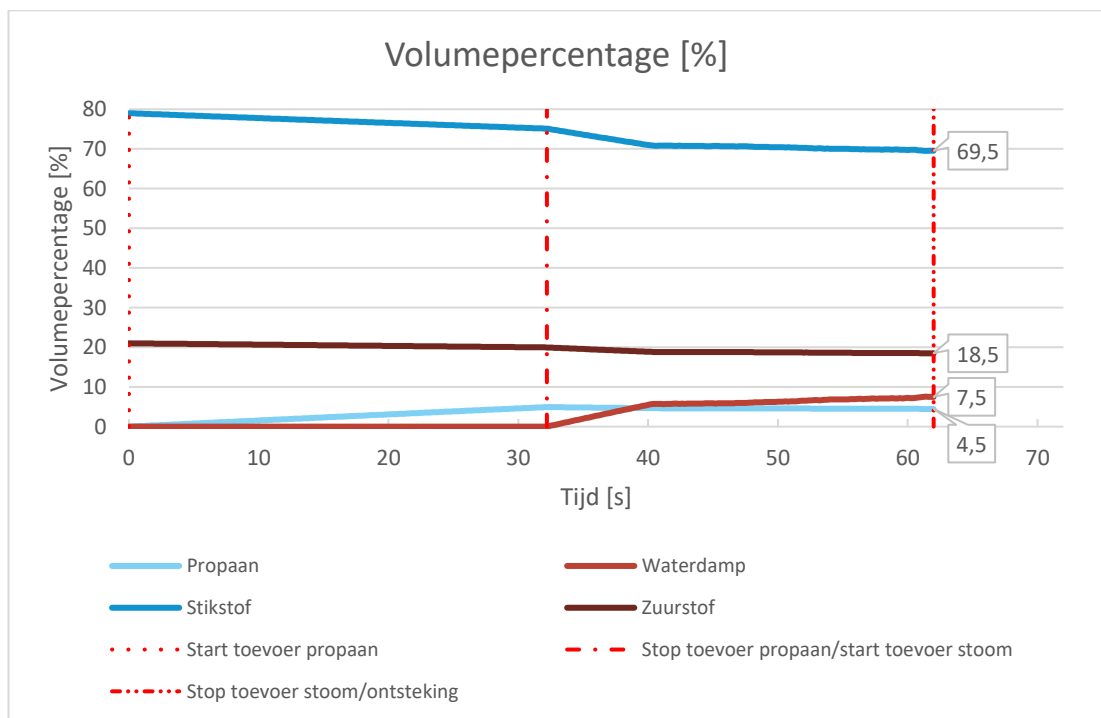
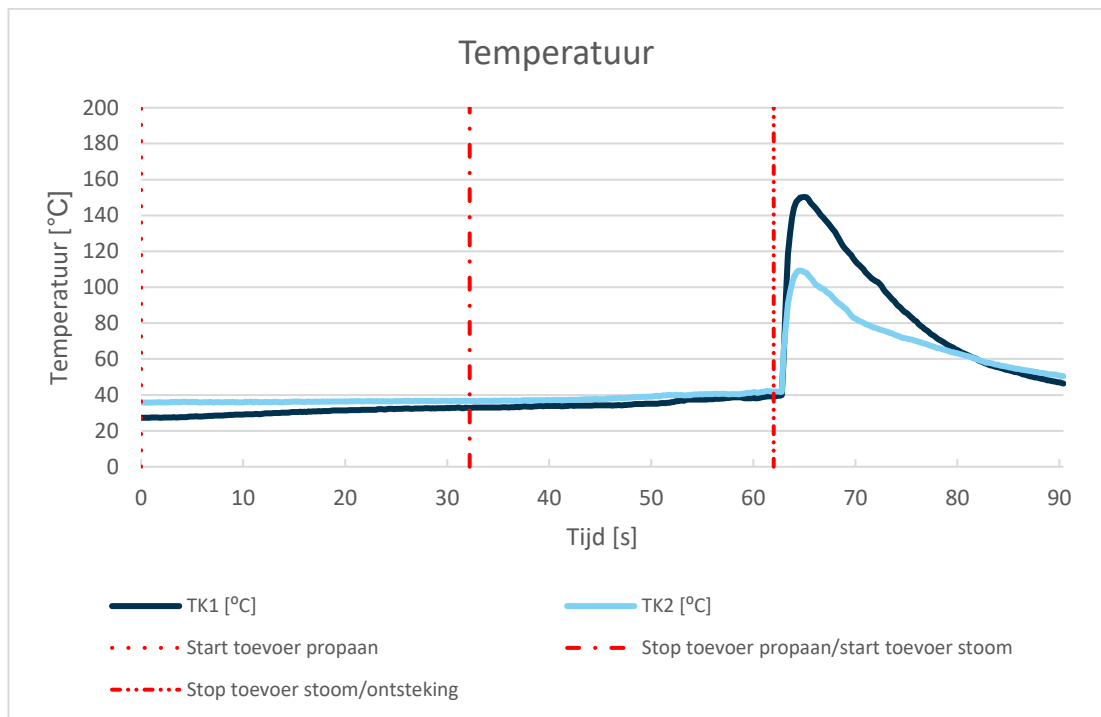
Test 3: Ontbranding bij 20 sec stoom

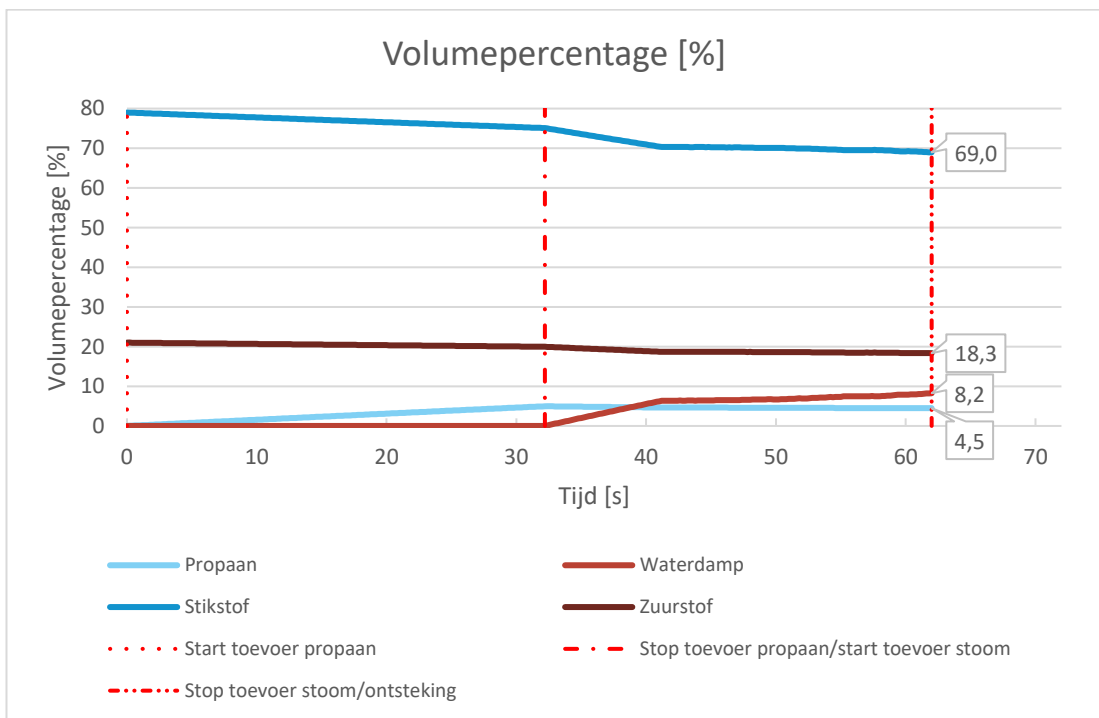
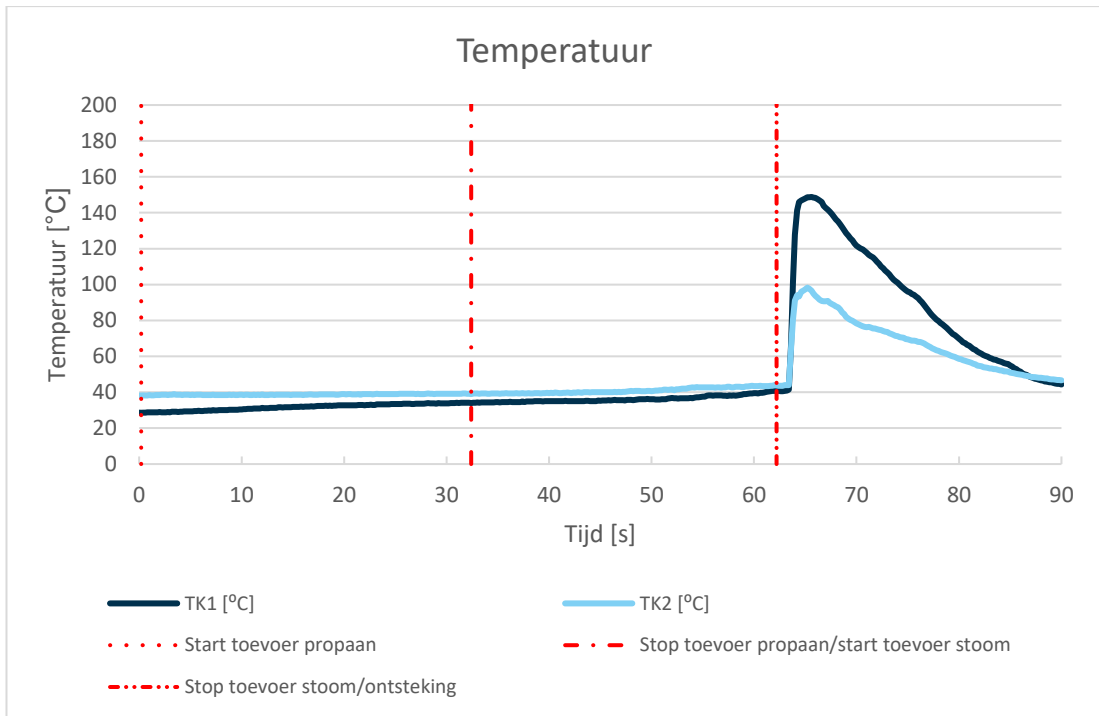


Test 4: Ontbranding bij 20 sec stoom



Test 5 en 6: 30 seconden

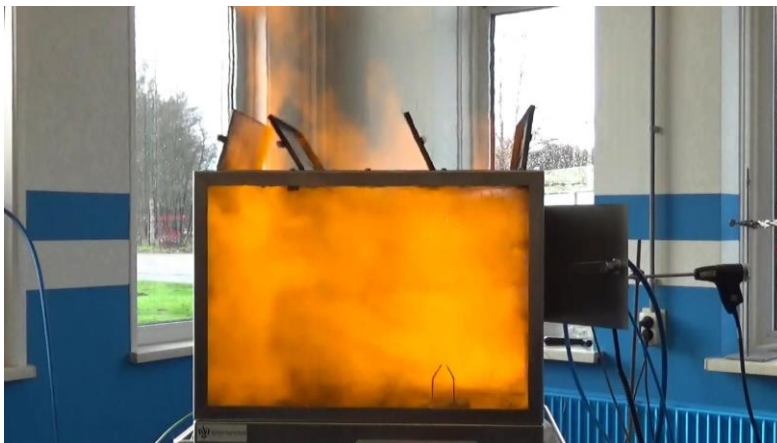




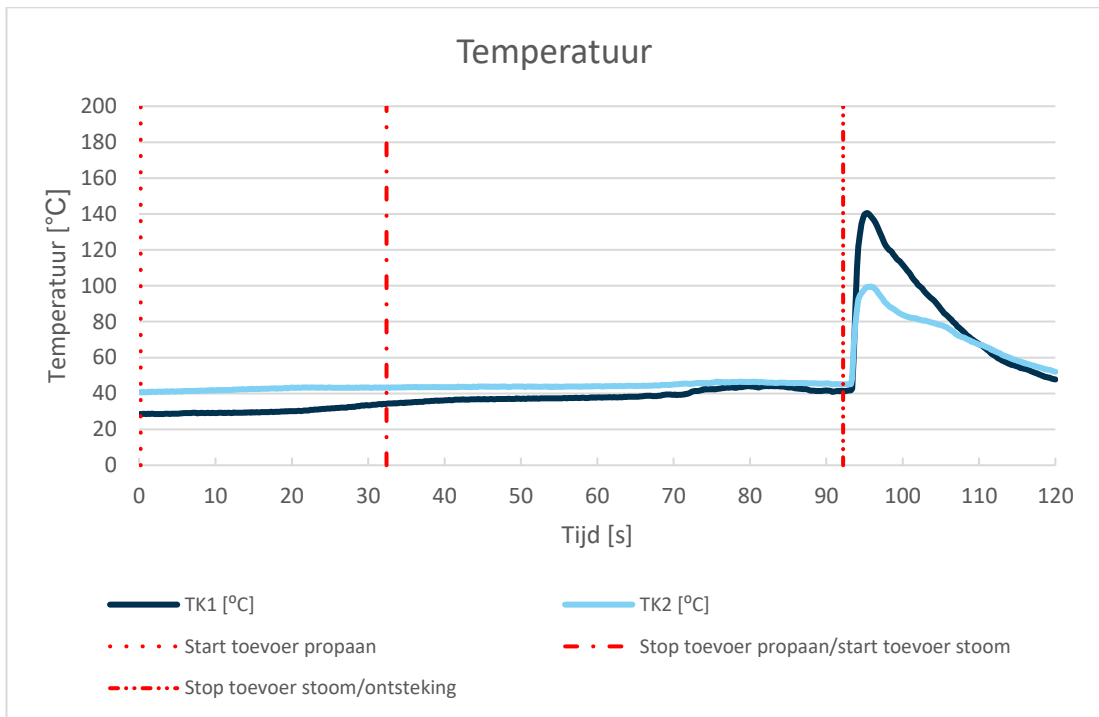
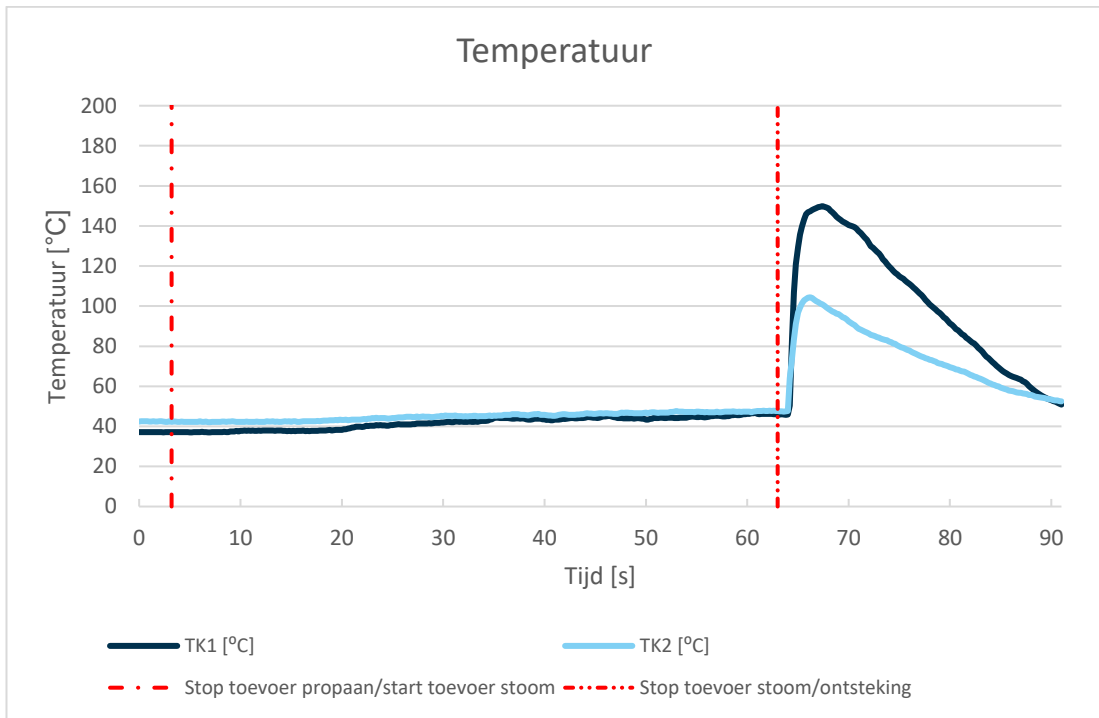
Test 5: Ontbranding bij 30 sec stoom

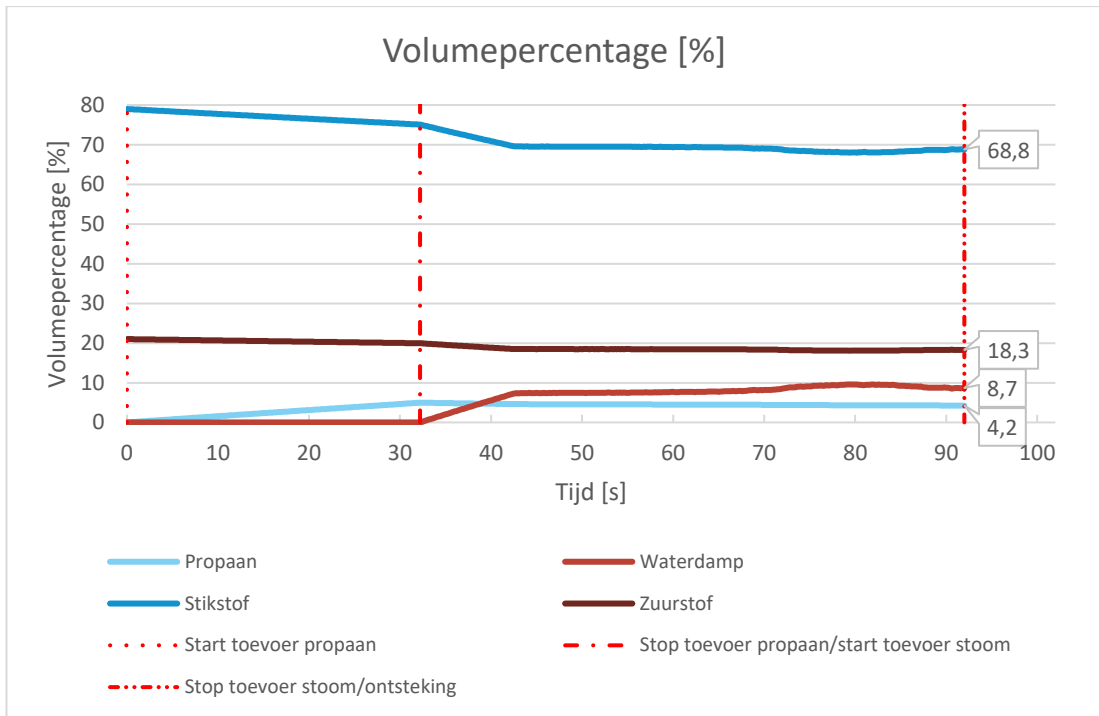


Test 6: Ontbranding bij 30 sec stoom



Test 7 en 8: 60 seconden





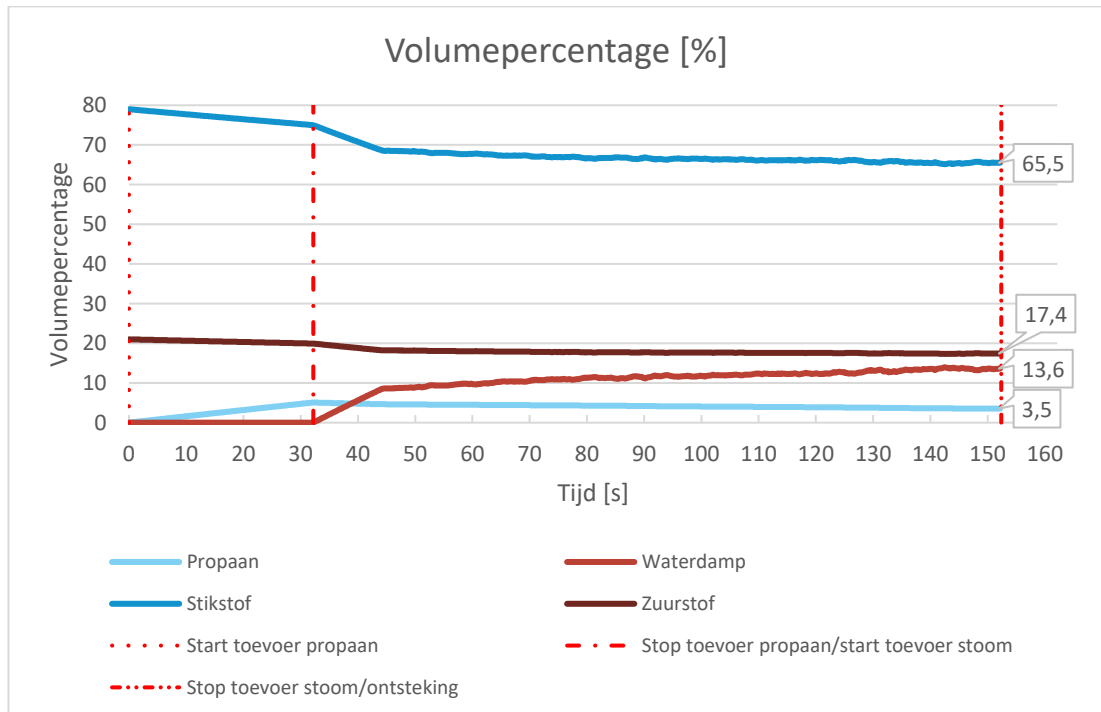
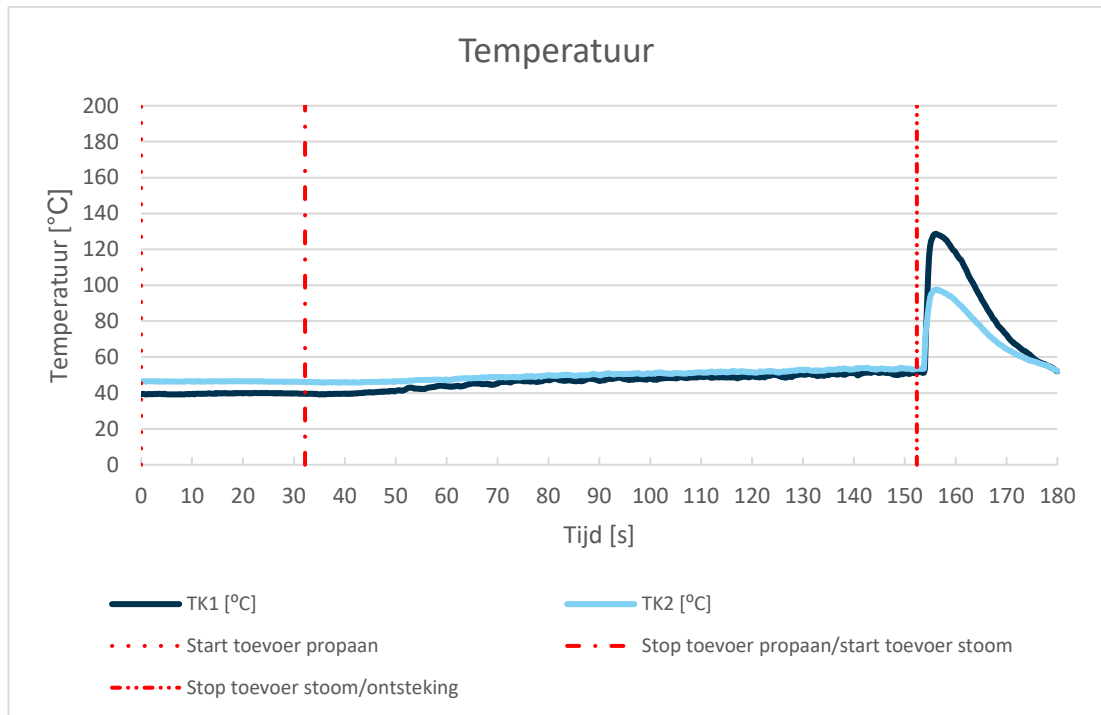
Test 7: Ontbranding bij 60 sec stoom

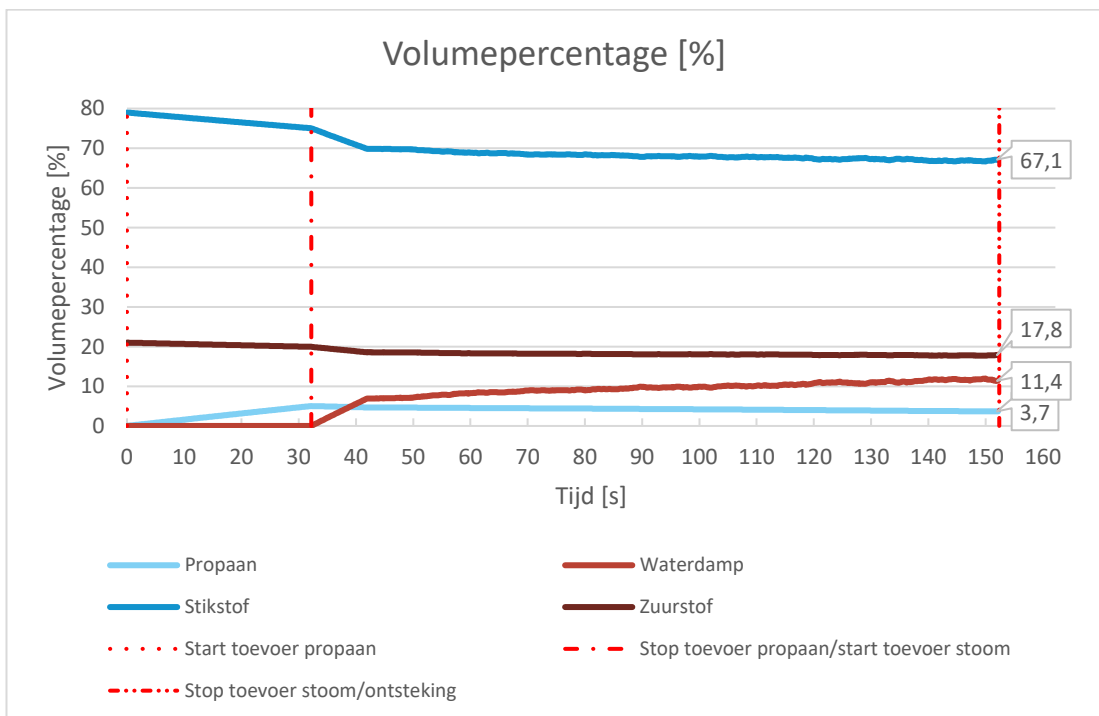
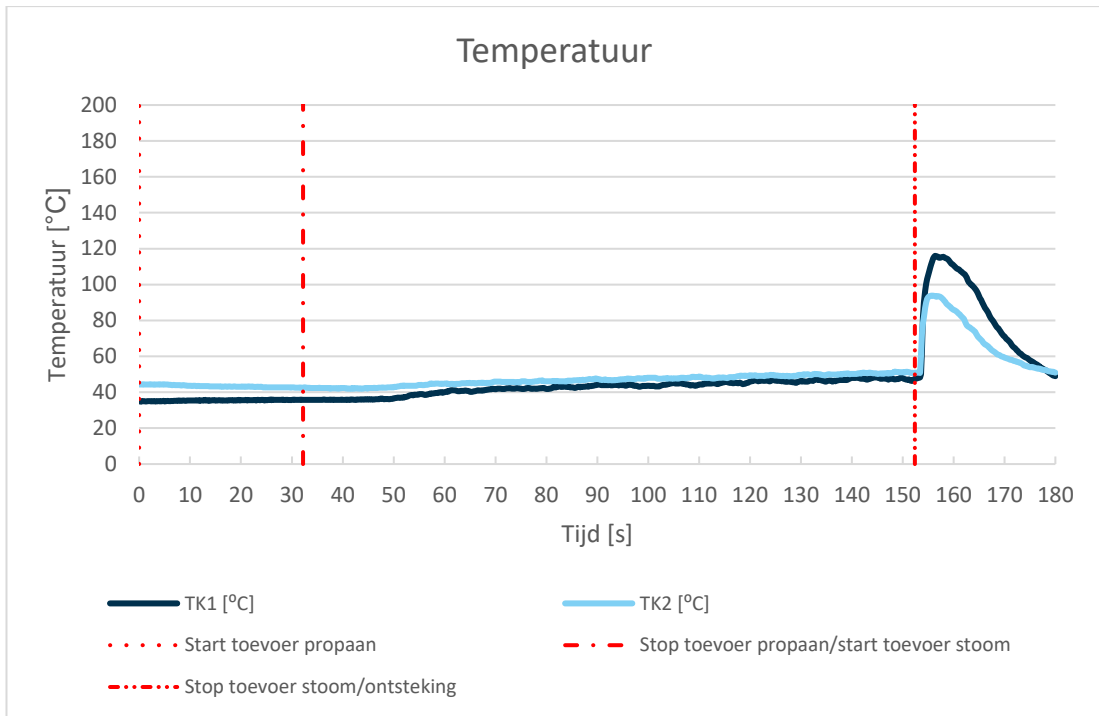


Test 8: Ontbranding bij 60 seconden stoom



Test 9 en 10: 120 seconden





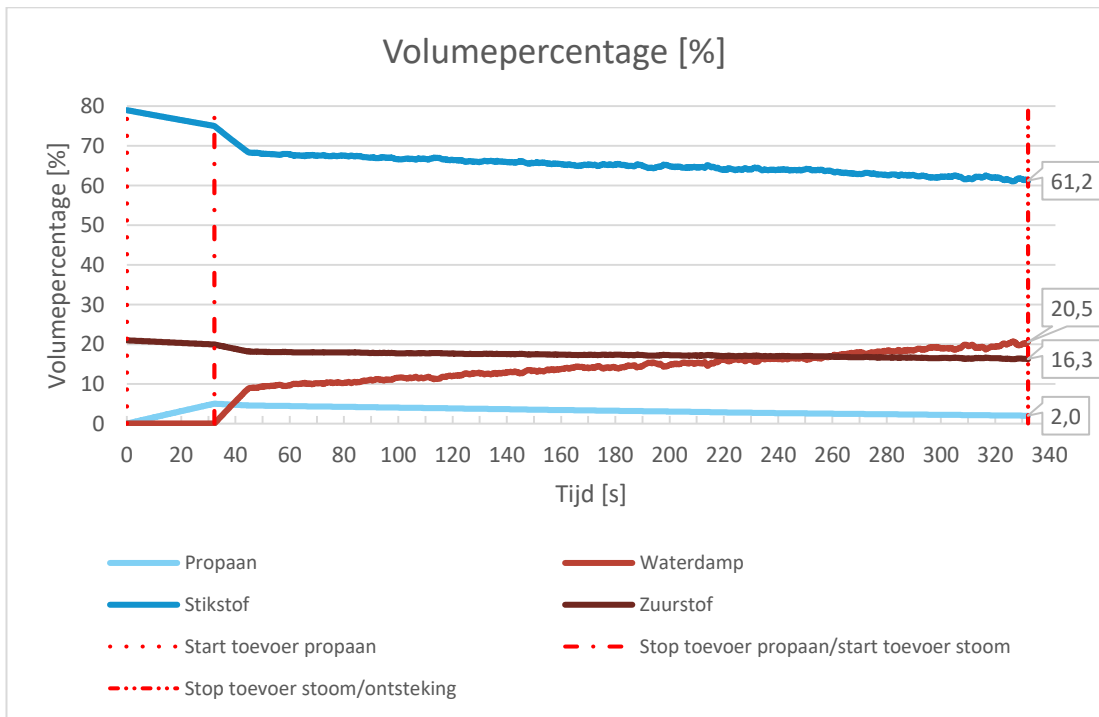
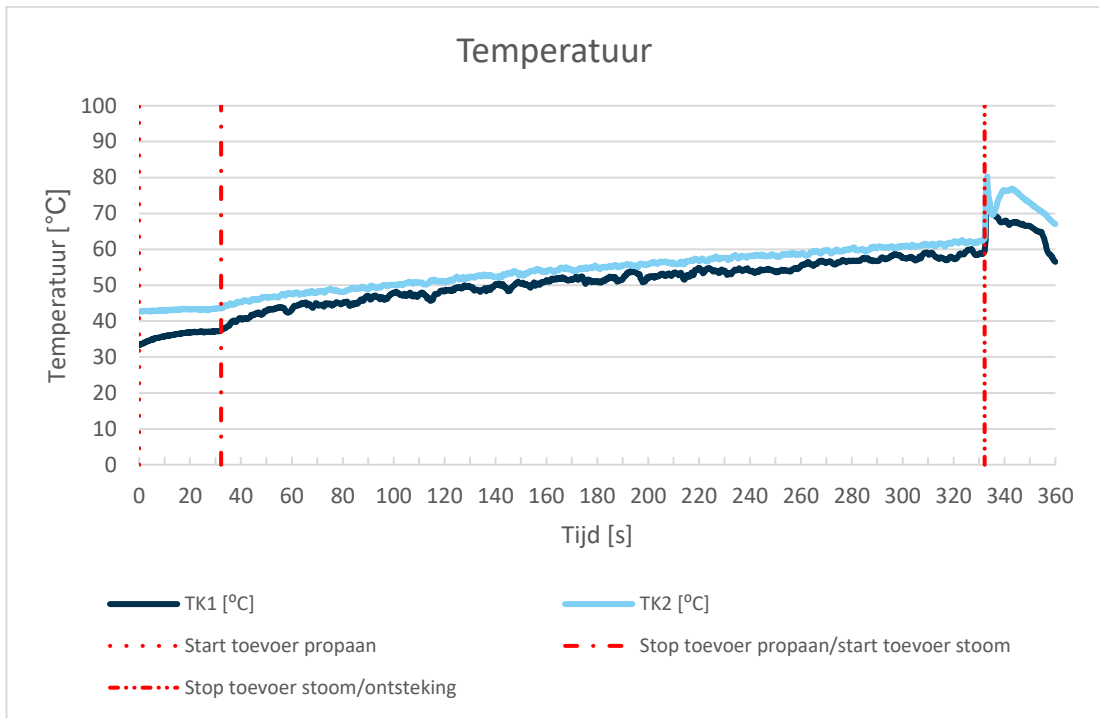
Test 9: Ontbranding bij 120 sec stoom

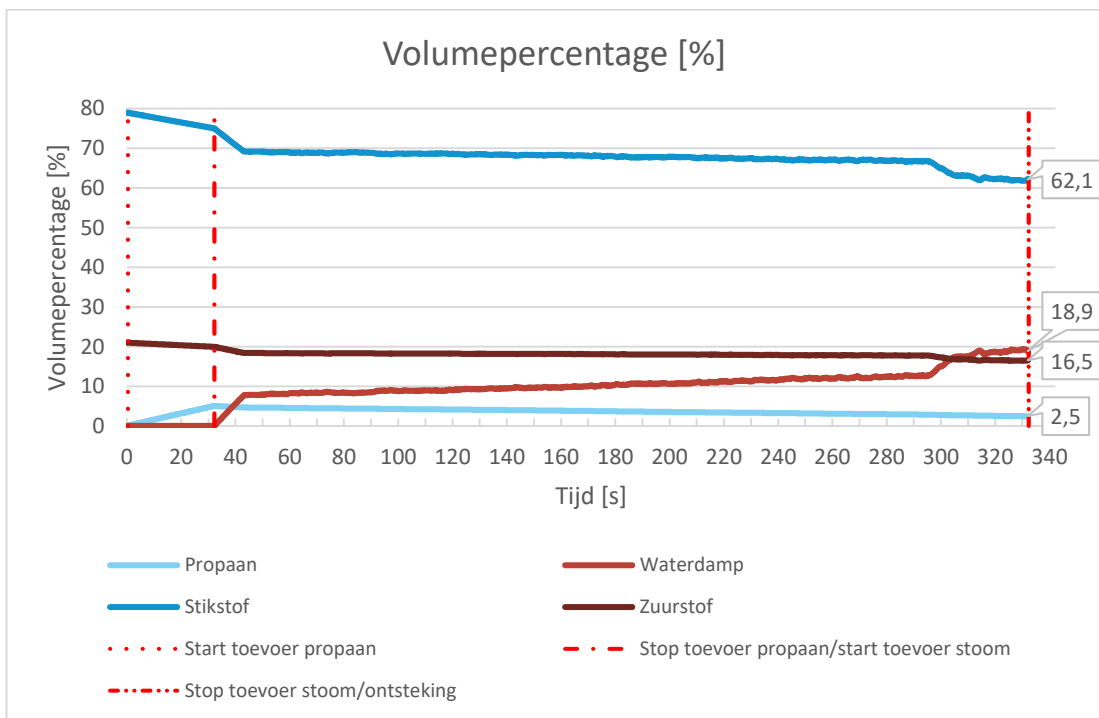
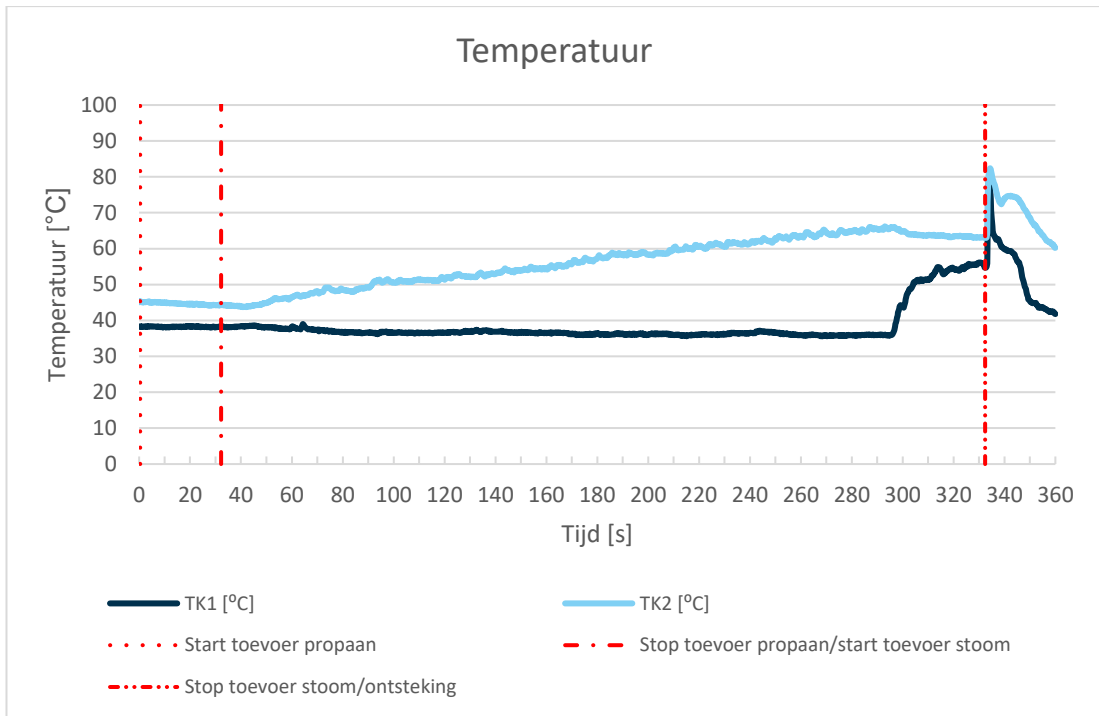


Test 10: Ontbranding bij 120 sec stoom



Test 11 en 12: 300 seconden





Test 11: Ontbranding bij 300 sec stoom



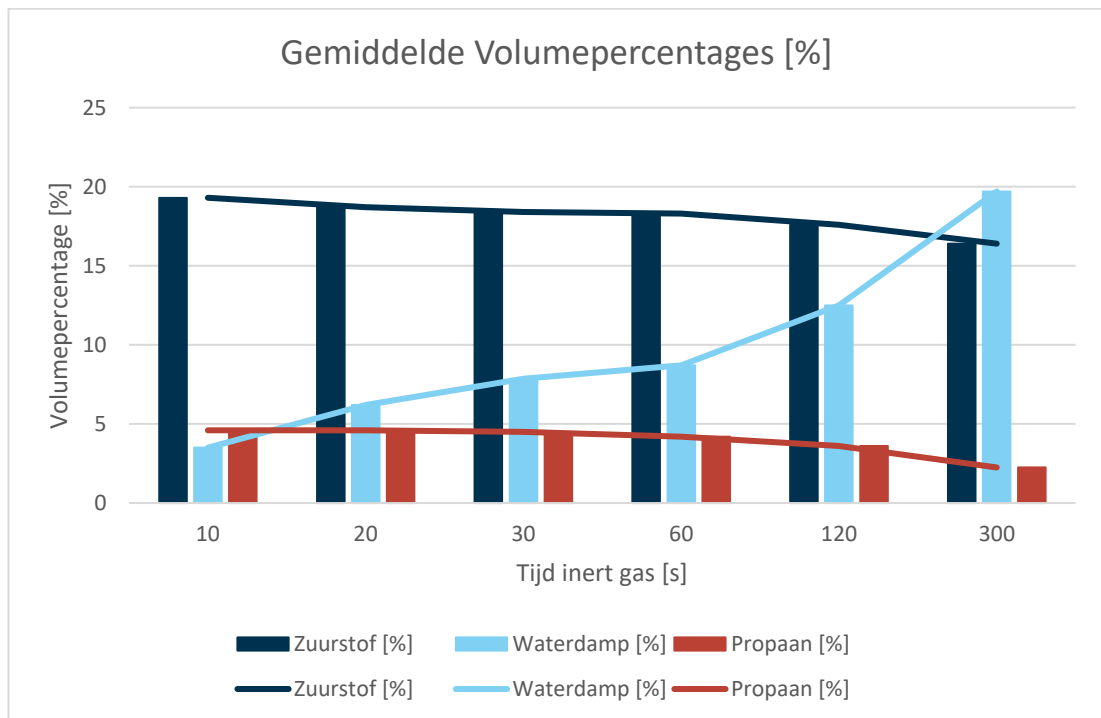
Test 12: Ontbranding bij 300 sec stoom

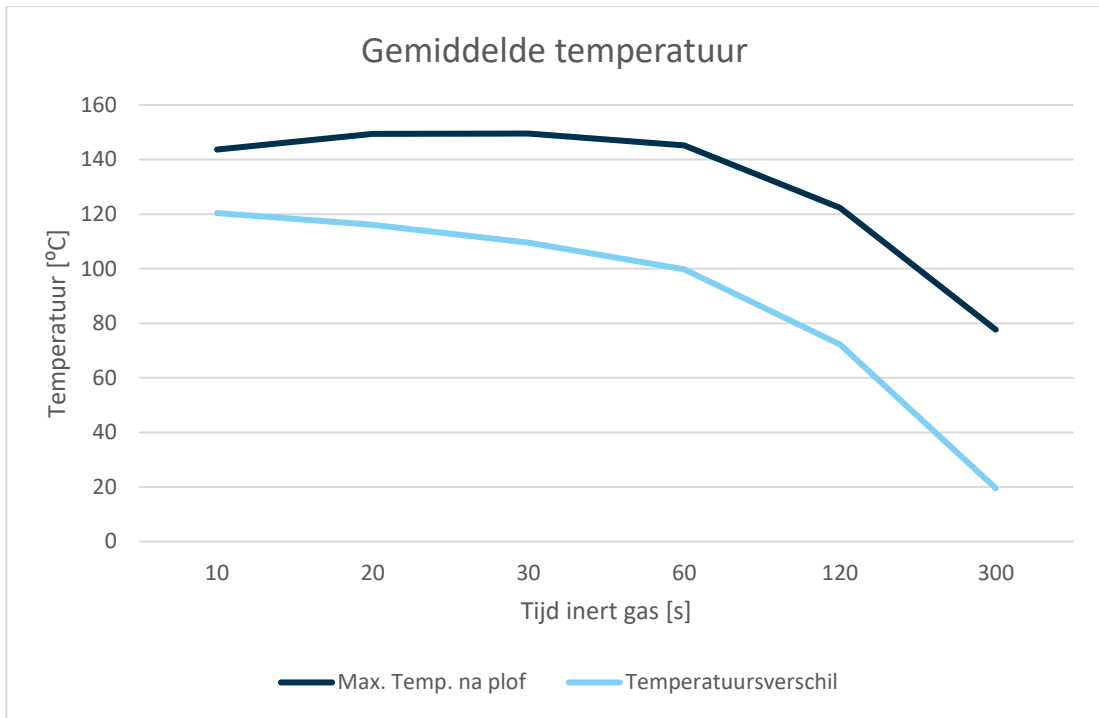


Samenvatting resultaten stoom koude gassen

Toevoertijd [s]	Volumepercentage [%]			Ontbranding [-]	Temperatuur [°C]	
	Zuurstof	Waterdamp	Propaan		Max. na plof	Verschil
10 *	19,3	3,5	4,6	Ja	144	120
20 *	18,7	6,2	4,6	Ja	149	116
30	18,4	7,9	4,5	Ja	150	110
60 *	18,3	8,7	4,2	Ja	145	100
120	17,6	12,5	3,6	Ja	122	72
300	16,4	19,7	2,3	Ja	78	20

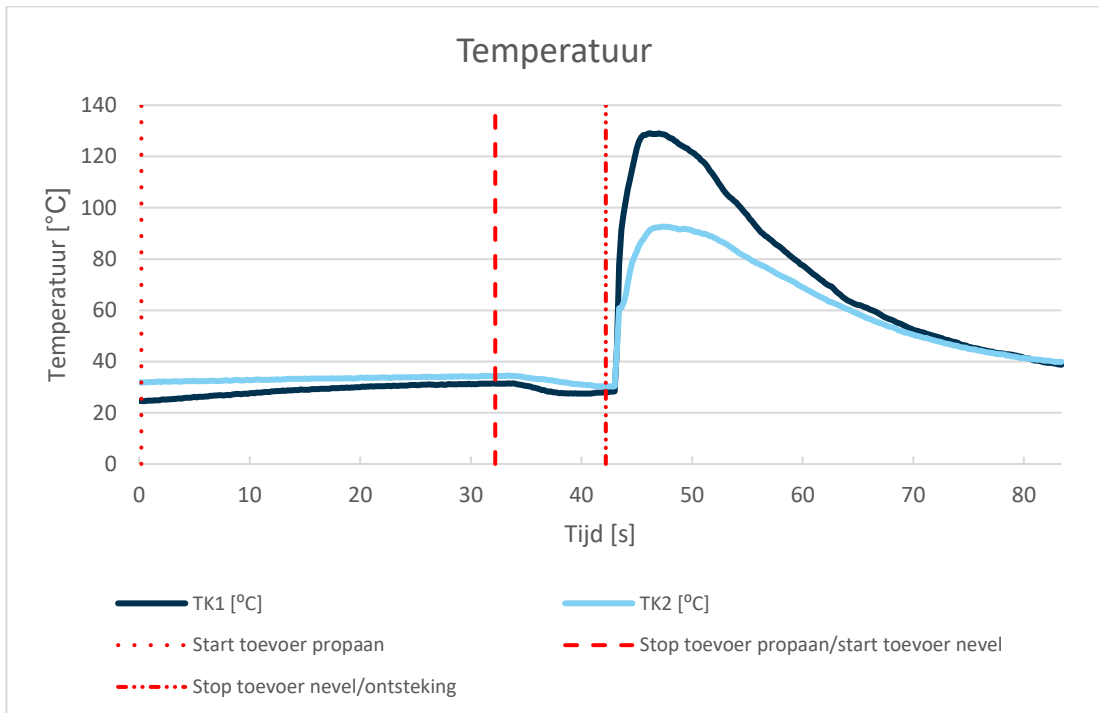
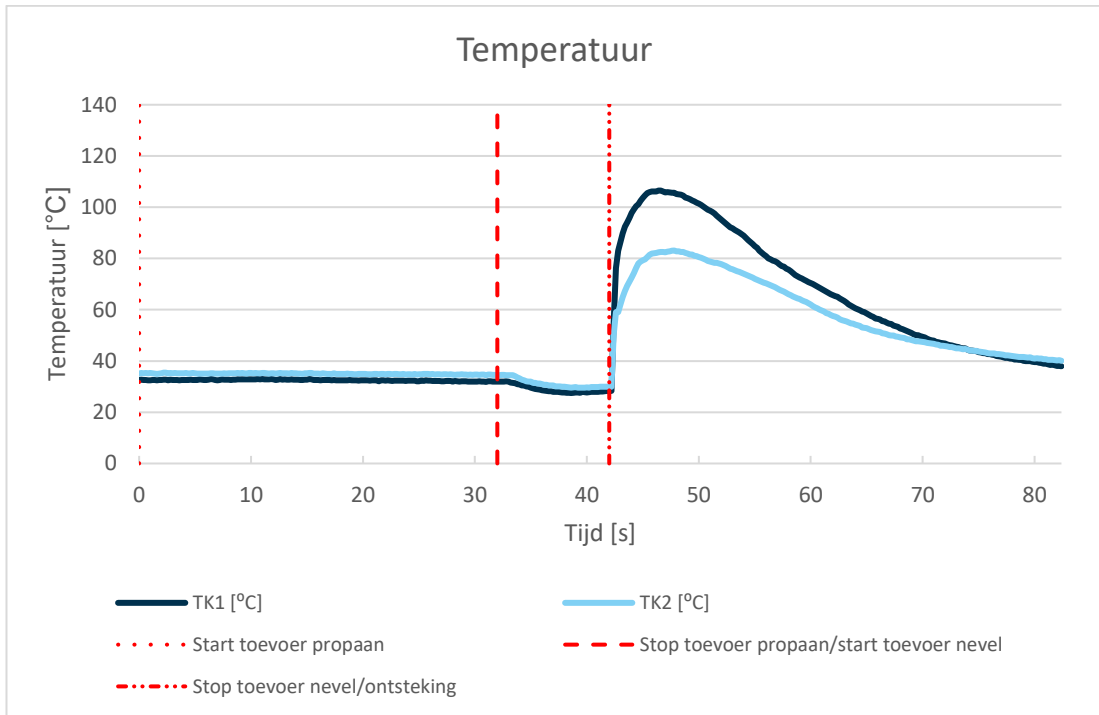
* Van deze experimenten kon de volumebalans maar voor één van de twee experimenten bepaald worden.





Nevel

Test 1 en 2: 10 seconden



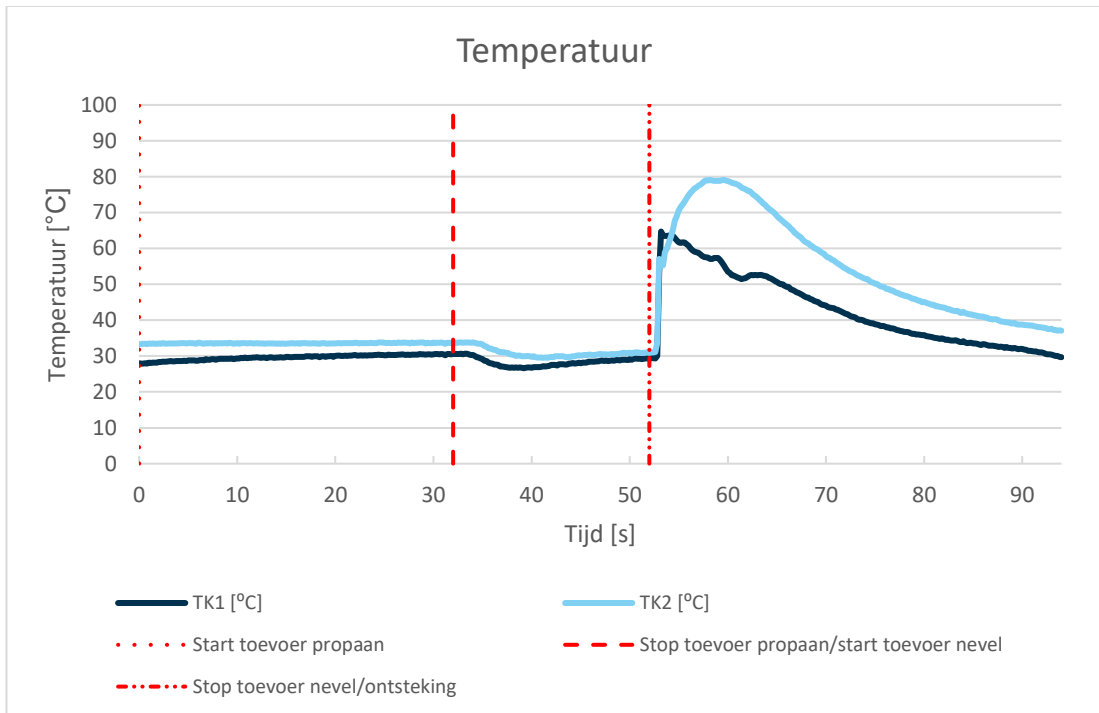
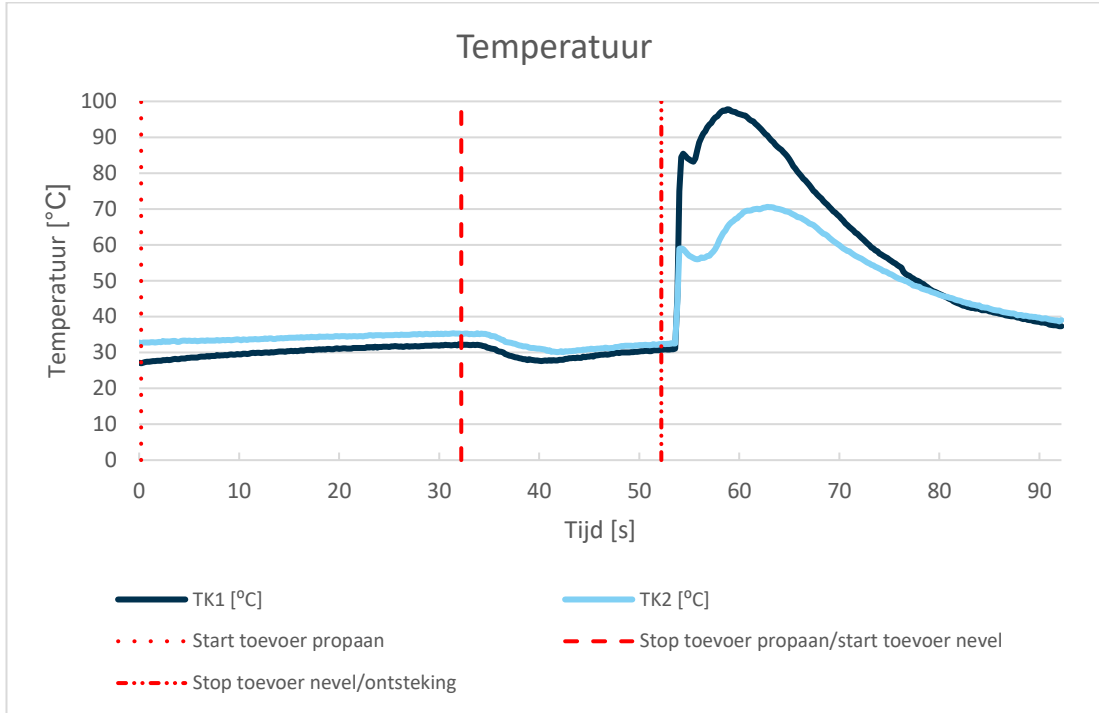
Test 1: Ontbranding bij 10 sec nevel



Test 2: Ontbranding bij 10 sec nevel



Test 3 en 4: 20 seconden



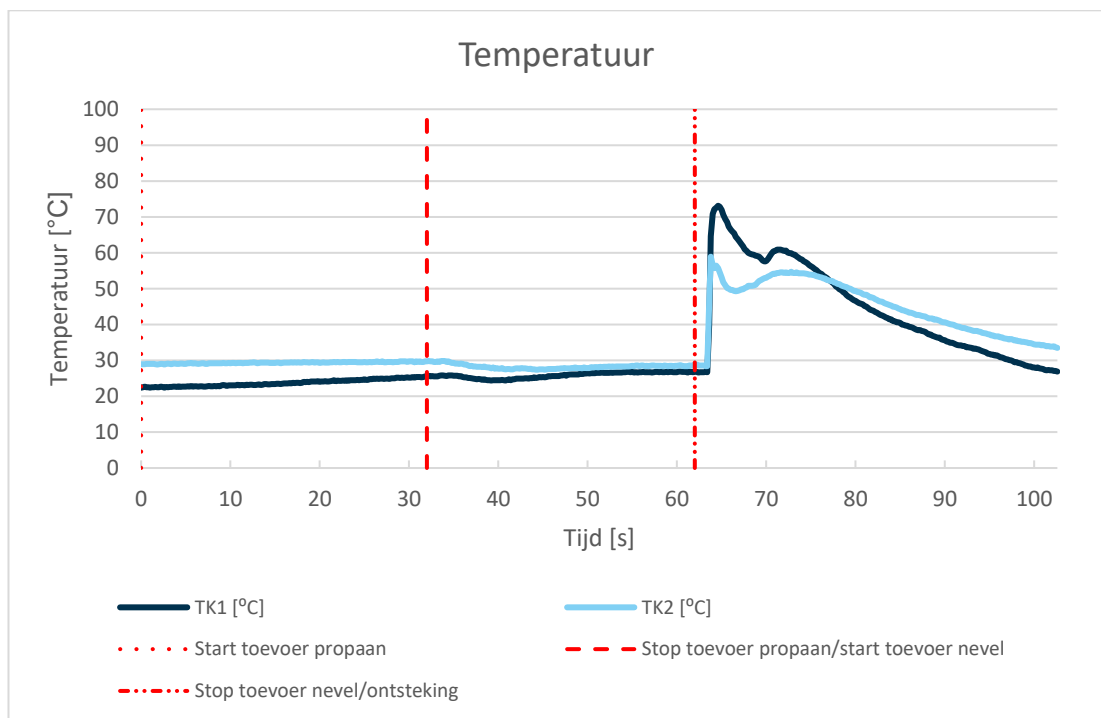
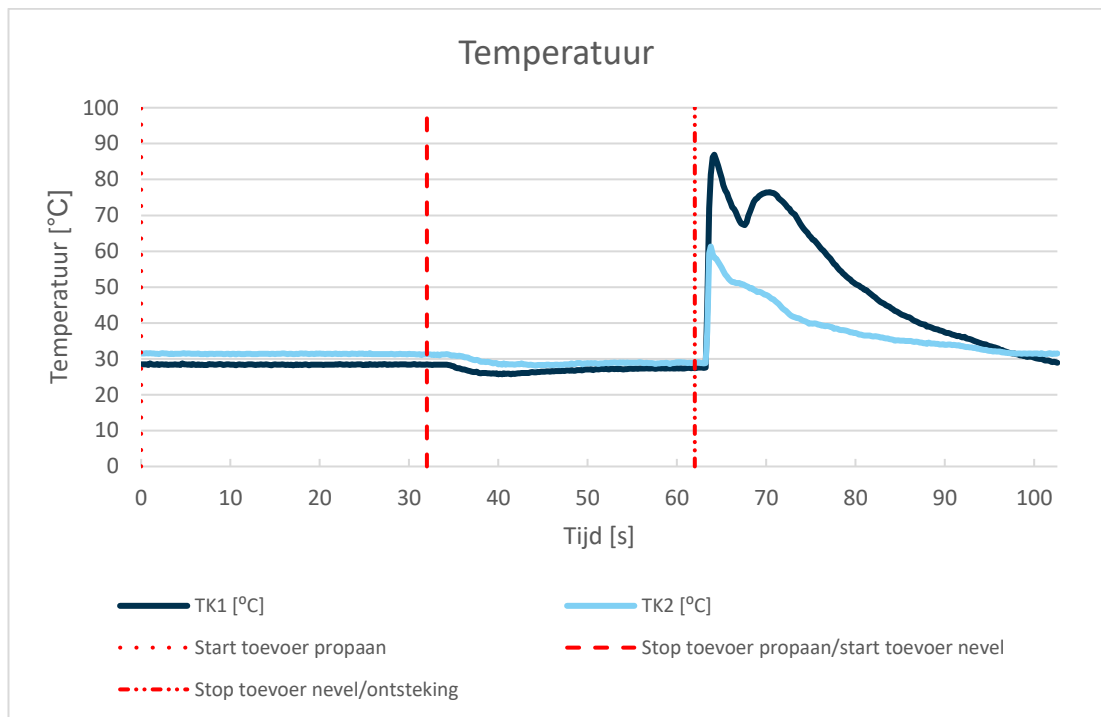
Test 3: Ontbranding bij 20 sec nevel



Test 4: Ontbranding bij 20 sec nevel



Test 5 en 6: 30 seconden



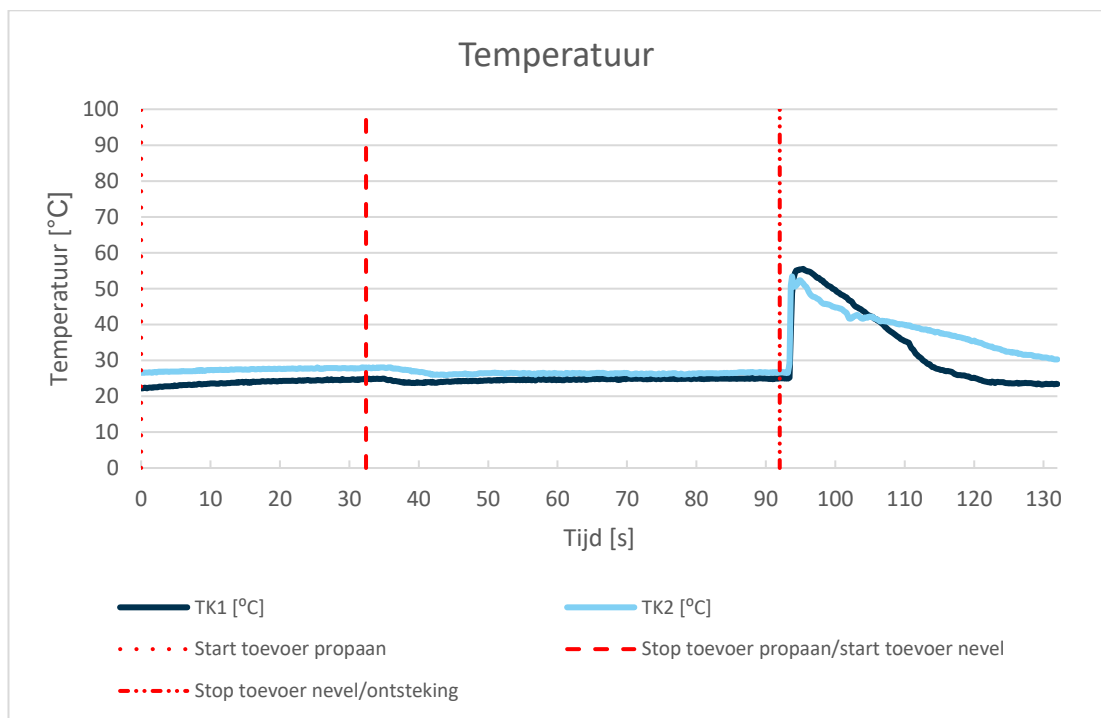
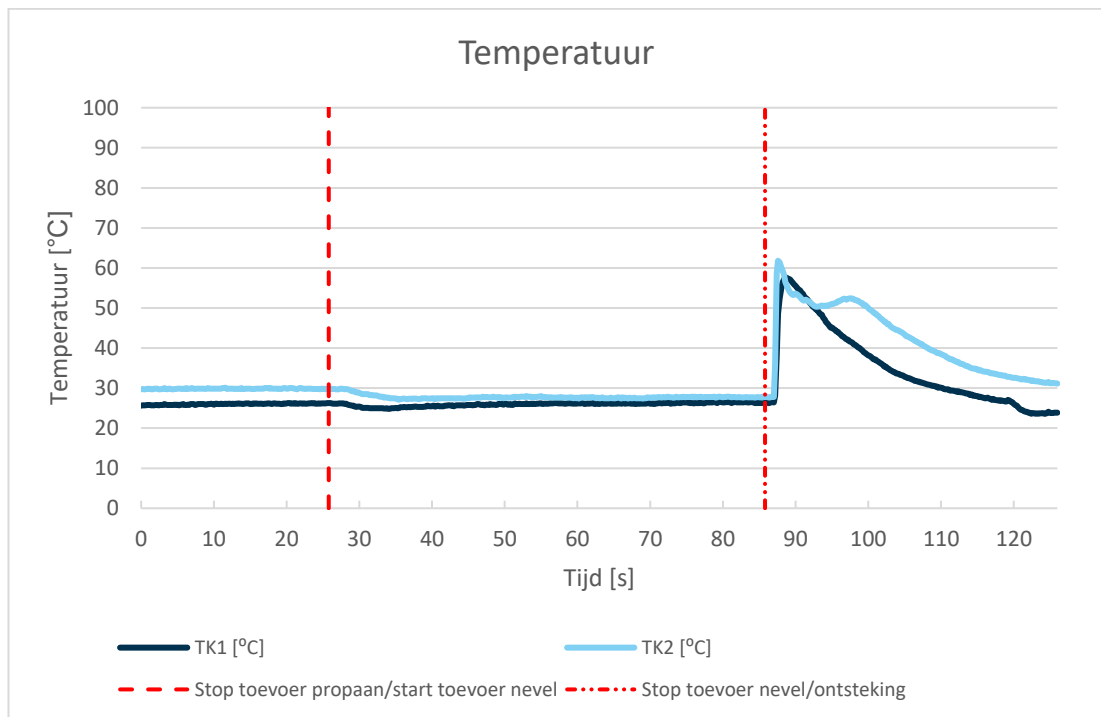
Test 5: Ontbranding bij 30 sec nevel



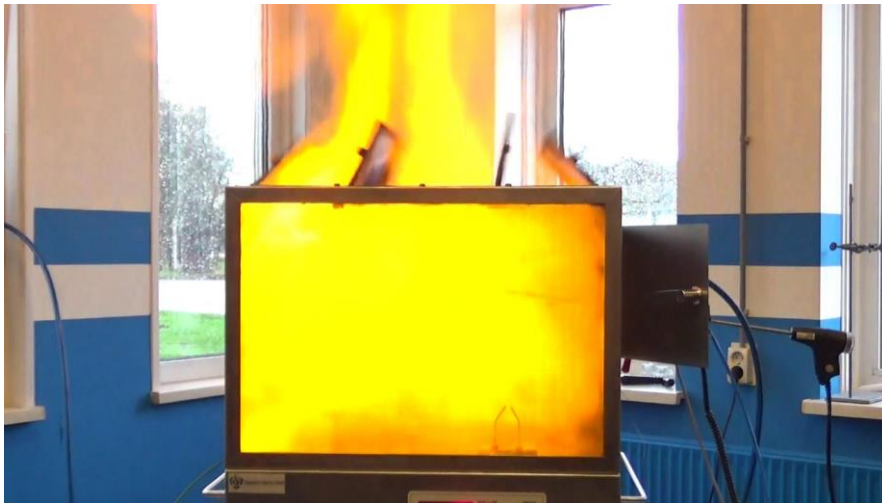
Test 6: Ontbranding bij 30 sec nevel



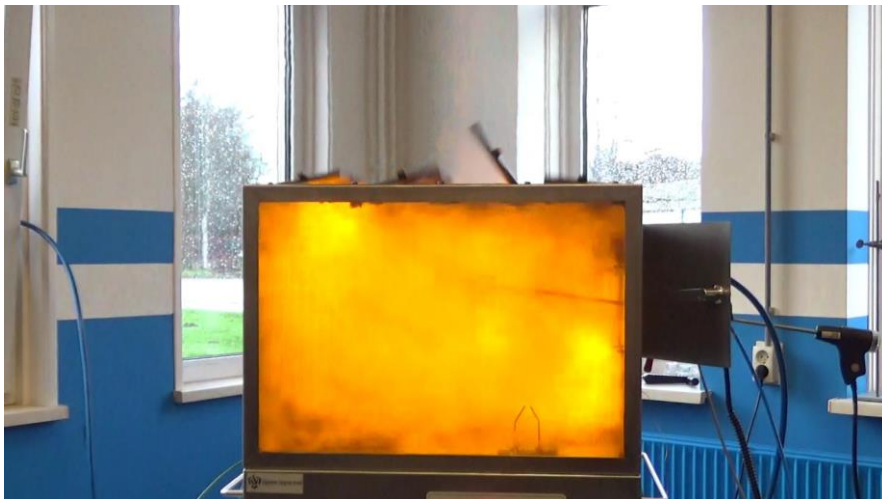
Test 7 en 8: 60 seconden



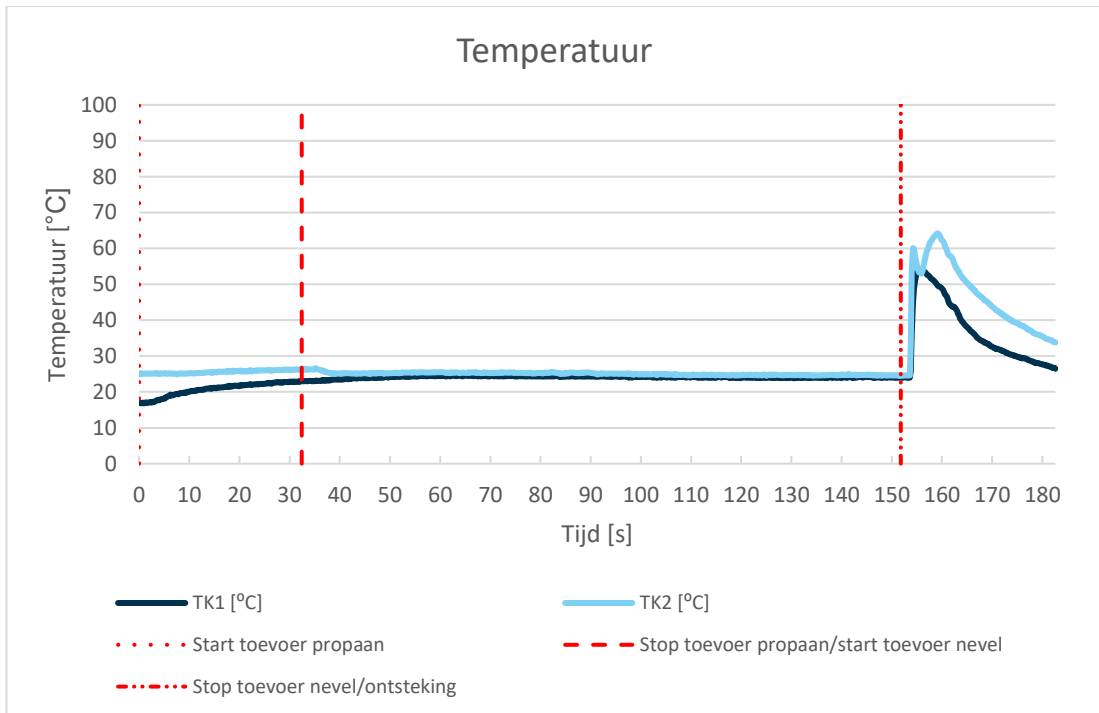
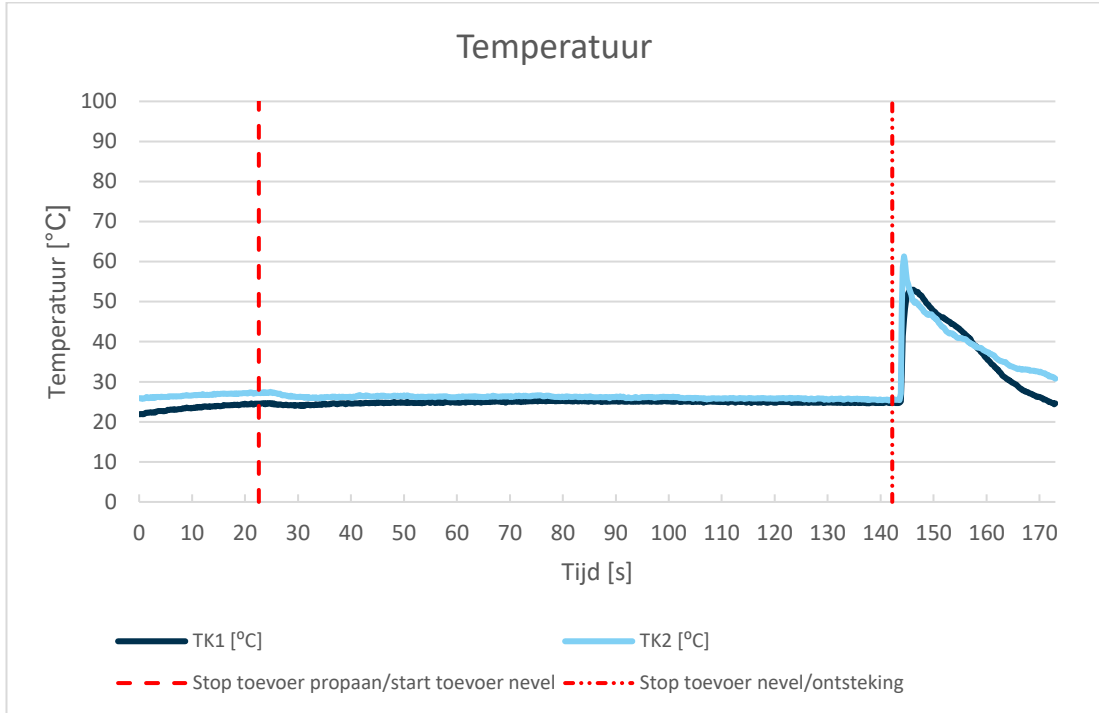
Test 7: Ontbranding bij 60 sec nevel



Test 8: Ontbranding bij 60 sec nevel



Test 9 en 10: 120 seconden



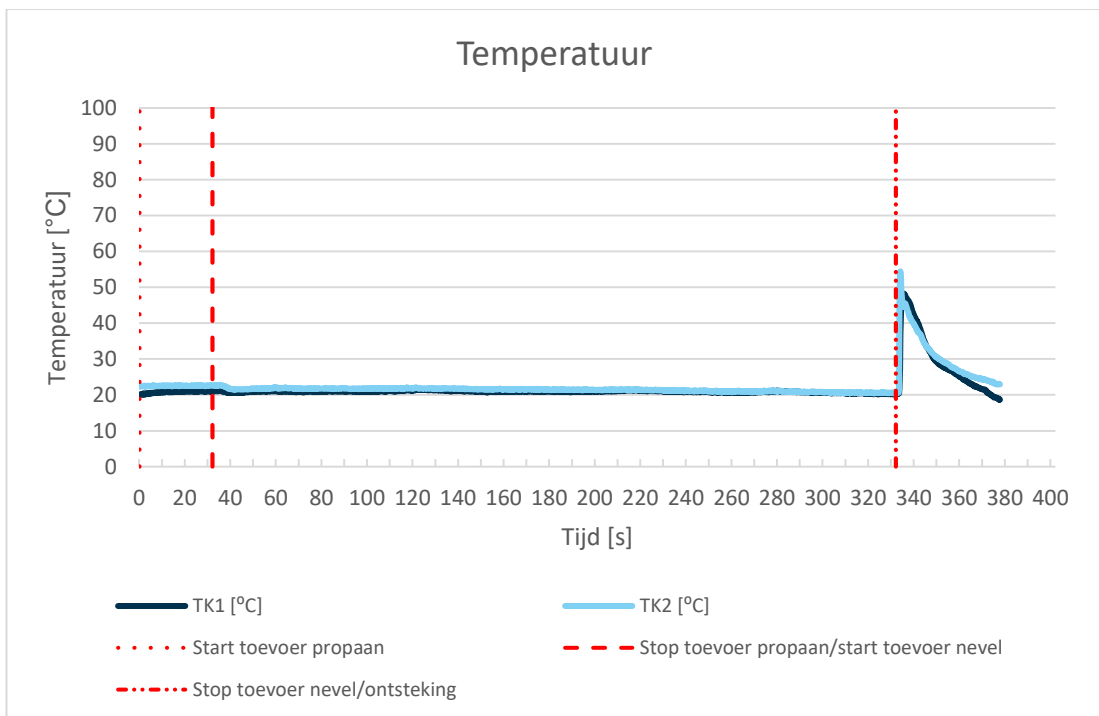
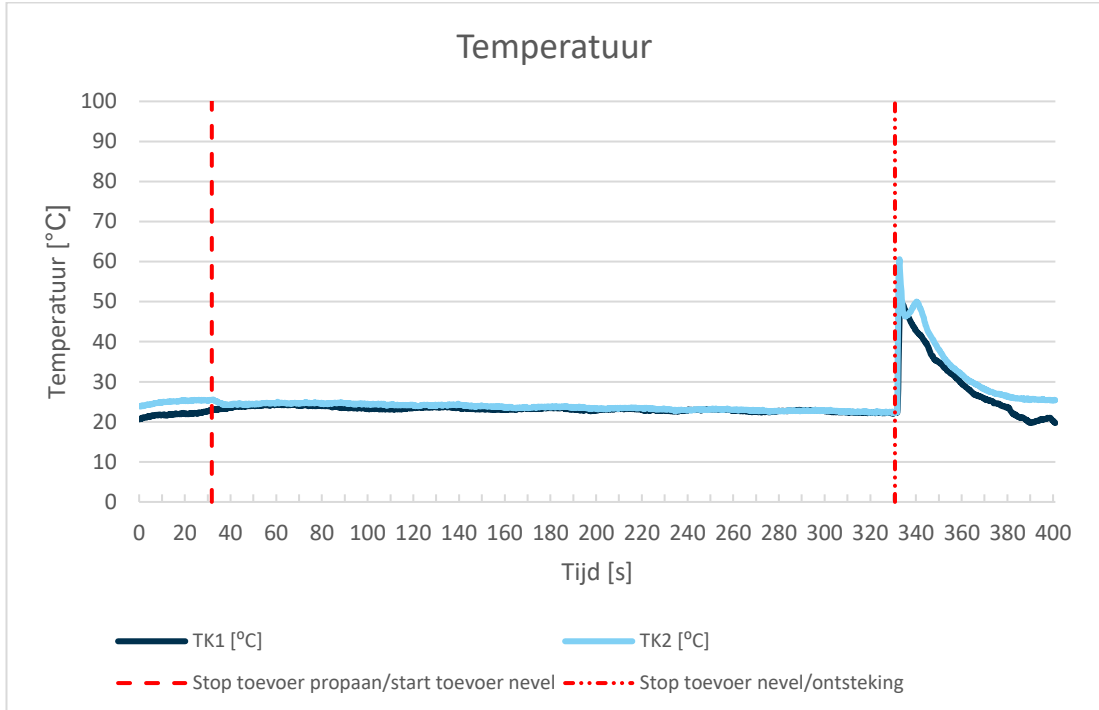
Test 9: Ontbranding bij 120 sec nevel



Test 10: Ontbranding bij 120 sec nevel



Test 11 en 12: 300 seconden



Test 11: Ontbranding bij 300 sec nevel

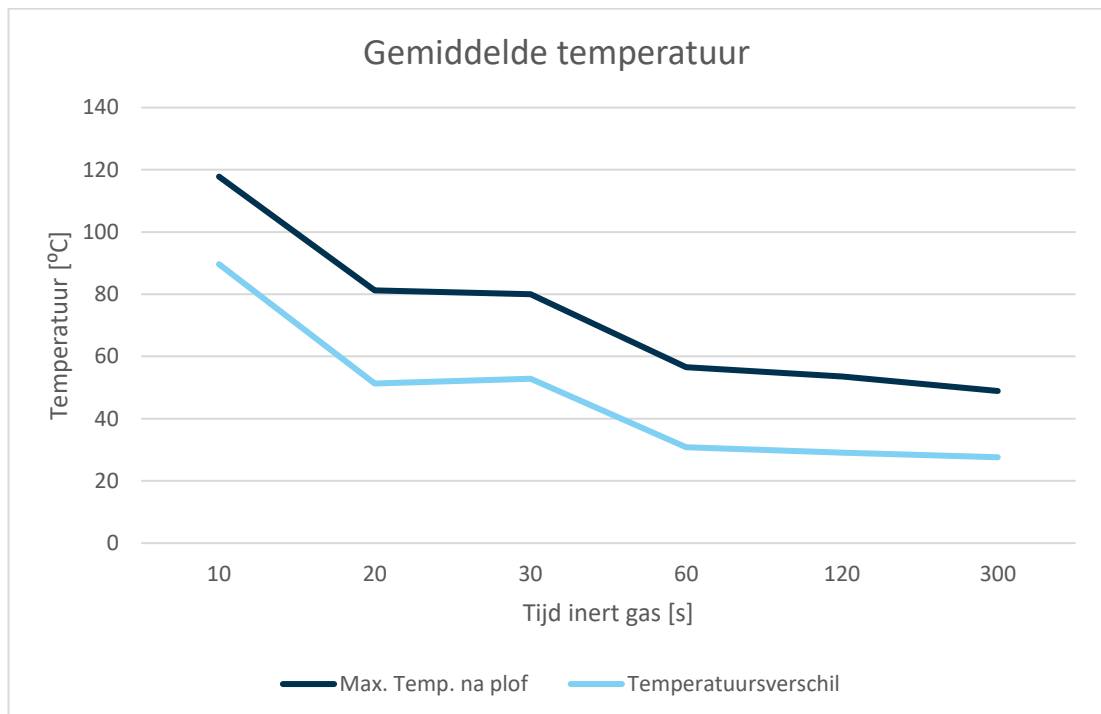


Test 12: Ontbranding bij 300 sec nevel



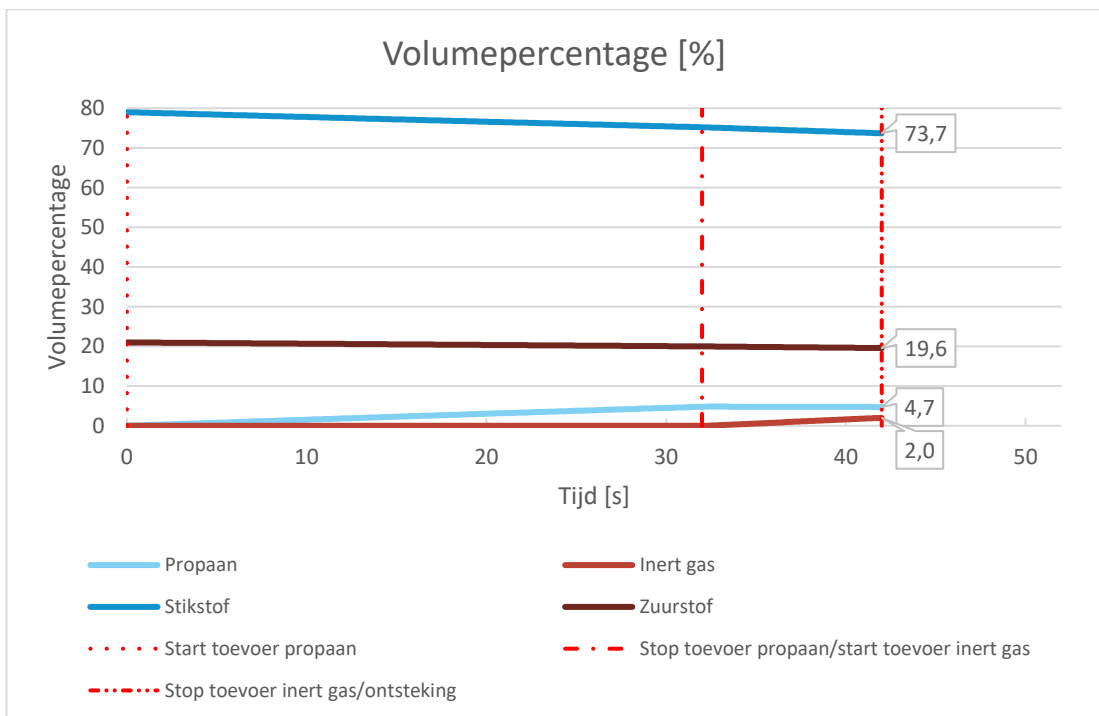
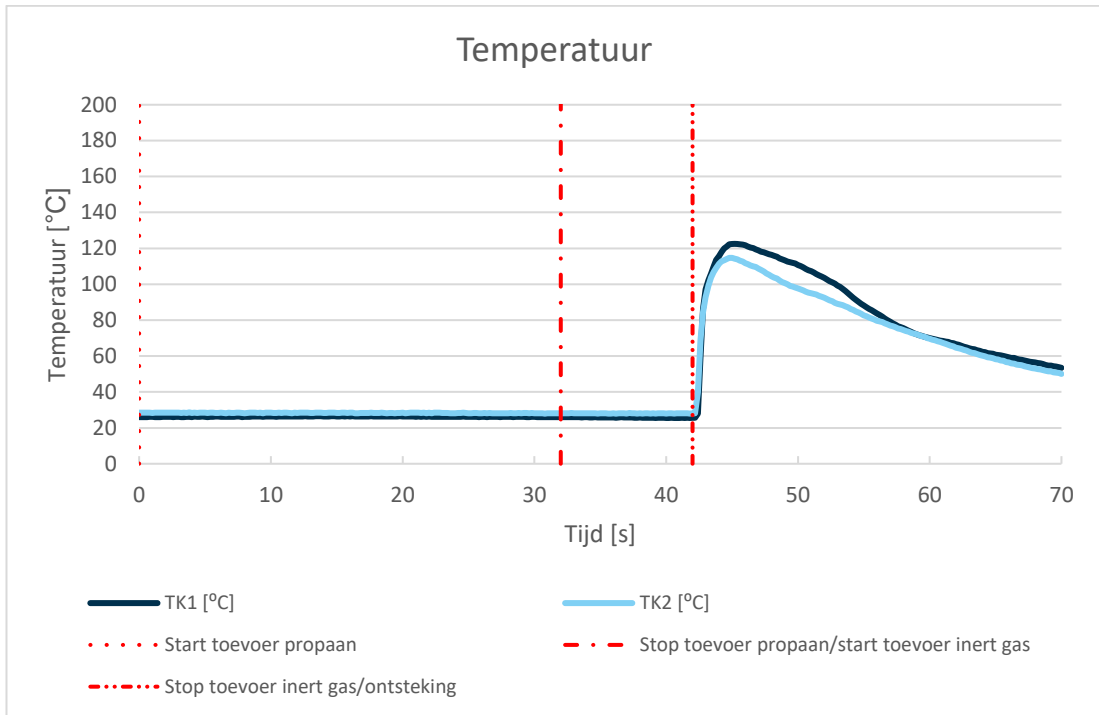
Samenvatting resultaten nevel koude gassen

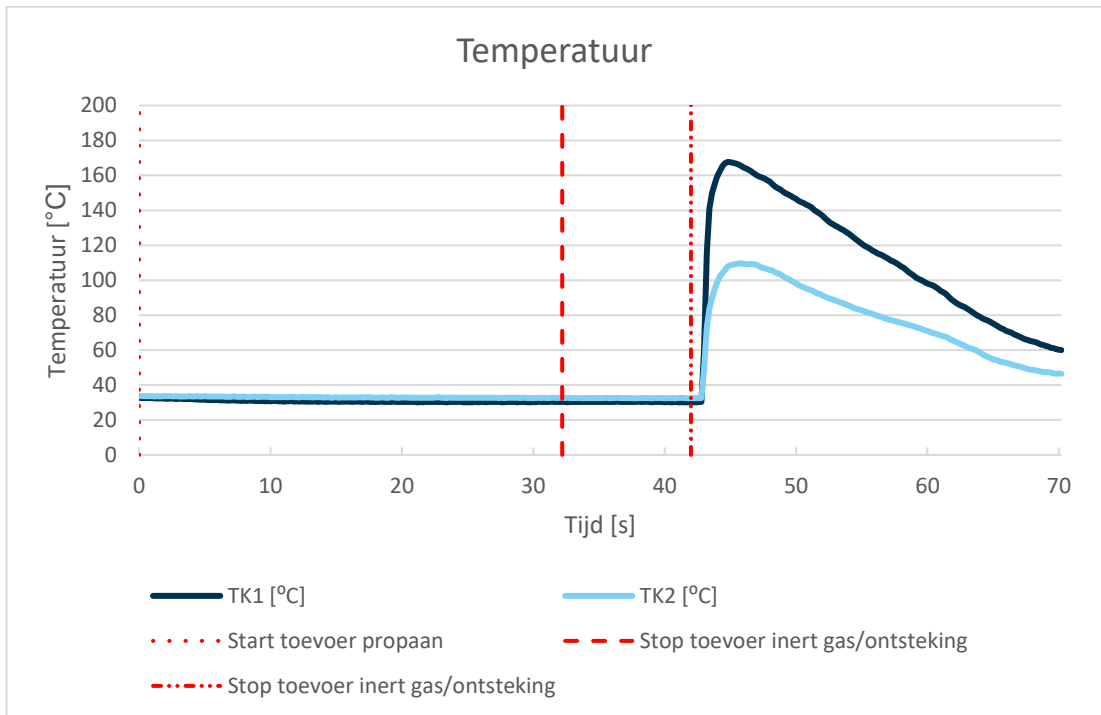
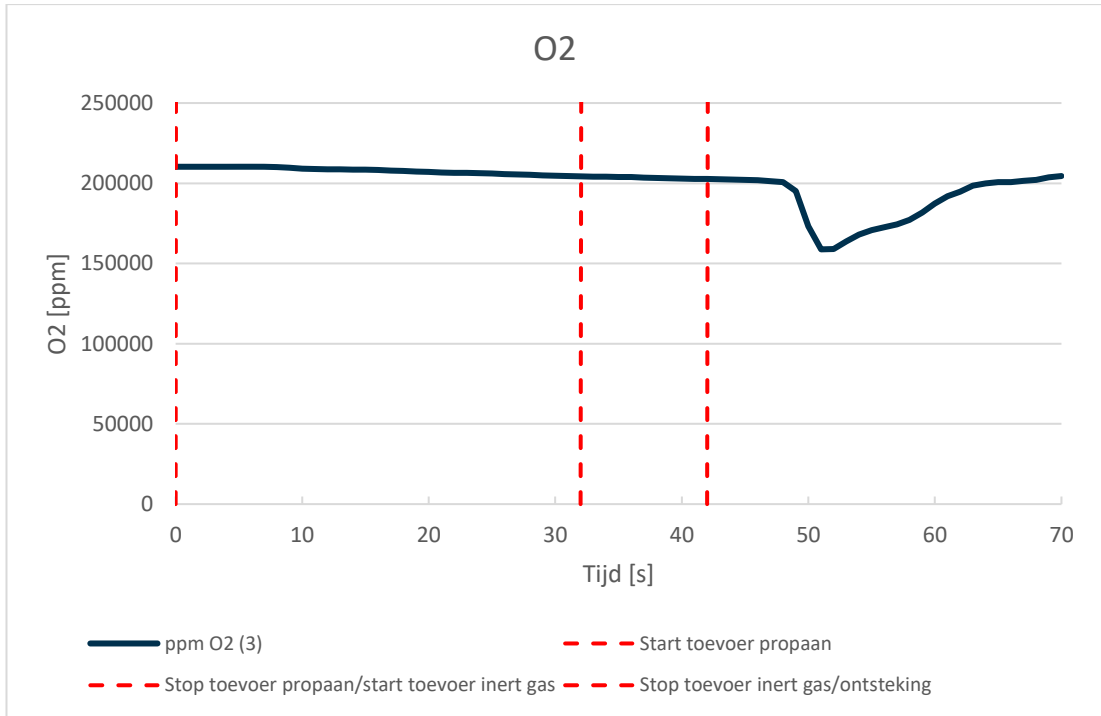
Toevoertijd [s]	Volumepercentage [%]			Ontbranding [-]	Temperatuur [°C]	
	Zuurstof	Waterdamp	Propan		Max. na plof	Verschil
10	-	4,0	-	Ja	118	90
20	-	4,4	-	Ja	81	51
30	-	3,7	-	Ja	80	53
60	-	3,4	-	Ja	57	31
120	-	3,1	-	Ja	54	29
300	-	2,5	-	Ja	49	28

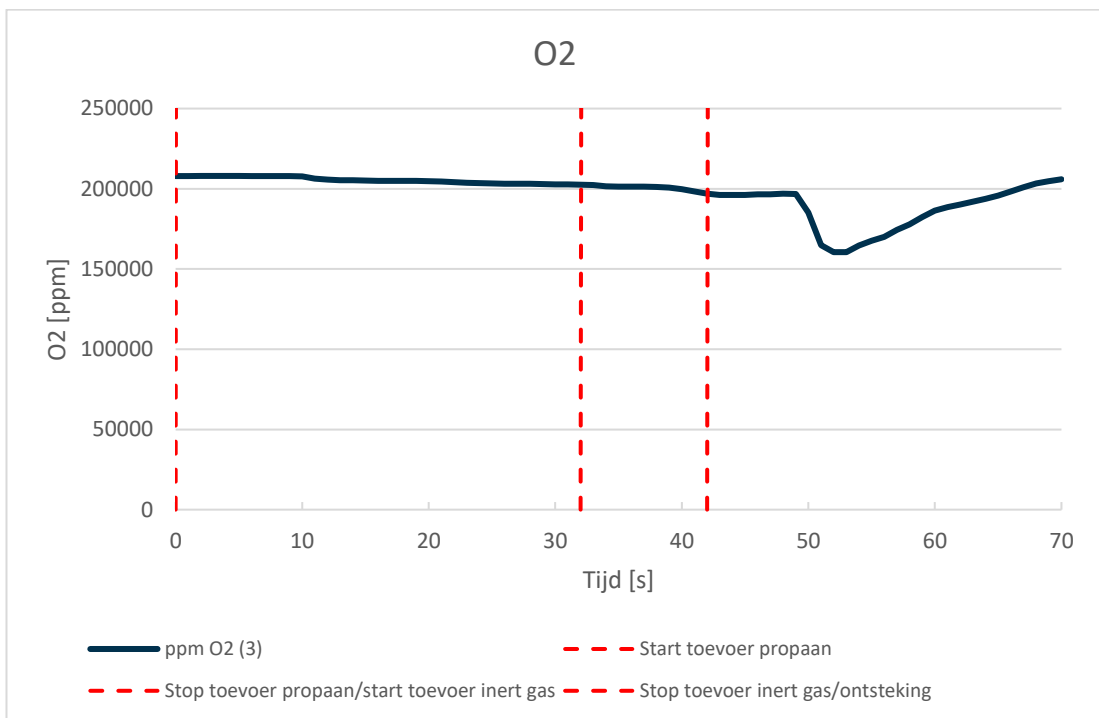
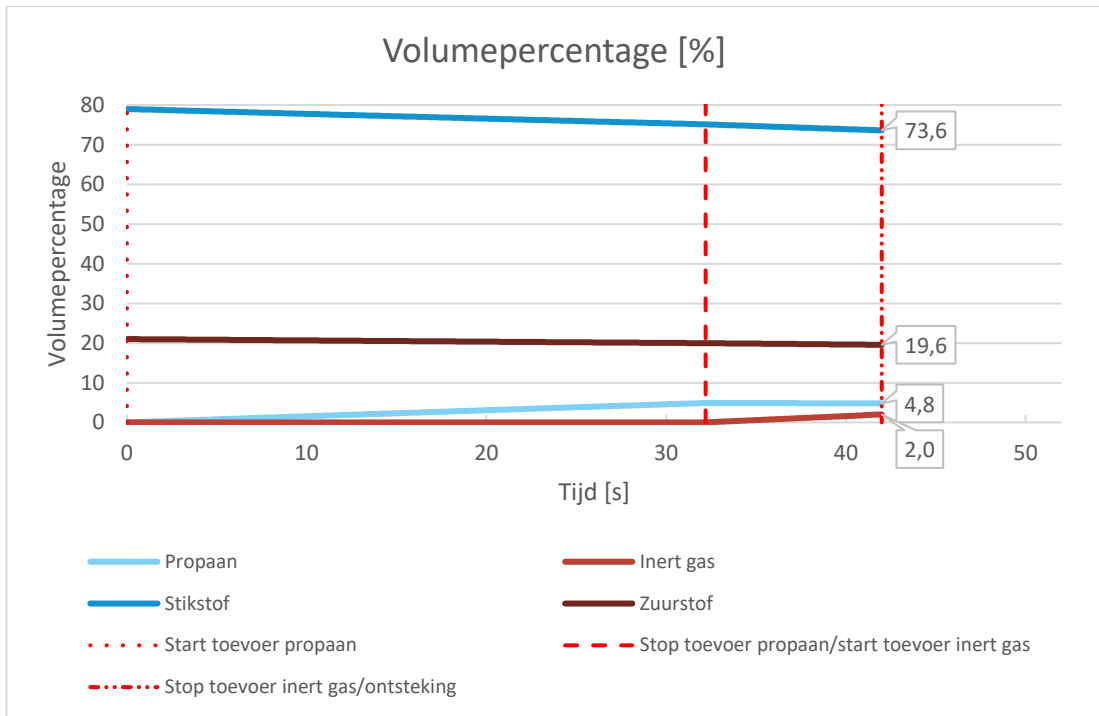


Stikstof

Test 1 en 2: 10 seconden







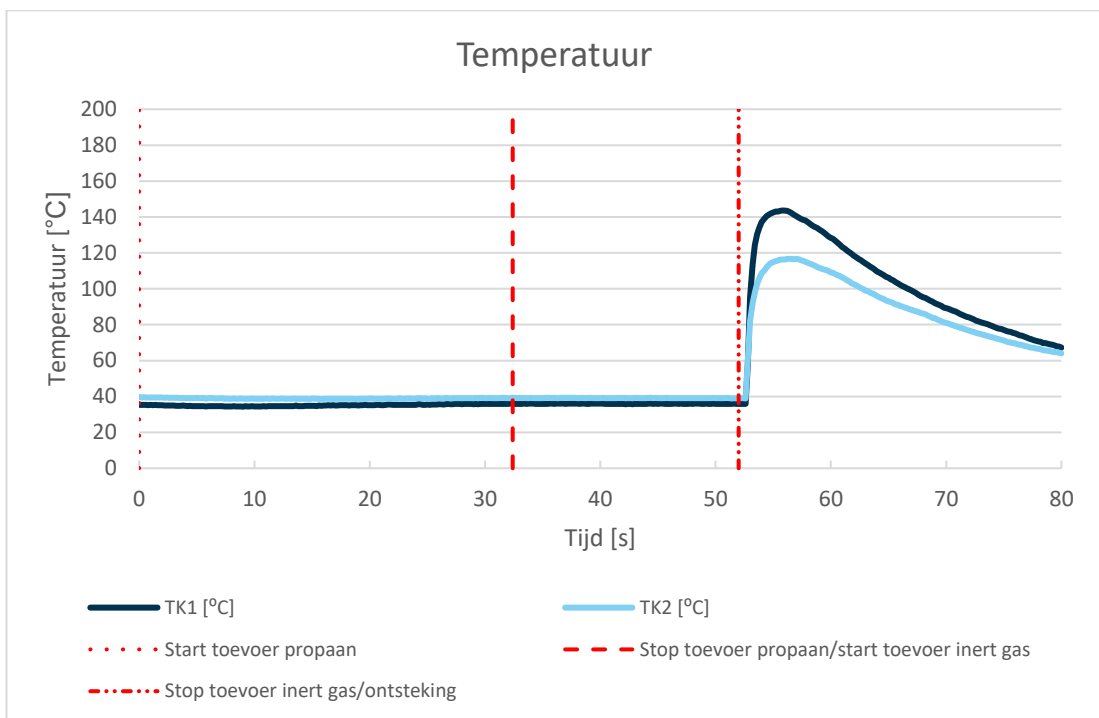
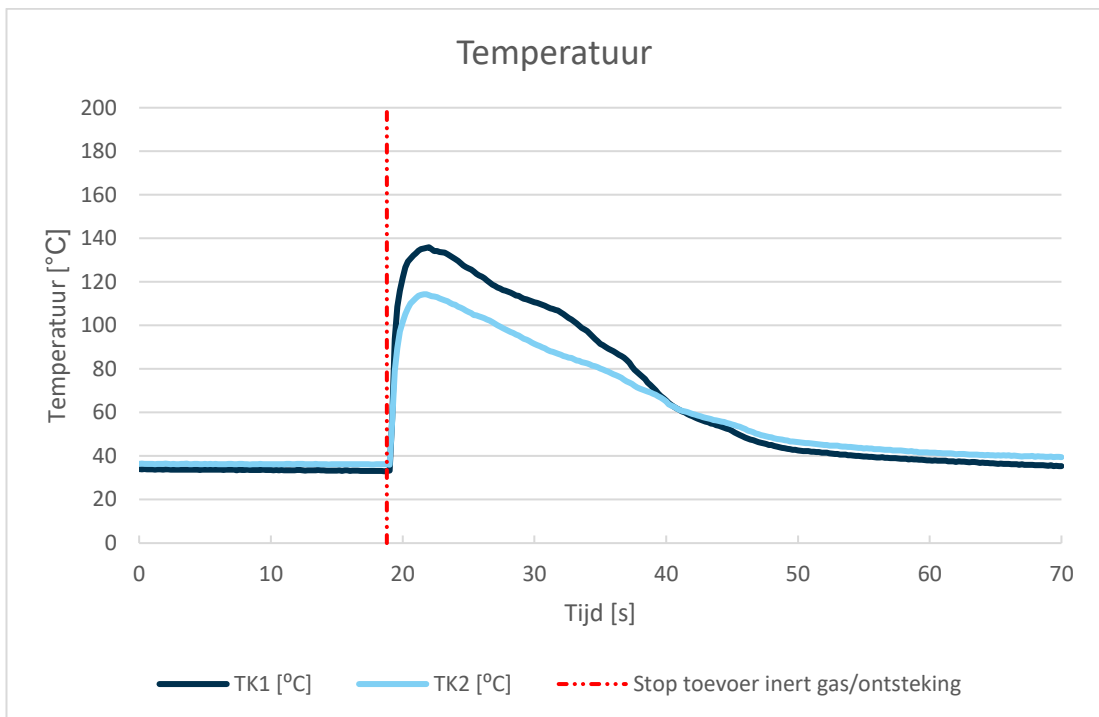
Test 1: Ontbranding bij 10 sec stikstof

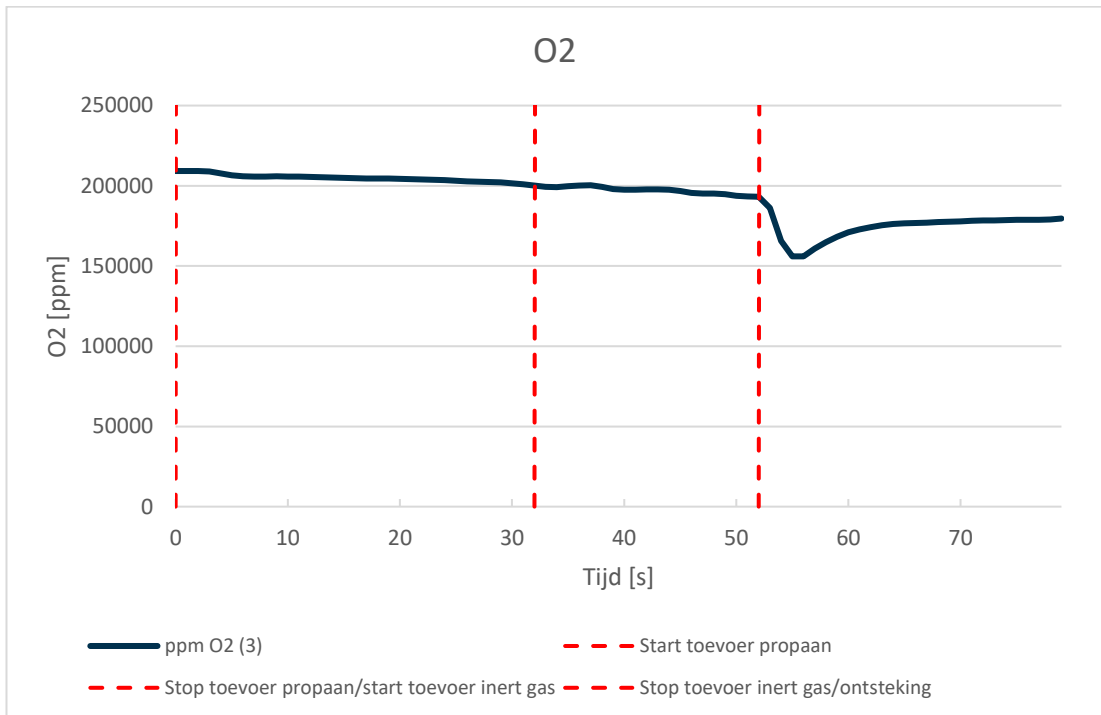
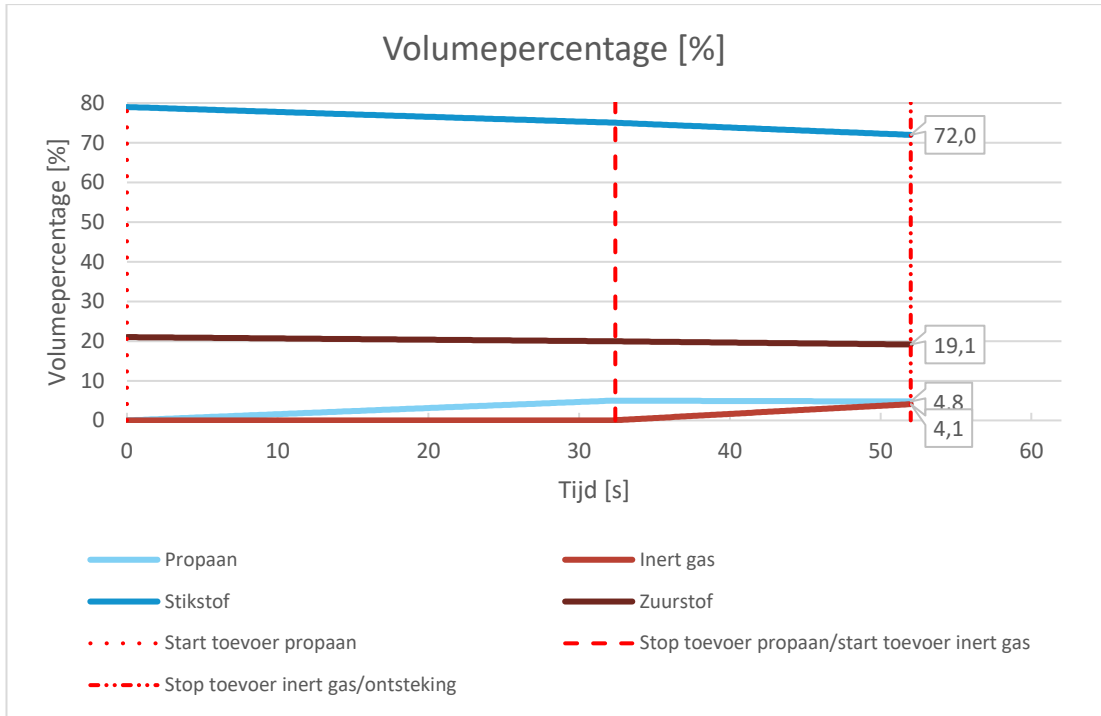


Test 2: Ontbranding bij 10 sec stikstof



Test 3 en 4: 20 seconden





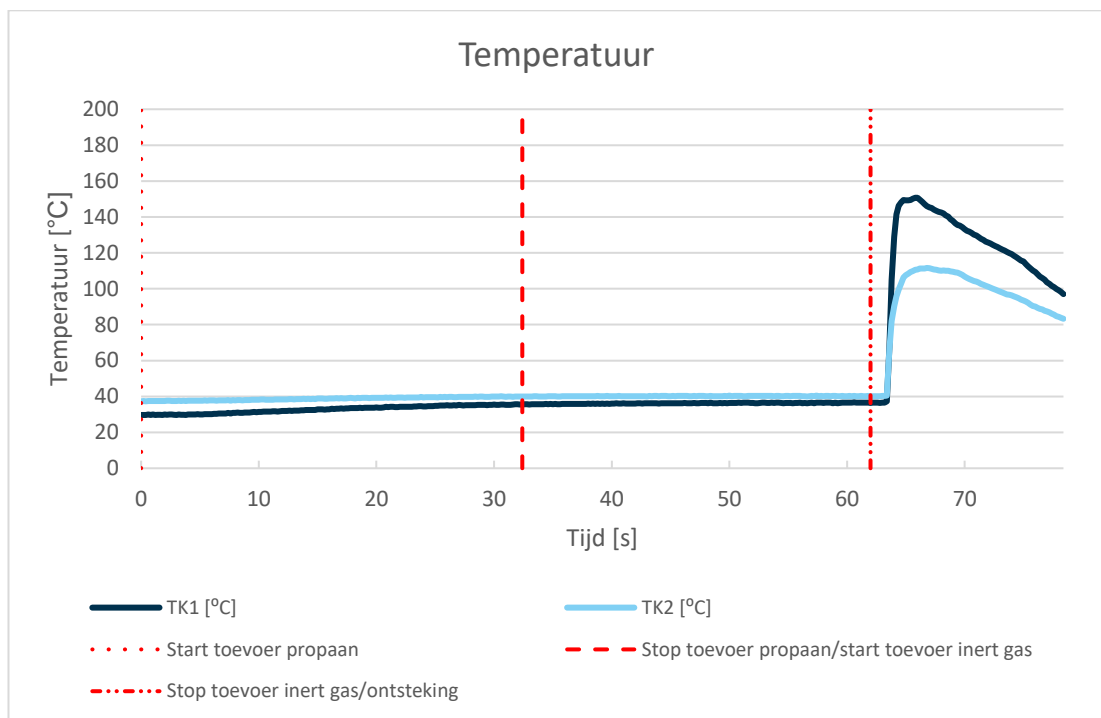
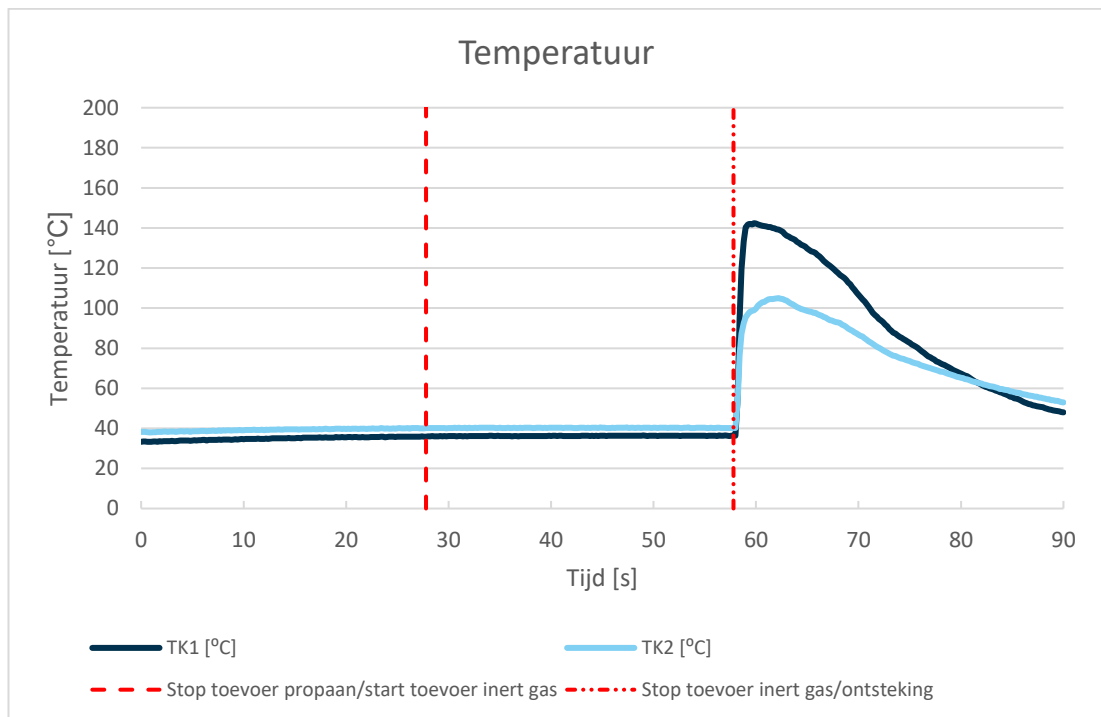
Test 3: Ontbranding bij 20 sec stikstof

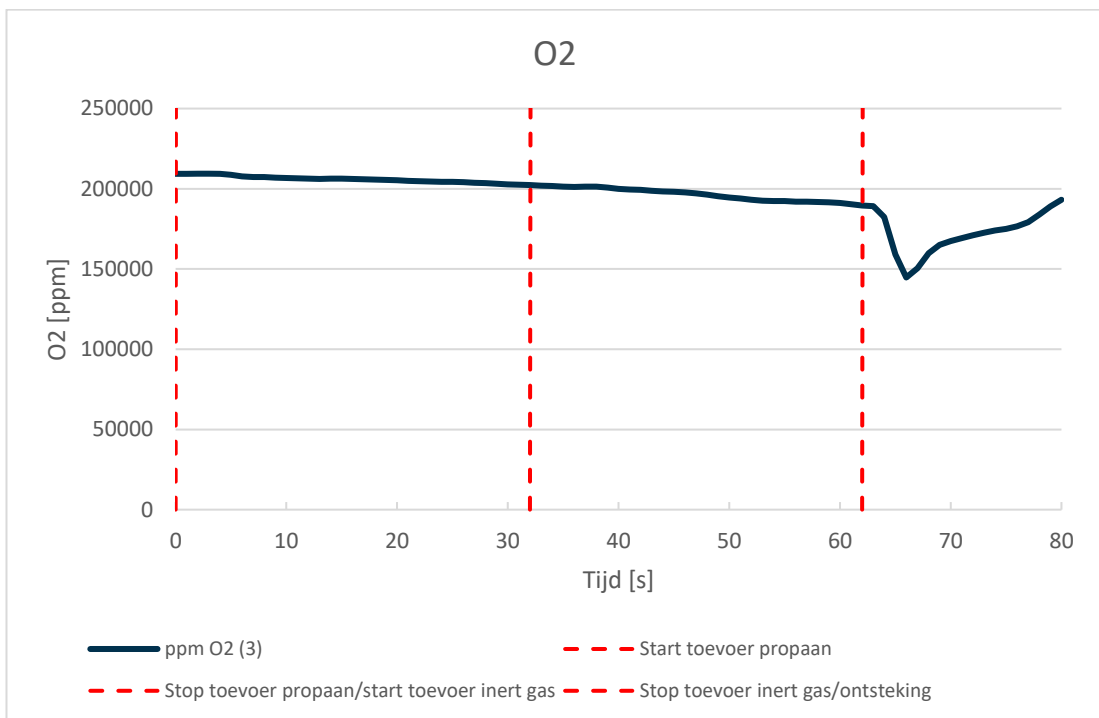
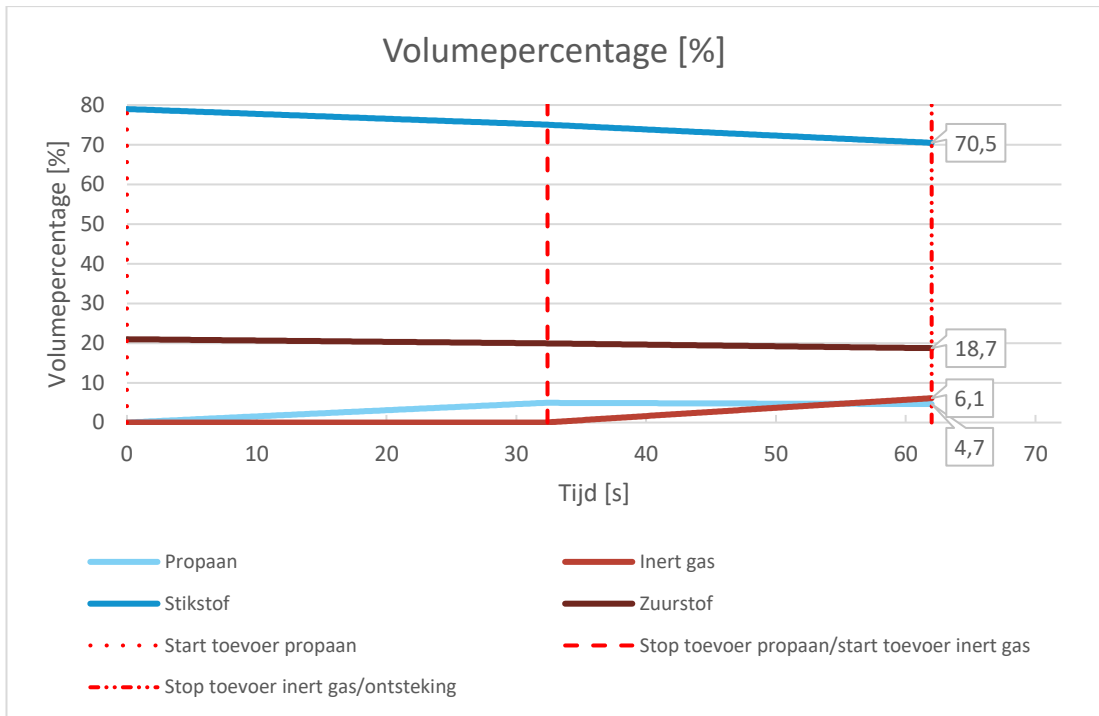


Test 4: Ontbranding bij 20 sec stikstof



Test 5 en 6: 30 seconden





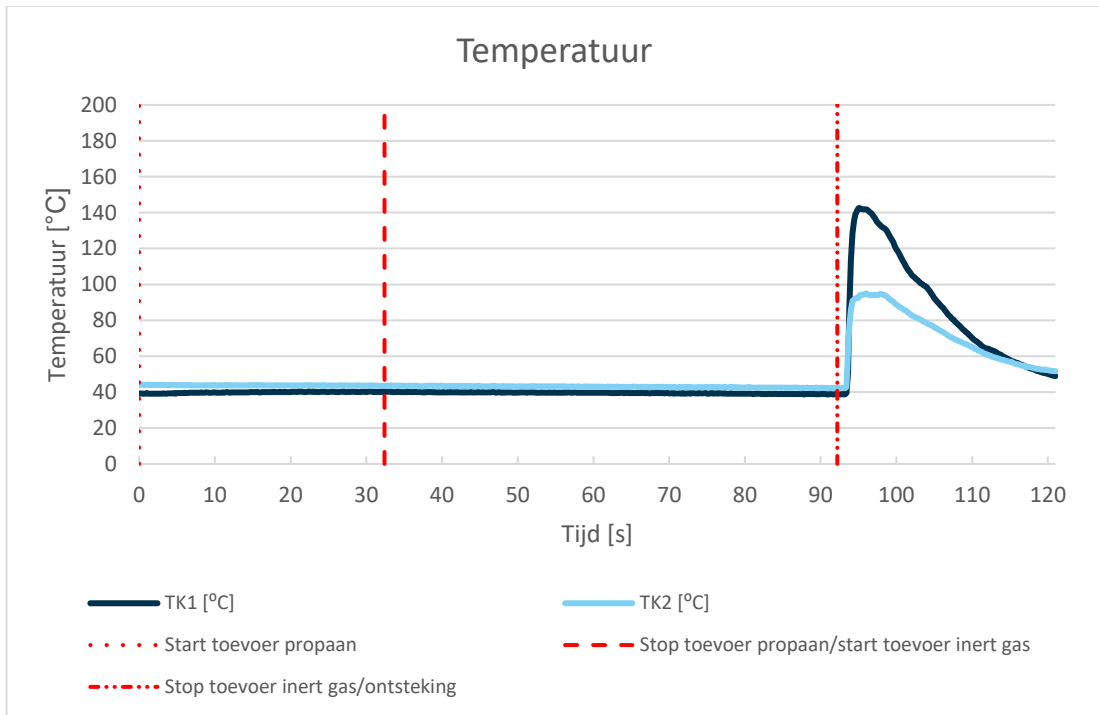
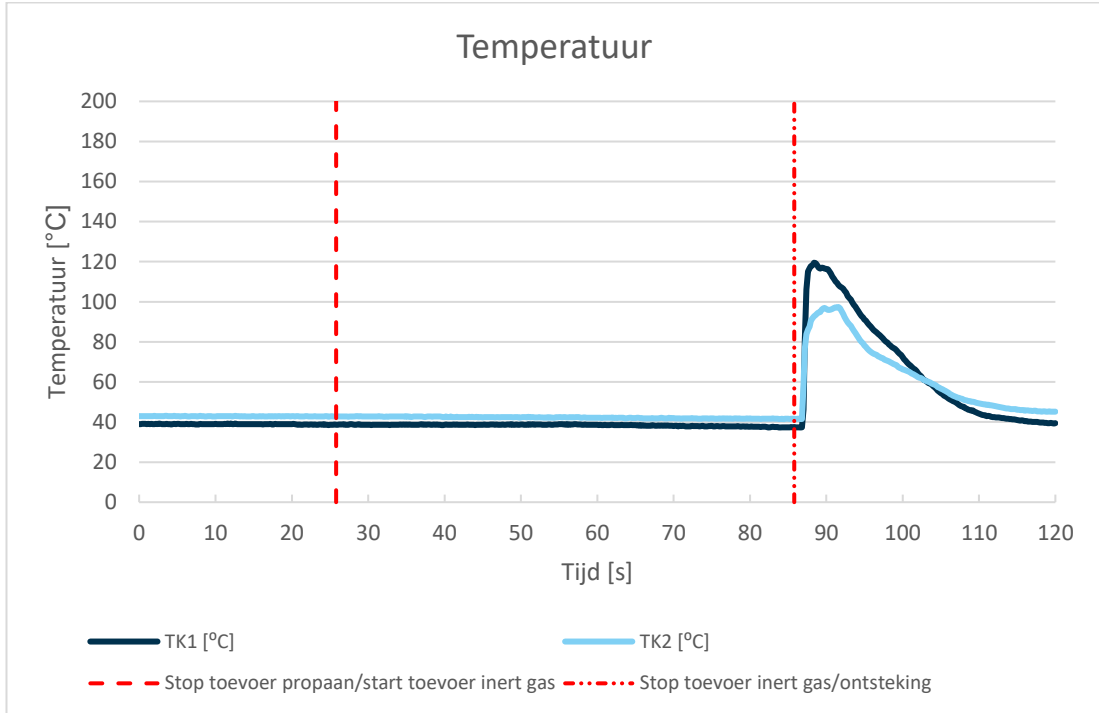
Test 5: Ontbranding bij 30 sec stikstof

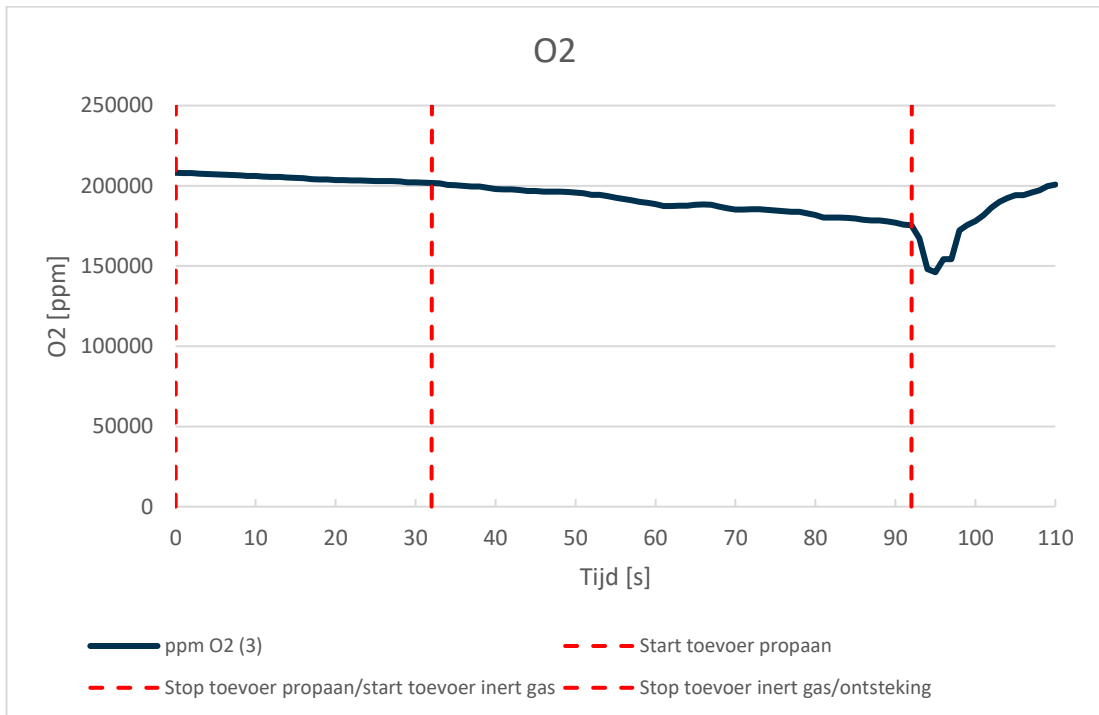
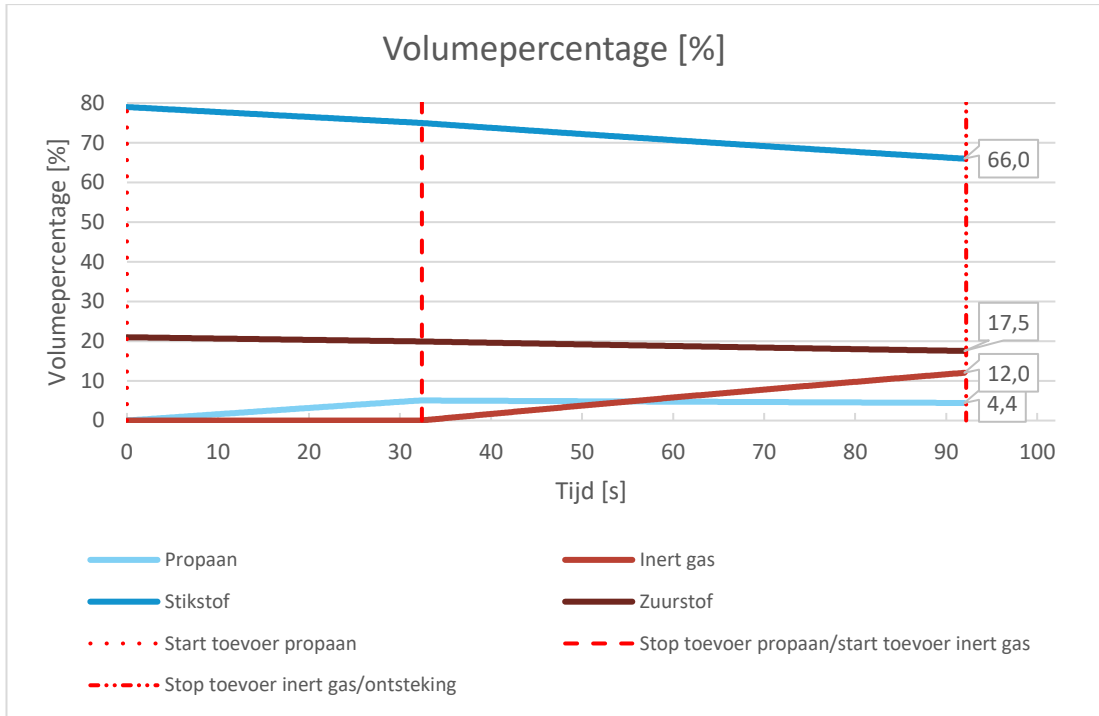


Test 6: Ontbranding bij 30 sec stikstof

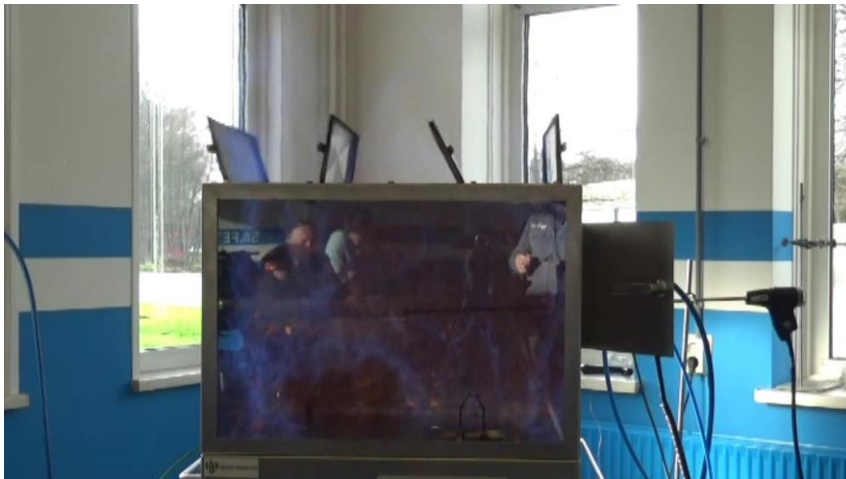


Test 7 en 8: 60 seconden





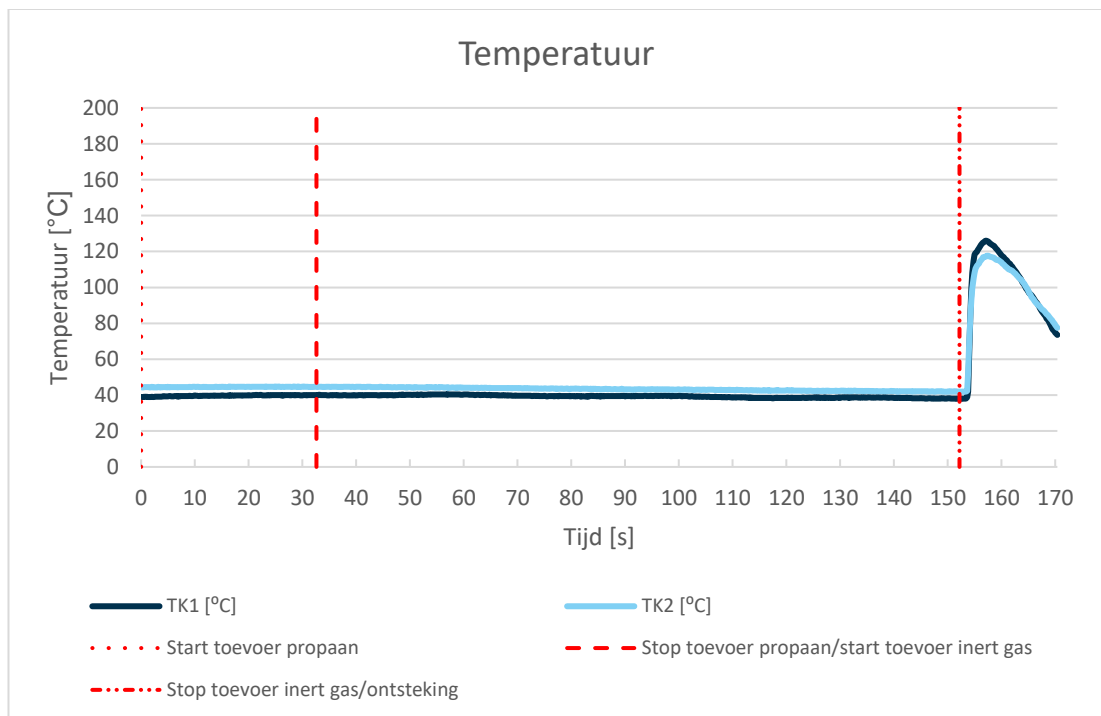
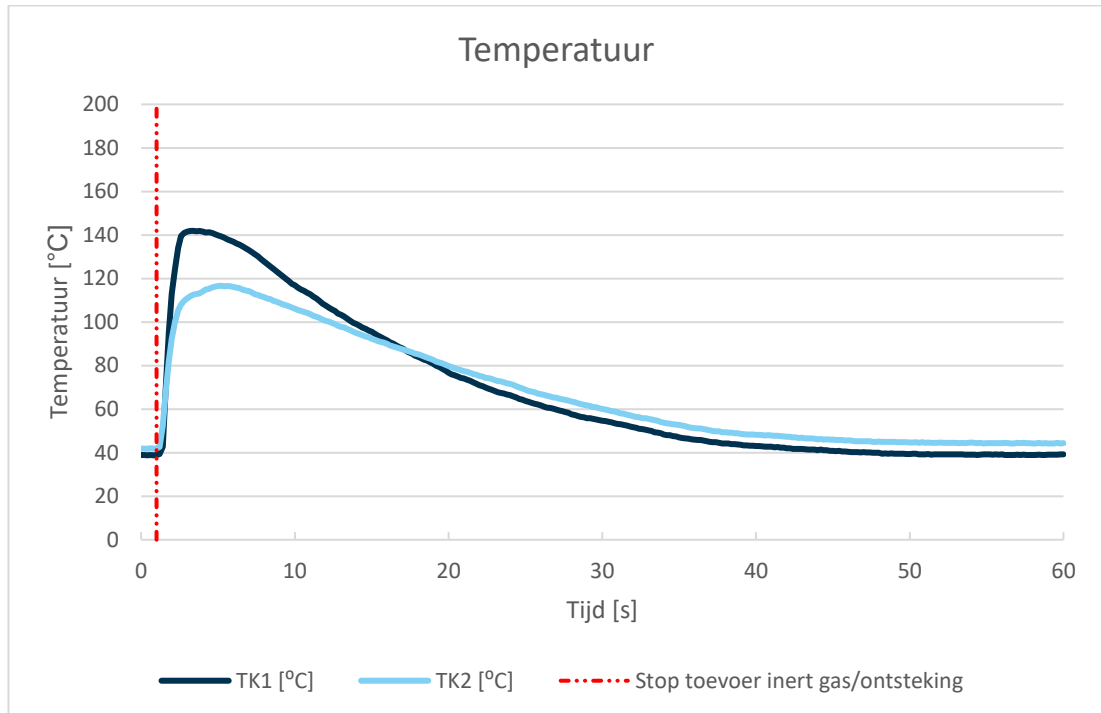
Test 7: Ontbranding bij 60 sec stikstof

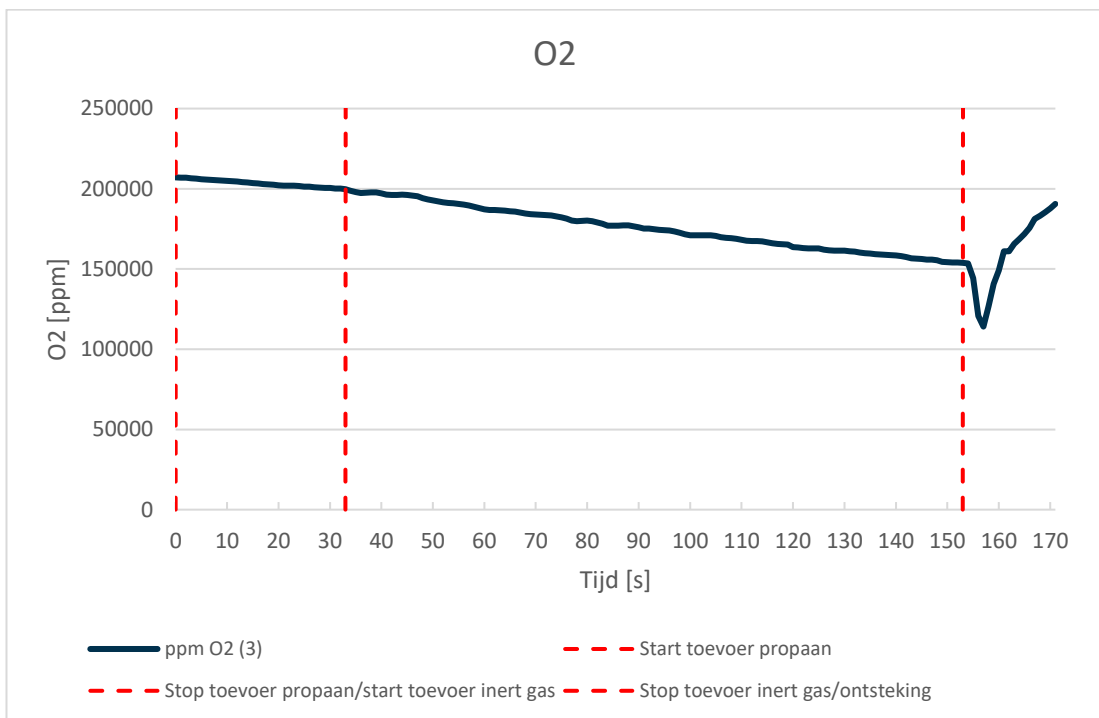
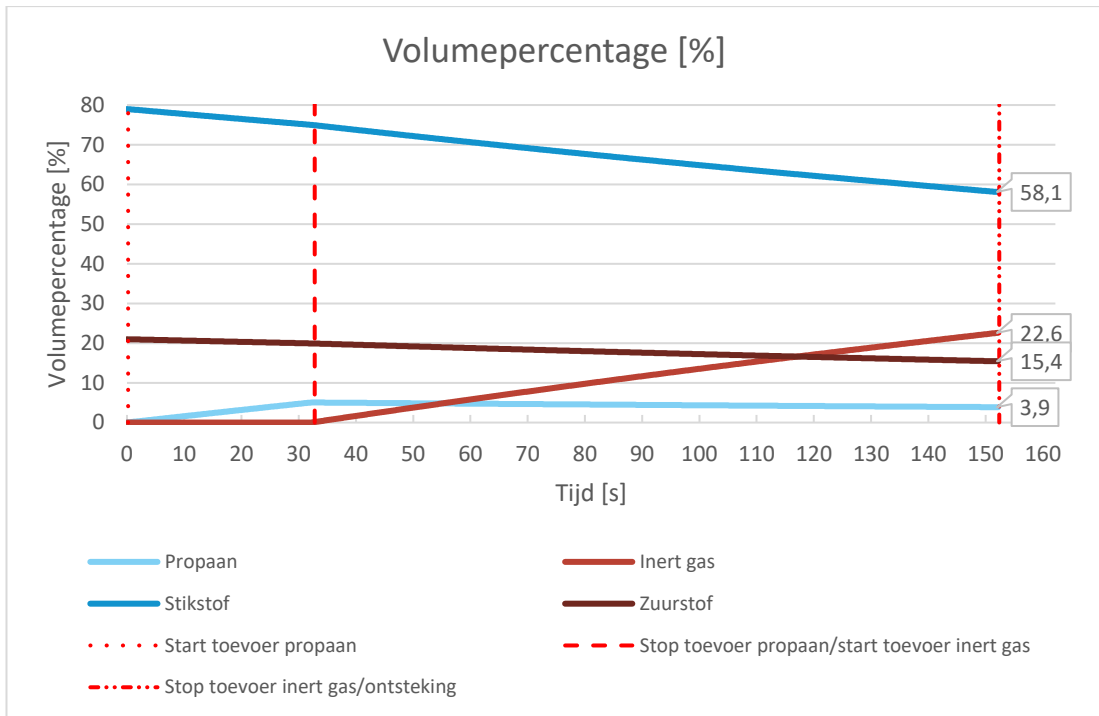


Test 8: Ontbranding bij 60 sec stikstof



Test 9 en 10: 120 seconden





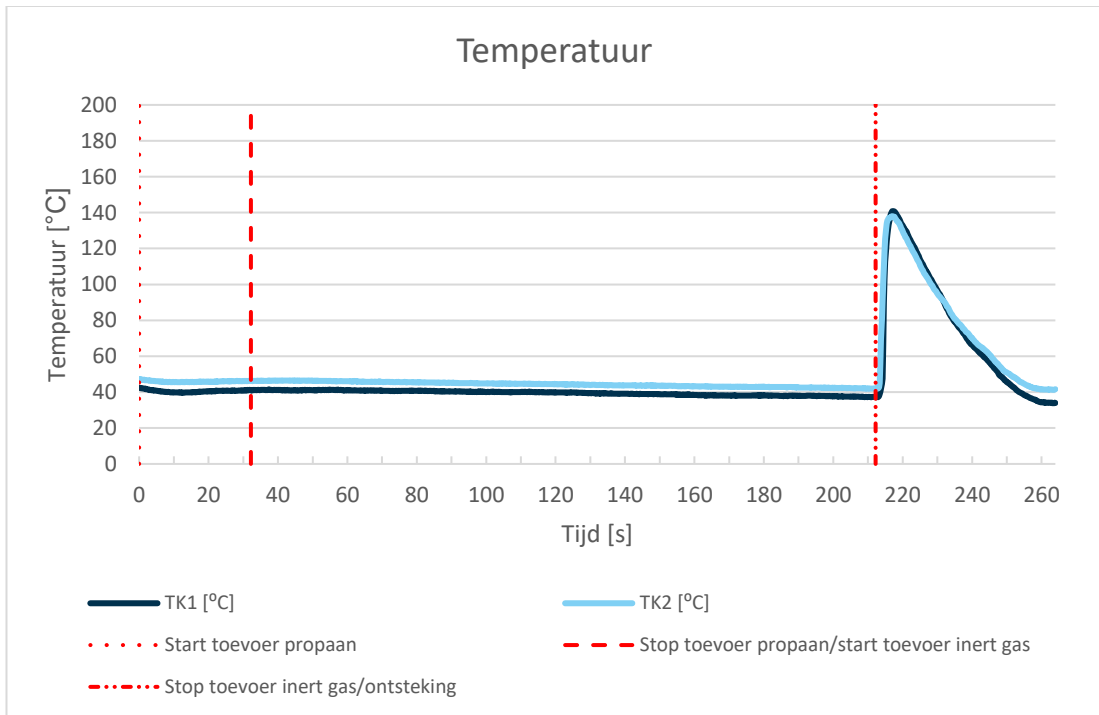
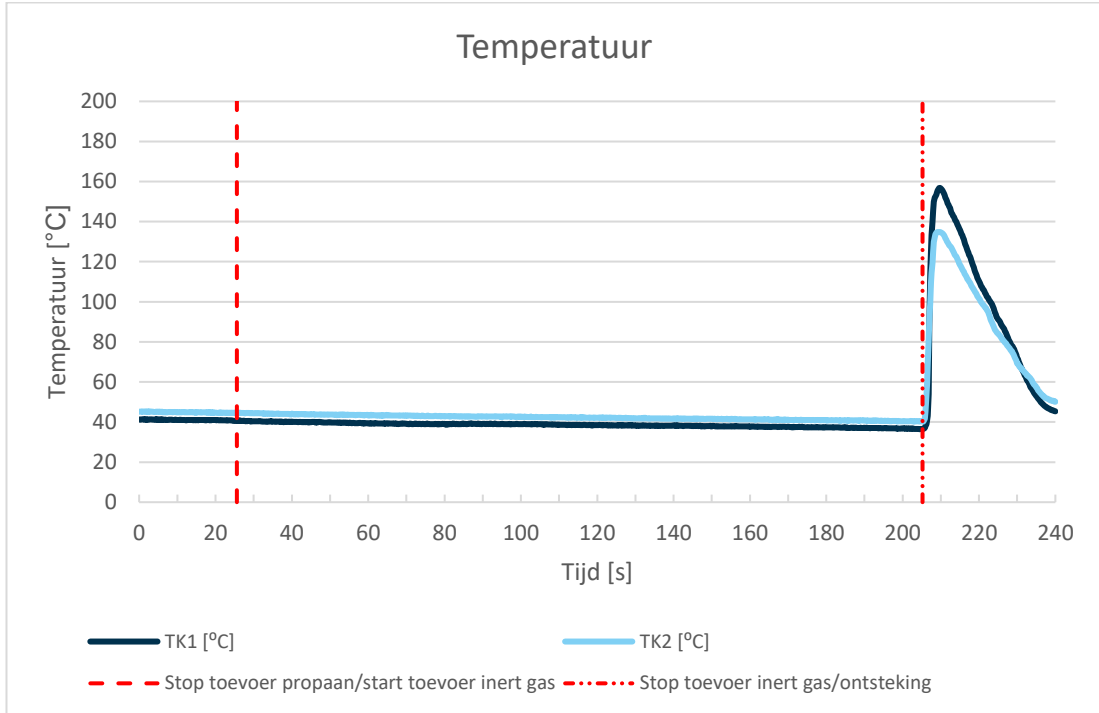
Test 9: Ontbranding bij 120 sec stikstof

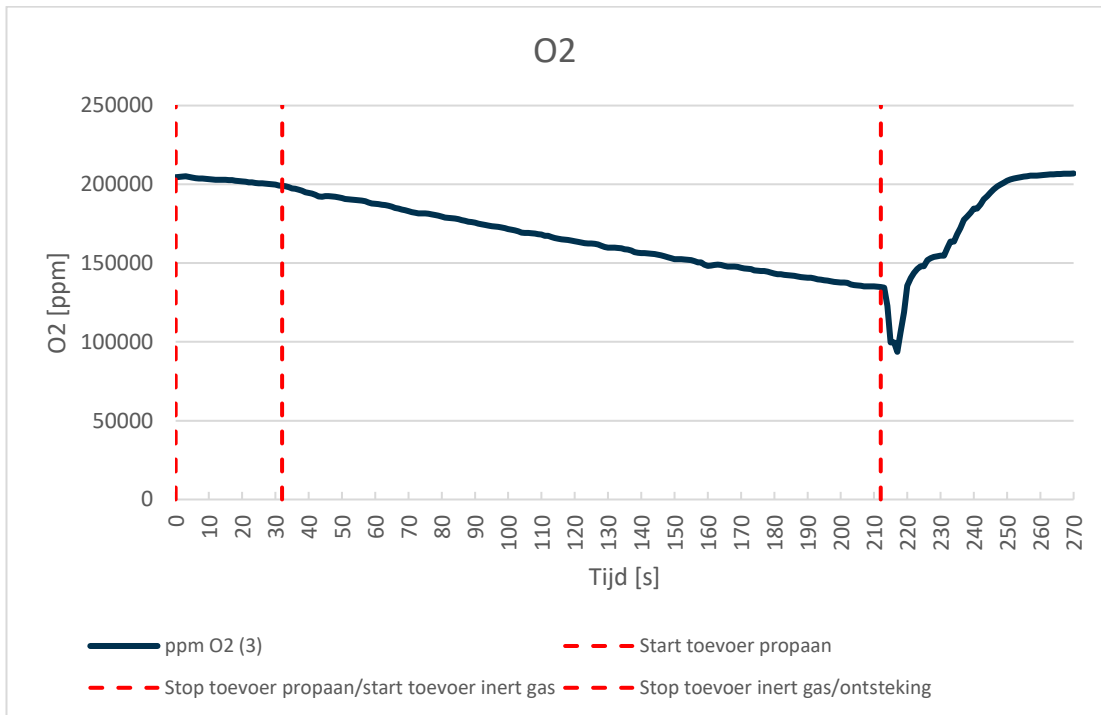
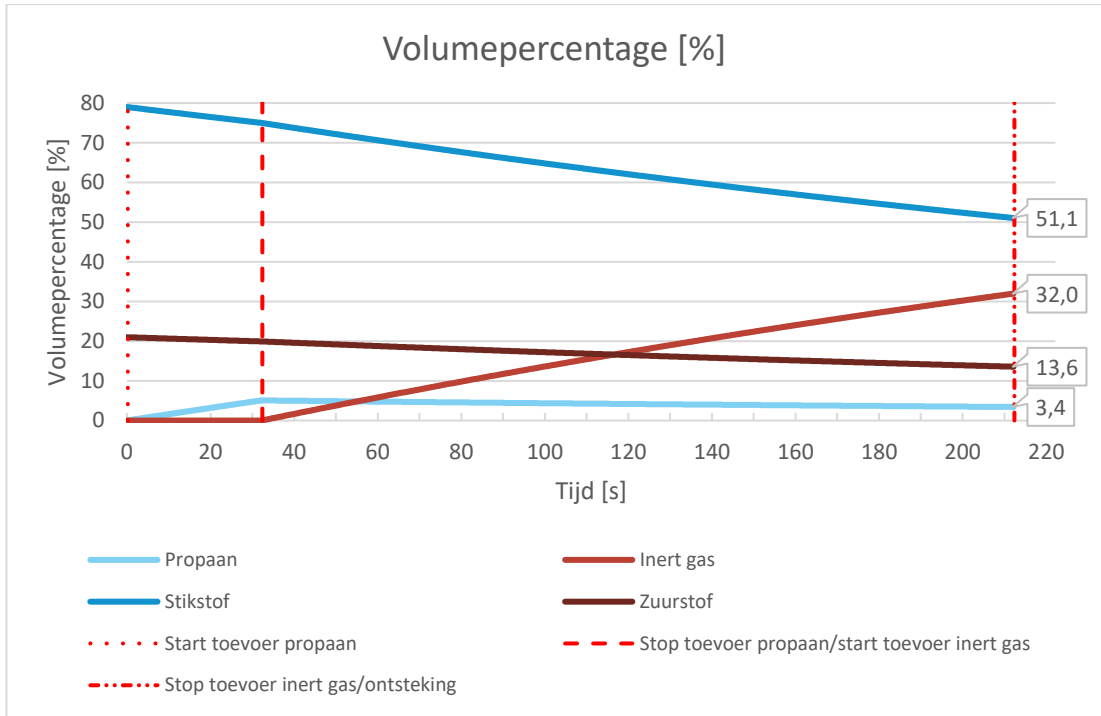


Test 10: Ontbranding bij 120 sec stikstof



Test 11 en 12: 180 seconden





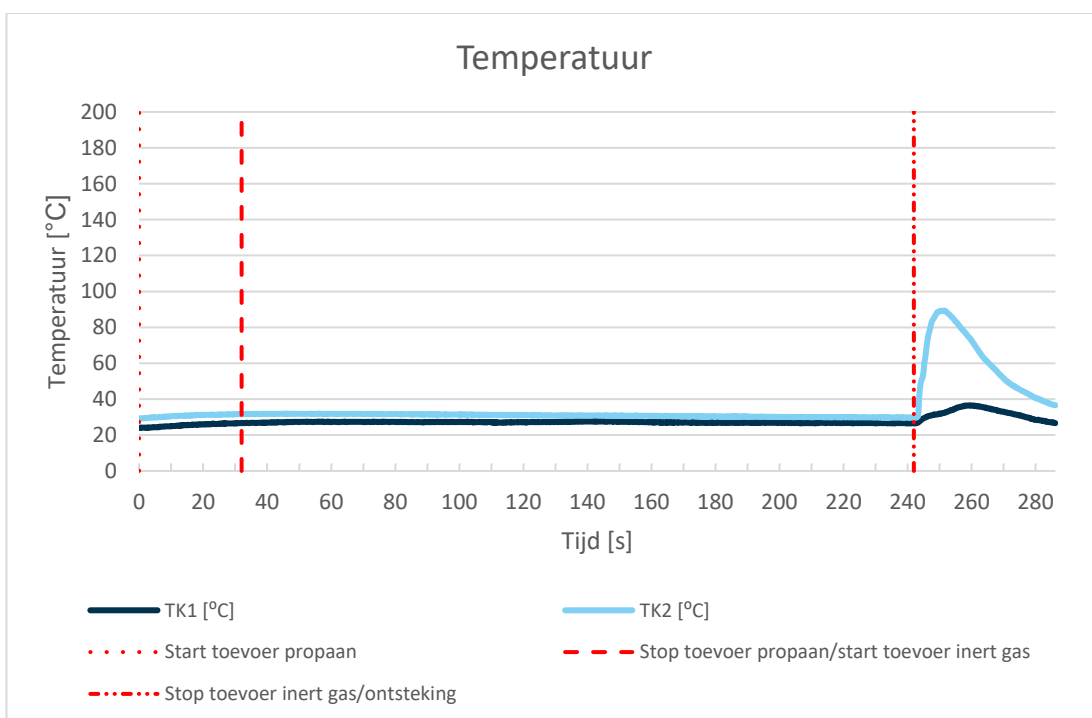
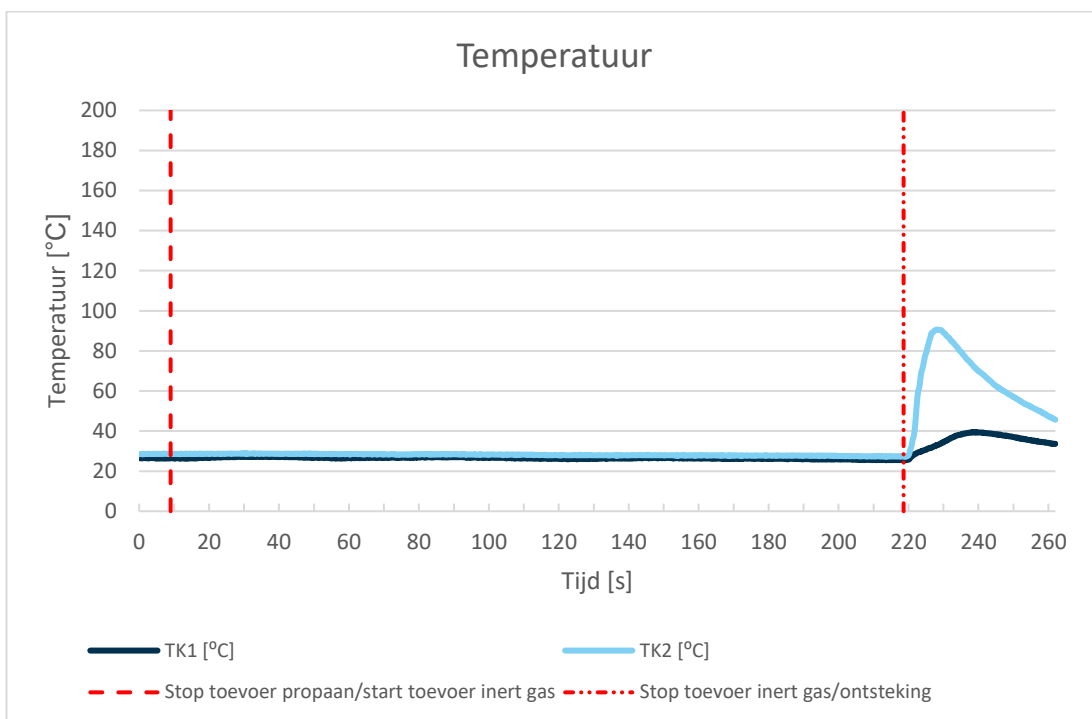
Test 11: Ontbranding bij 180 sec stikstof

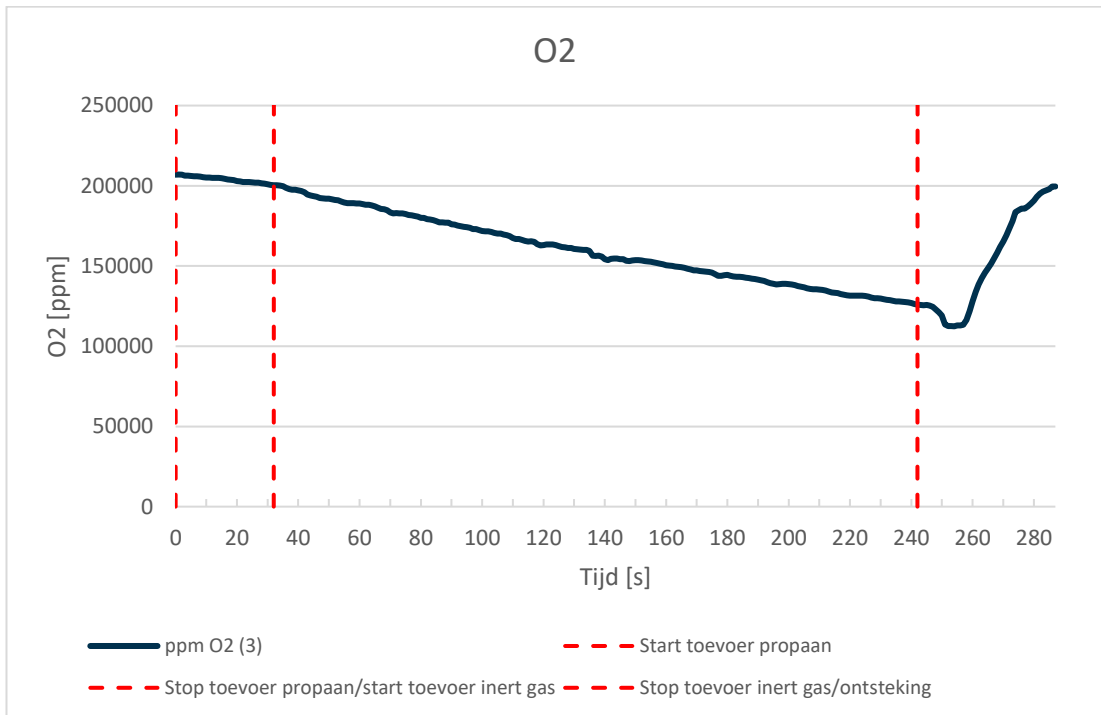
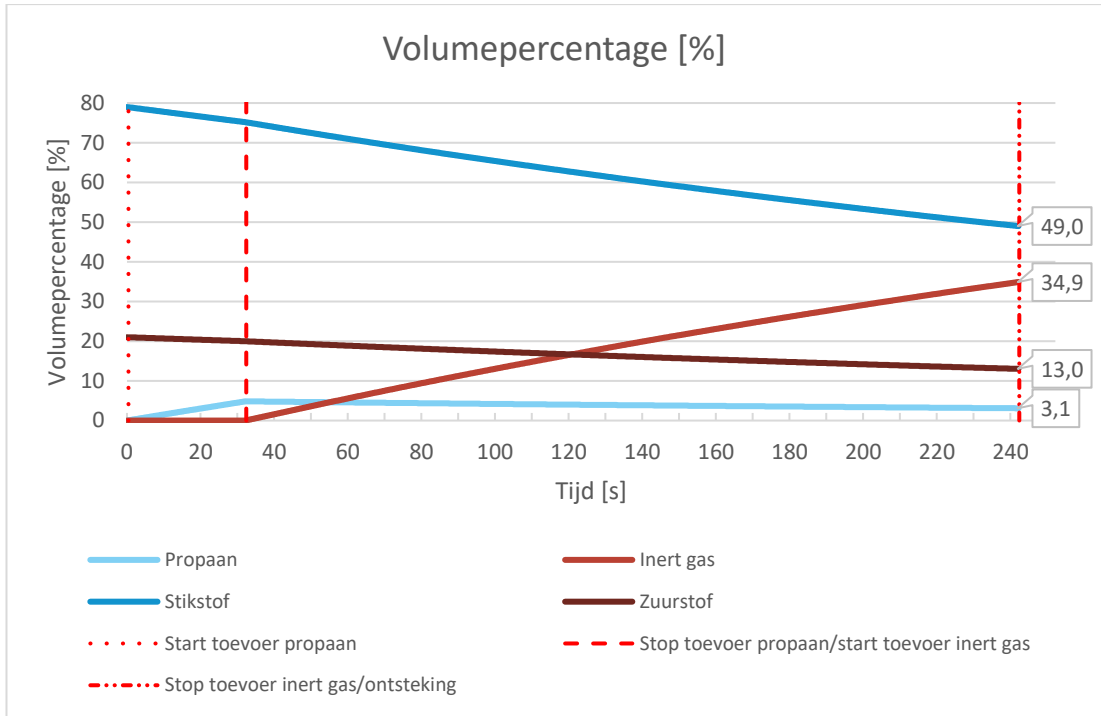


Test 12: Ontbranding bij 180 sec stikstof



Test 13 en 14: 210 seconden





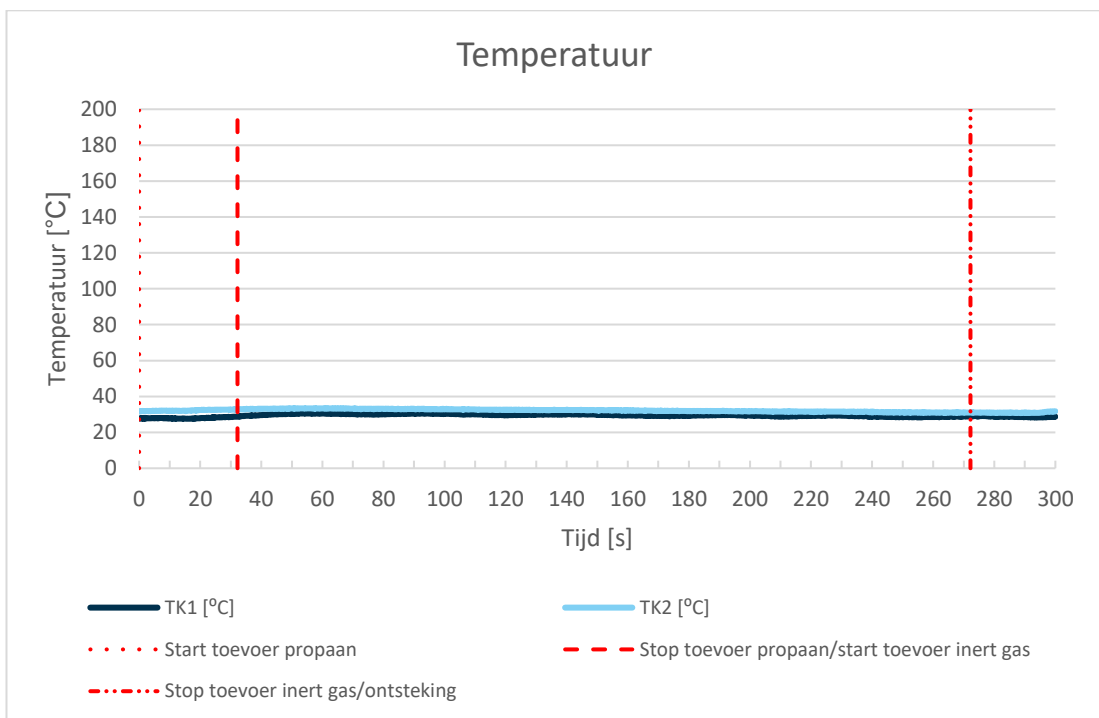
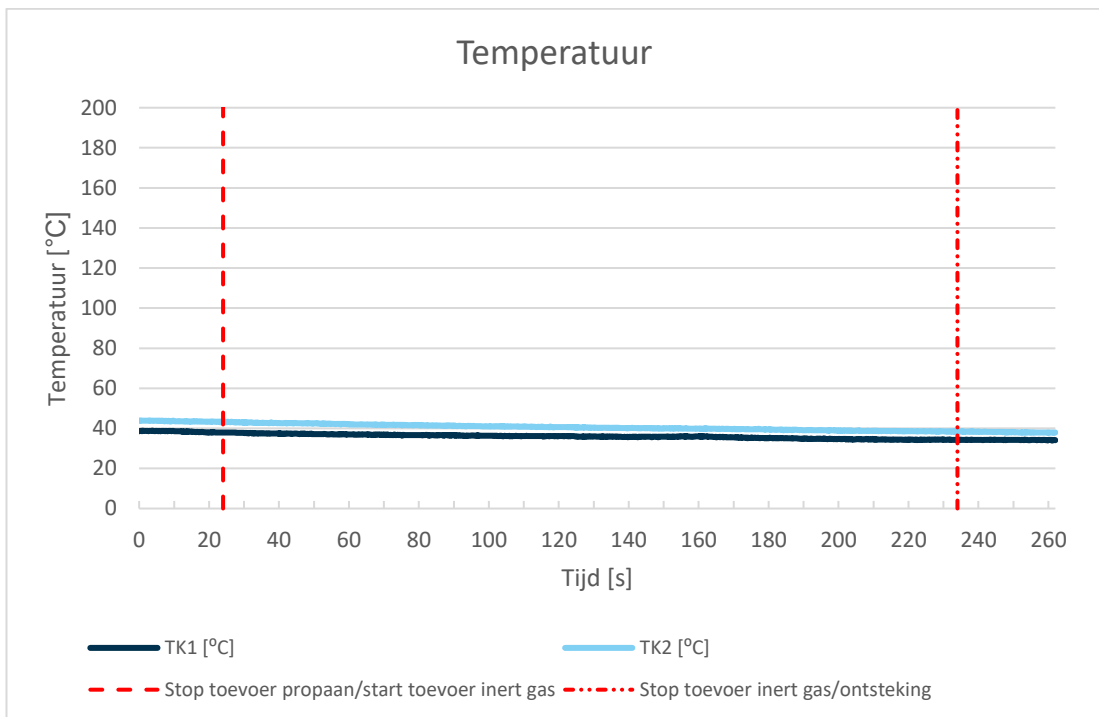
Test 13: Ontbranding bij 210 sec stikstof

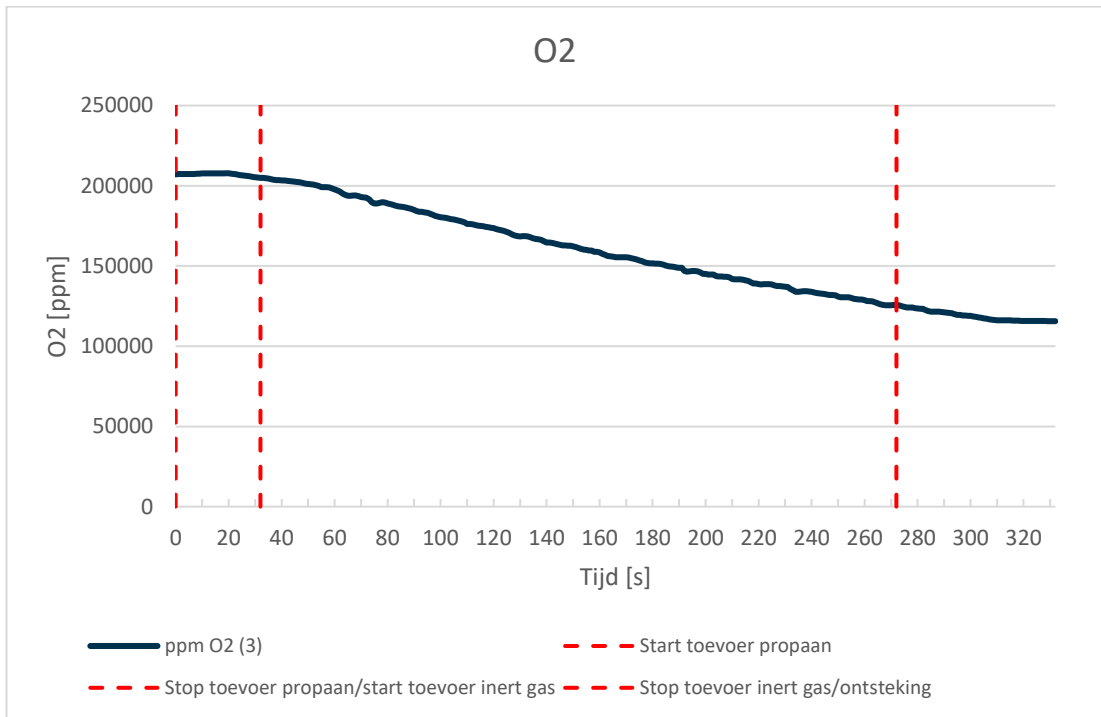
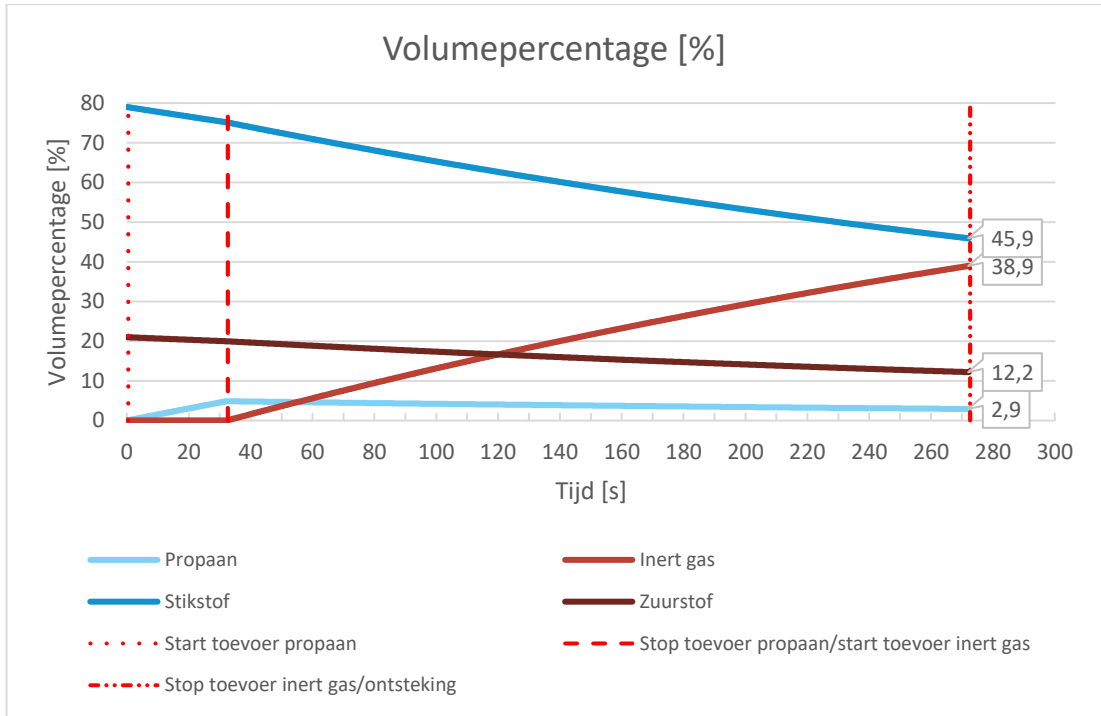


Test 14: Ontbranding bij 210 sec stikstof



Test 15 en 16: 240 seconden





Test 15: Ontbranding bij 240 sec stikstof

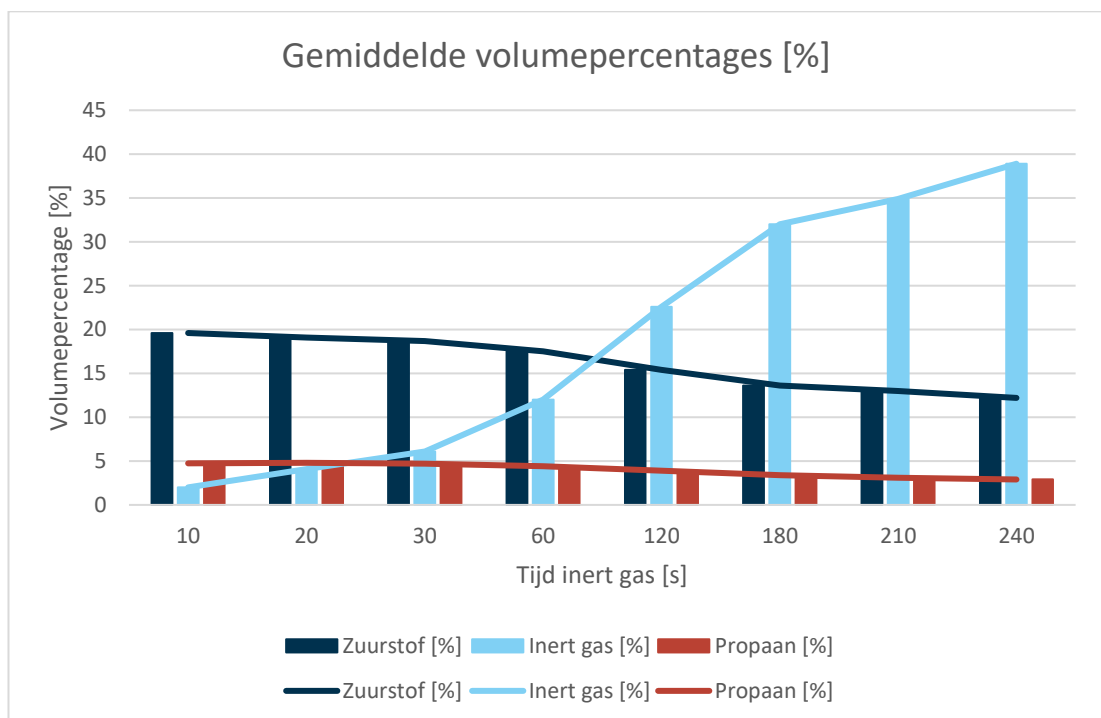


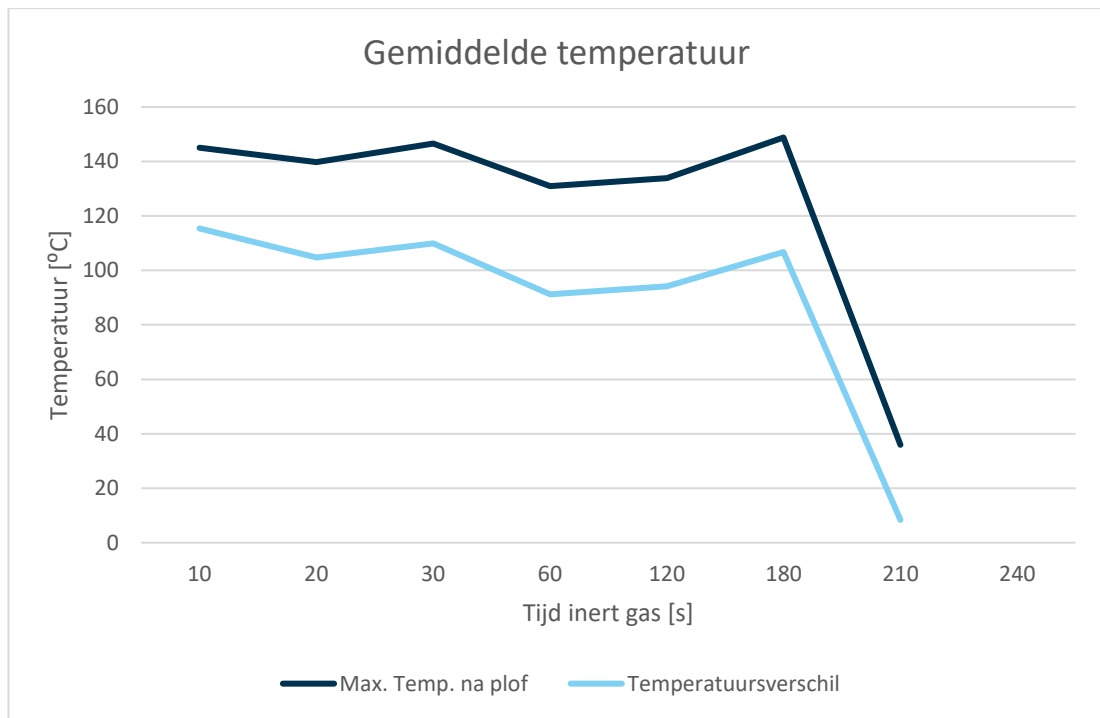
Test 16: Ontbranding bij 240 sec stikstof



Samenvatting resultaten stikstof koude gassen

Toevoertijd [s]	Volumepercentage [%]			Ontbranding [-]	Temperatuur [°C]	
	Zuurstof	Inert gas	Propaan		Max. na plof	Verschil
10	19,6	2	4,75	Ja	145	115
20	19,1	4,1	4,8	Ja	140	105
30	18,7	6,1	4,7	Ja	147	110
60	17,5	12	4,4	Ja	131	91
120	15,4	22,6	3,9	Ja	134	94
180	13,6	32	3,4	Ja	149	107
210	13	34,9	3,1	Ja	36	8
240	12,2	38,9	2,9	Nee	-	-





De totale toegevoerde hoeveelheid stikstof is maximaal 80 l. Dit komt overeen met een maximaal toegevoerd volumepercentage van maximaal 48,1 % (het resulterend volumepercentage in de plofkast bedraagt 39 %). Het resulterend volumepercentage komt overeen met waarden uit de literatuur van circa 40 %.

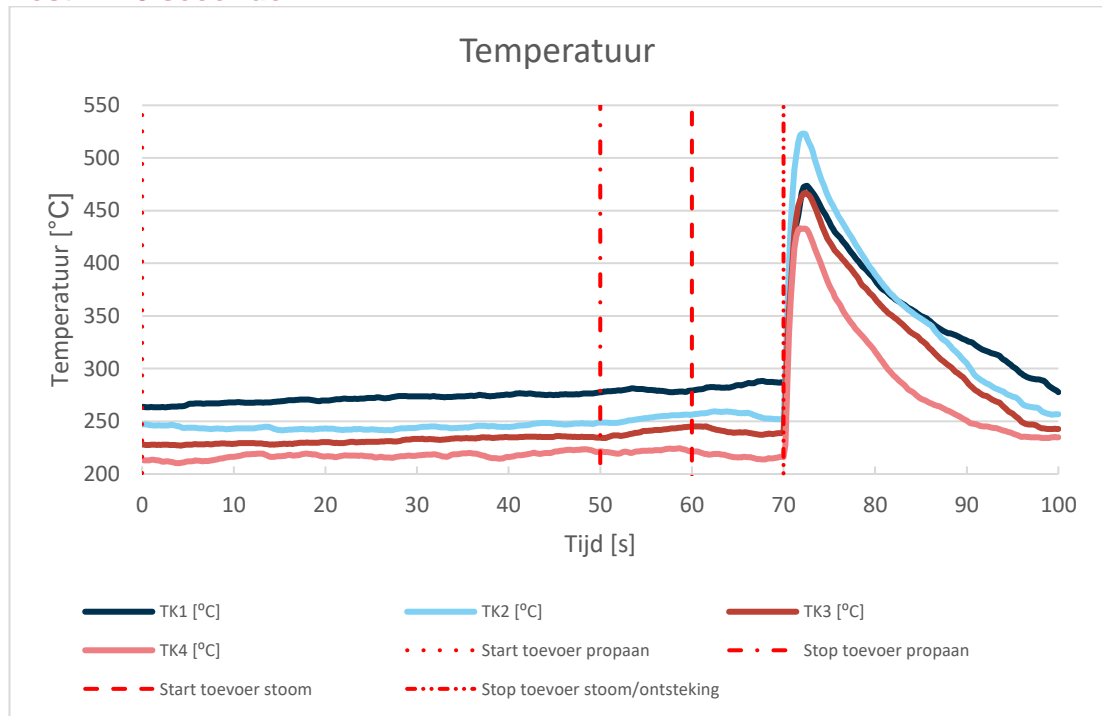
1.1 Samenvatting resultaten experimenten koude gassen

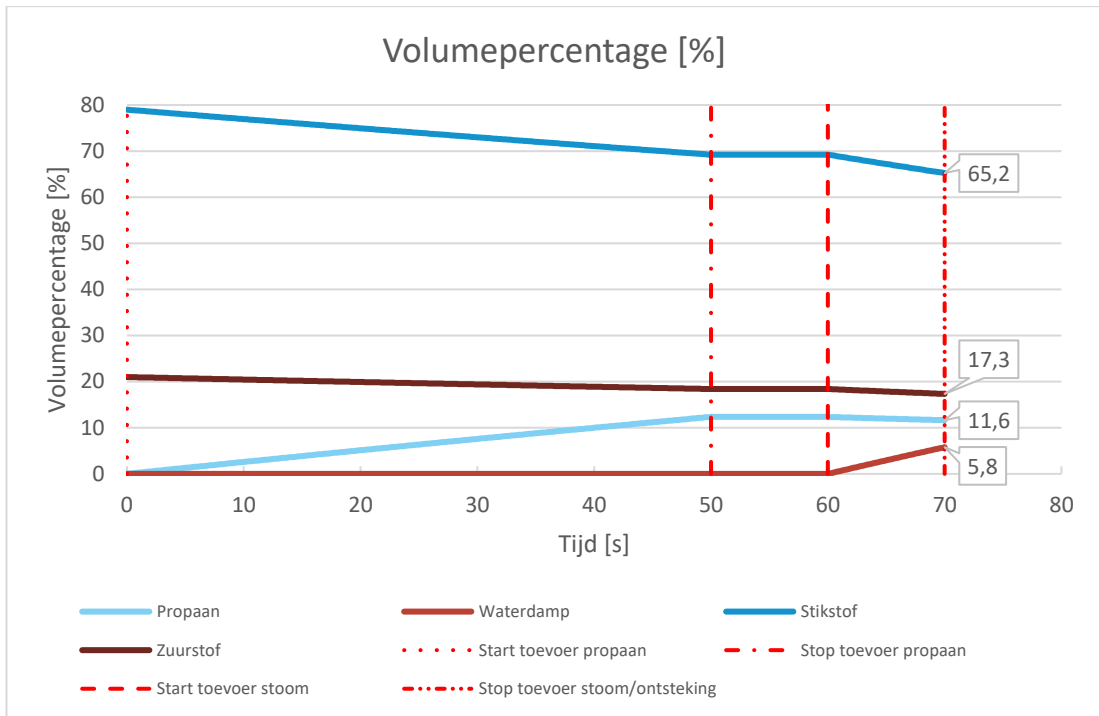
Tijd [s]	Volumepercentage [%]					
	Stoom	Plof	Nevel	Plof	Stikstof	Plof
10	3,5	Ja	4	Ja	2	Ja
20	6,2	Ja	4,4	Ja	4,1	Ja
30	7,9	Ja	3,7	Ja	6,1	Ja
60	8,7	Ja	3,4	Ja	12	Ja
120	12,5	Ja	3,1	Ja	22,6	Ja
180	-	-	-	-	32	Ja
210	-	-	-	-	34,9	Ja
240	-	-	-	-	38,9	Nee
300	19,7	Ja	2,5	Ja	-	-

Bijlage 3 Resultaten met warme gassen

Stoom

Test 1: 10 seconden

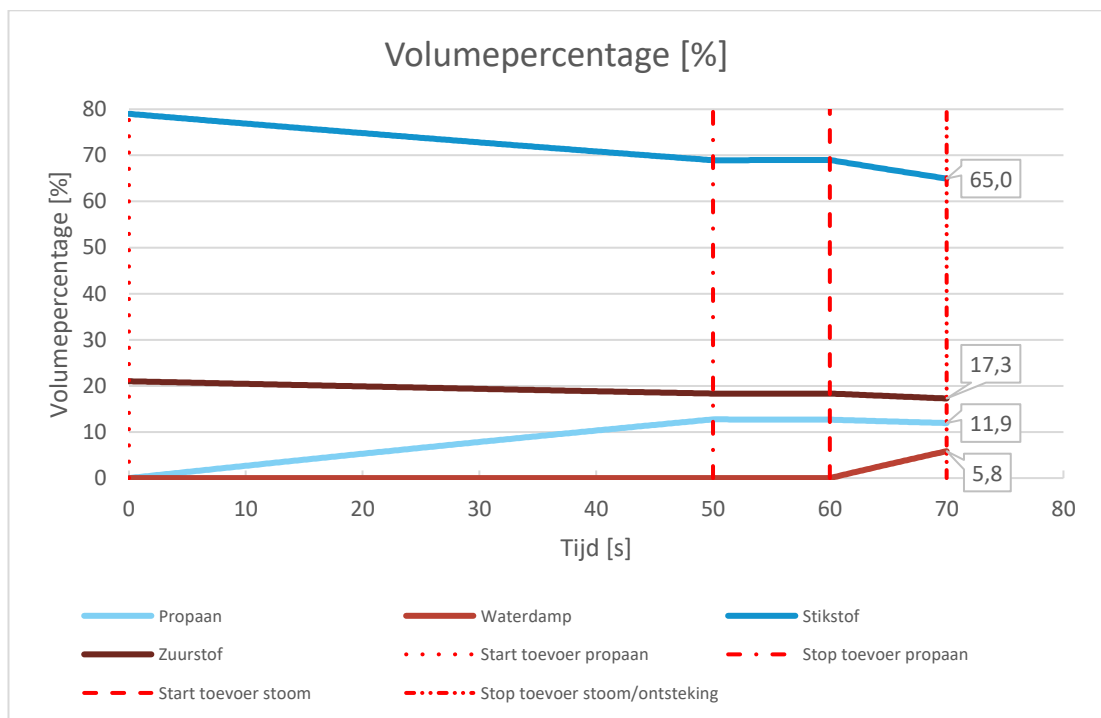
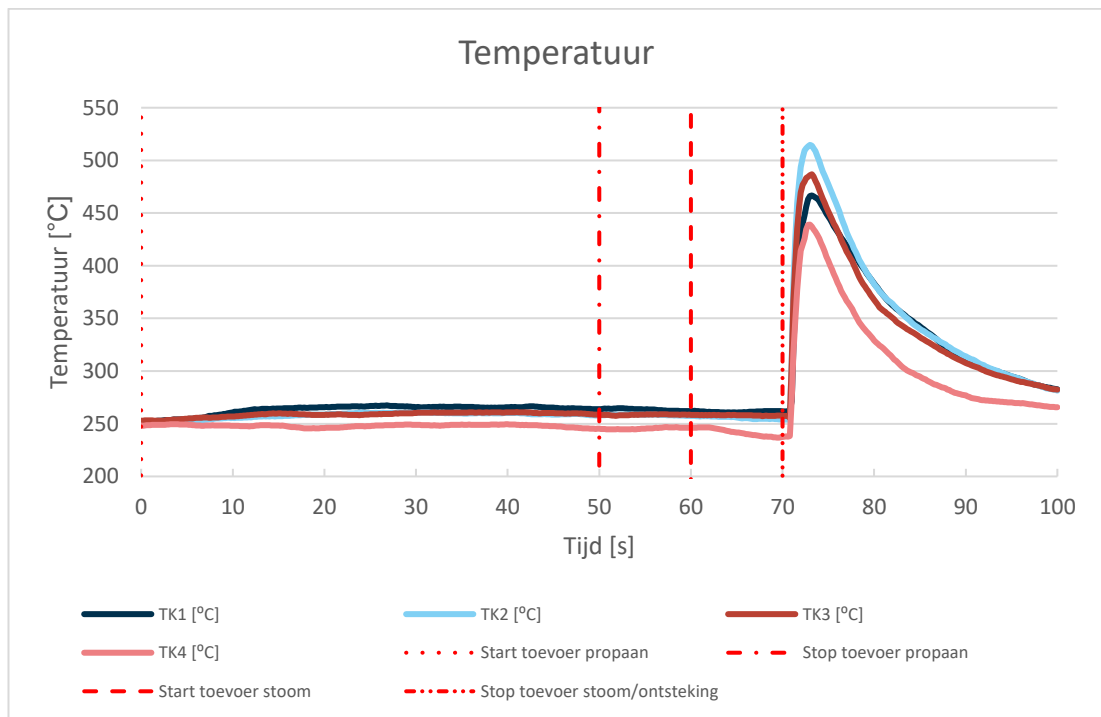




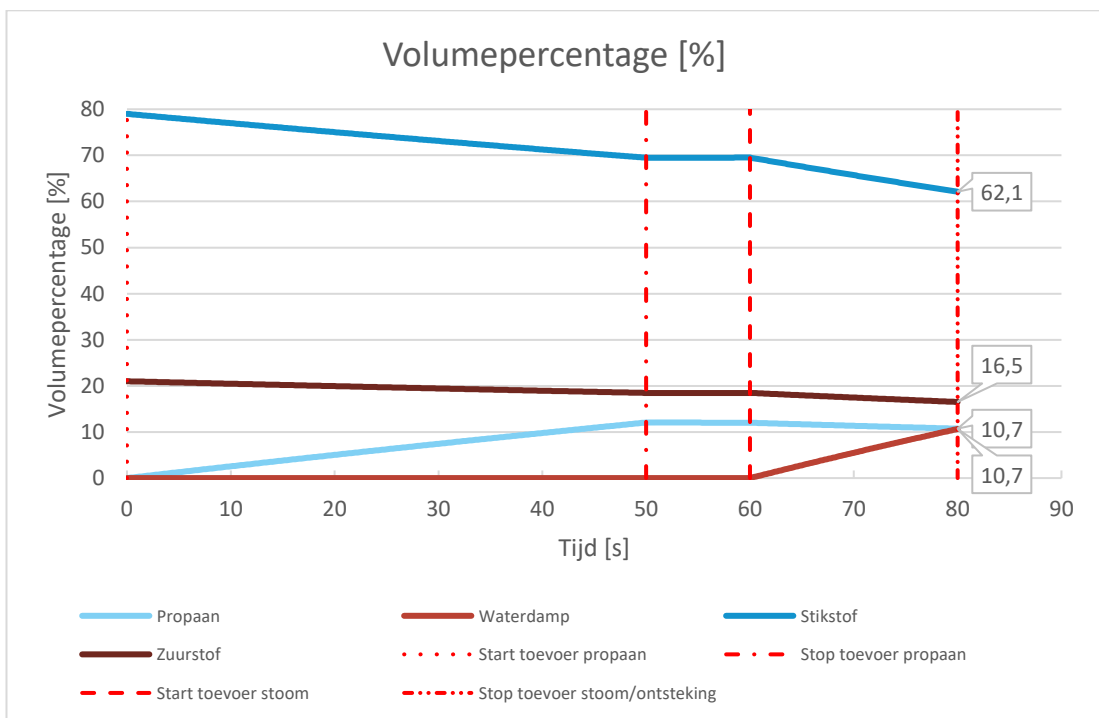
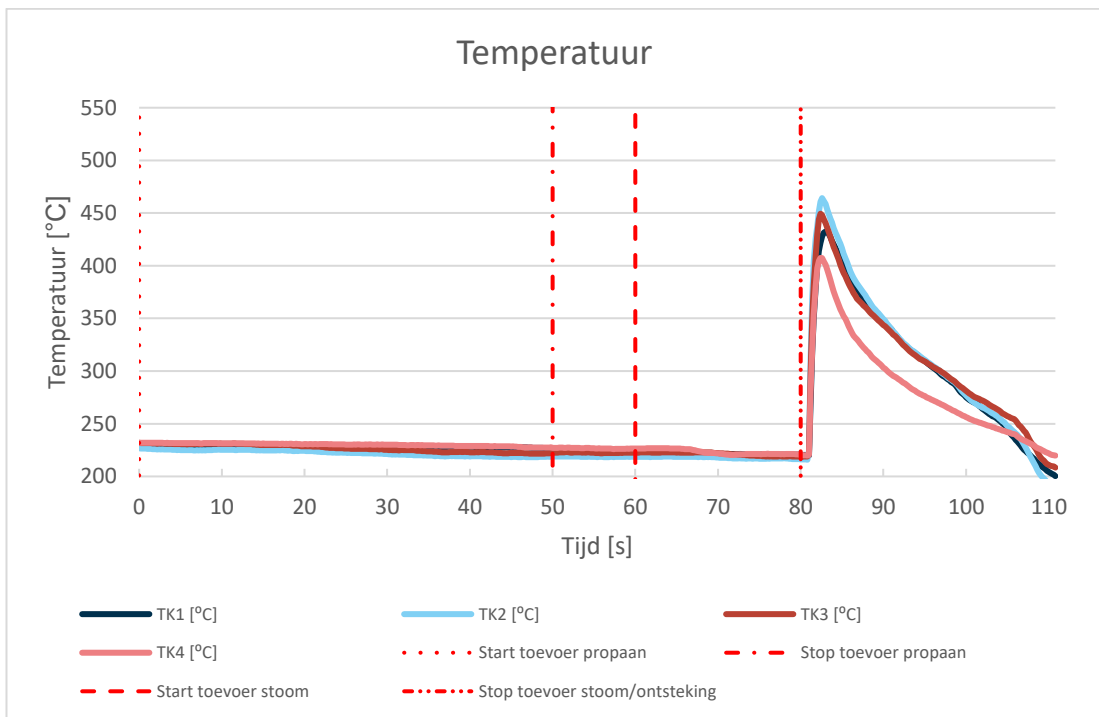
Test 1: Ontbranding bij 10 sec stoom



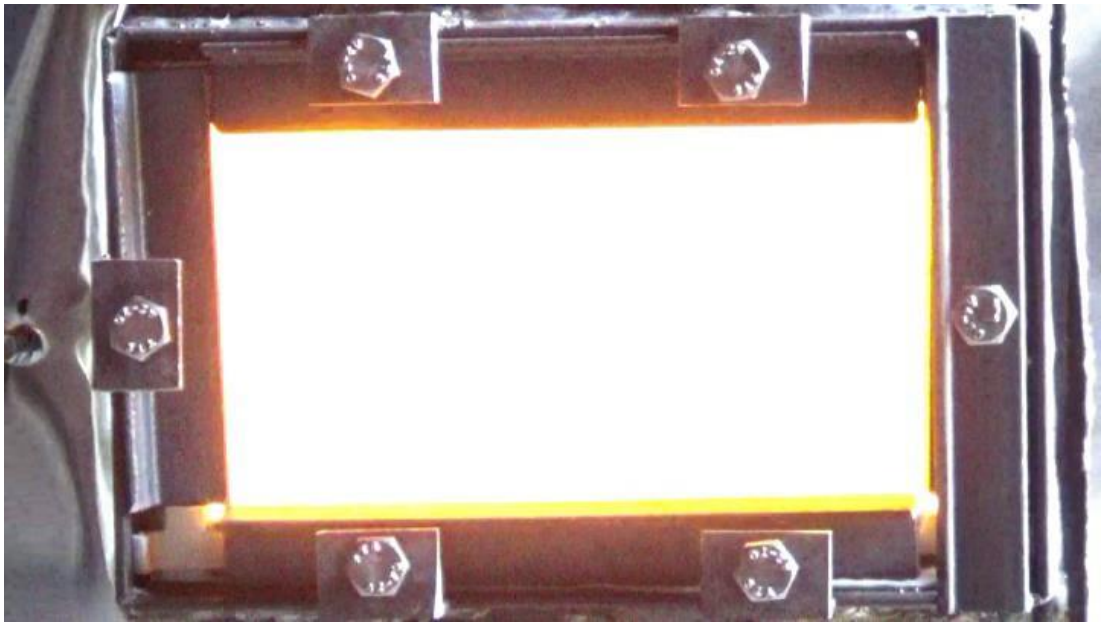
Test 2: 10 seconden



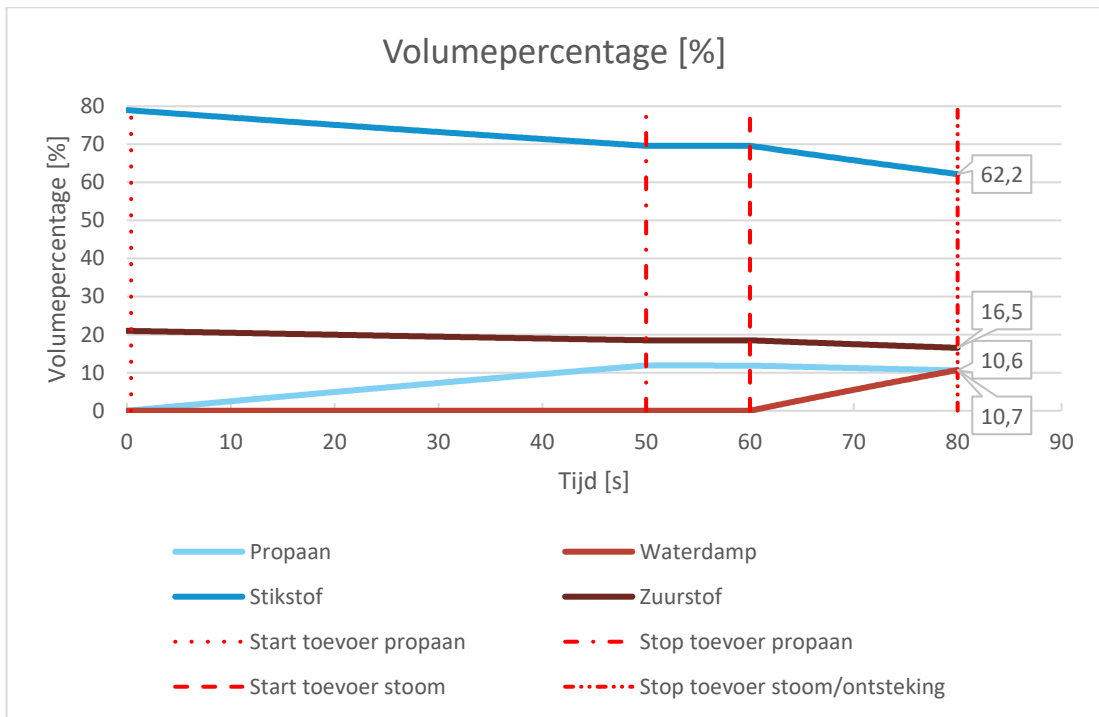
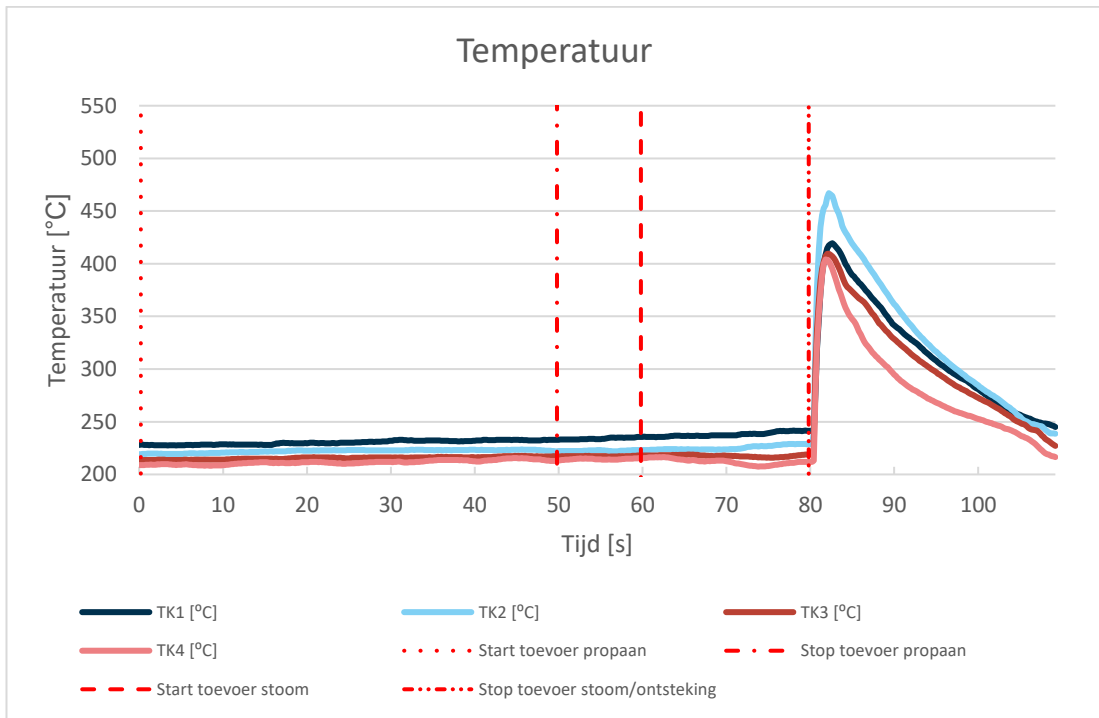
Test 3: 20 seconden



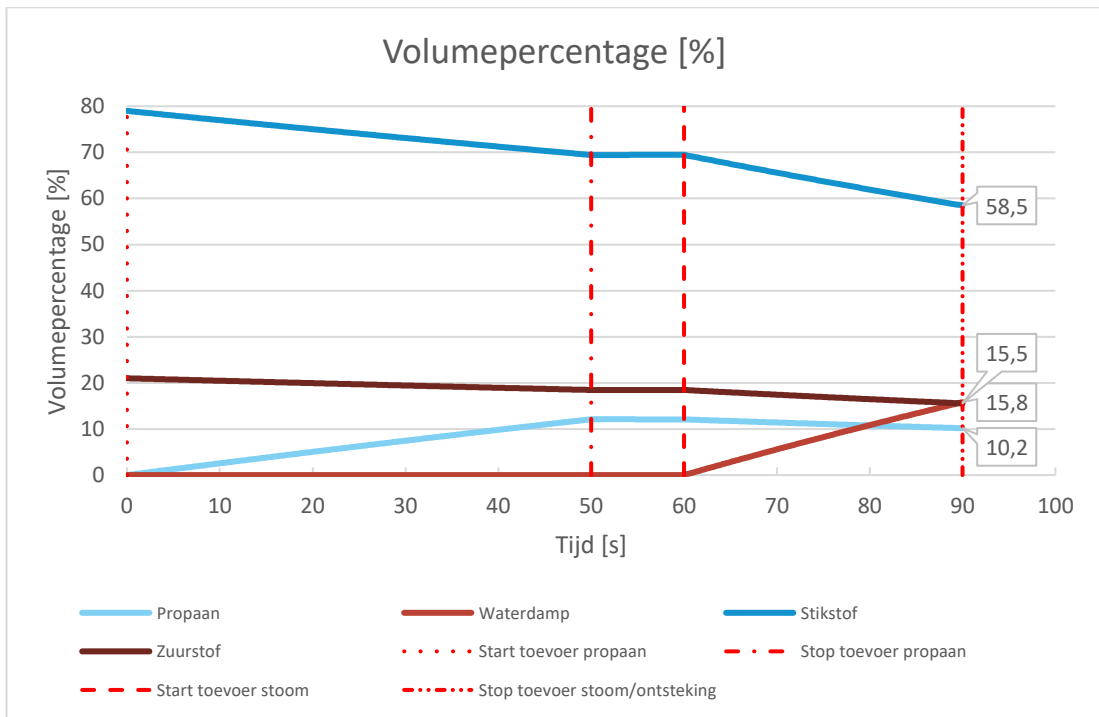
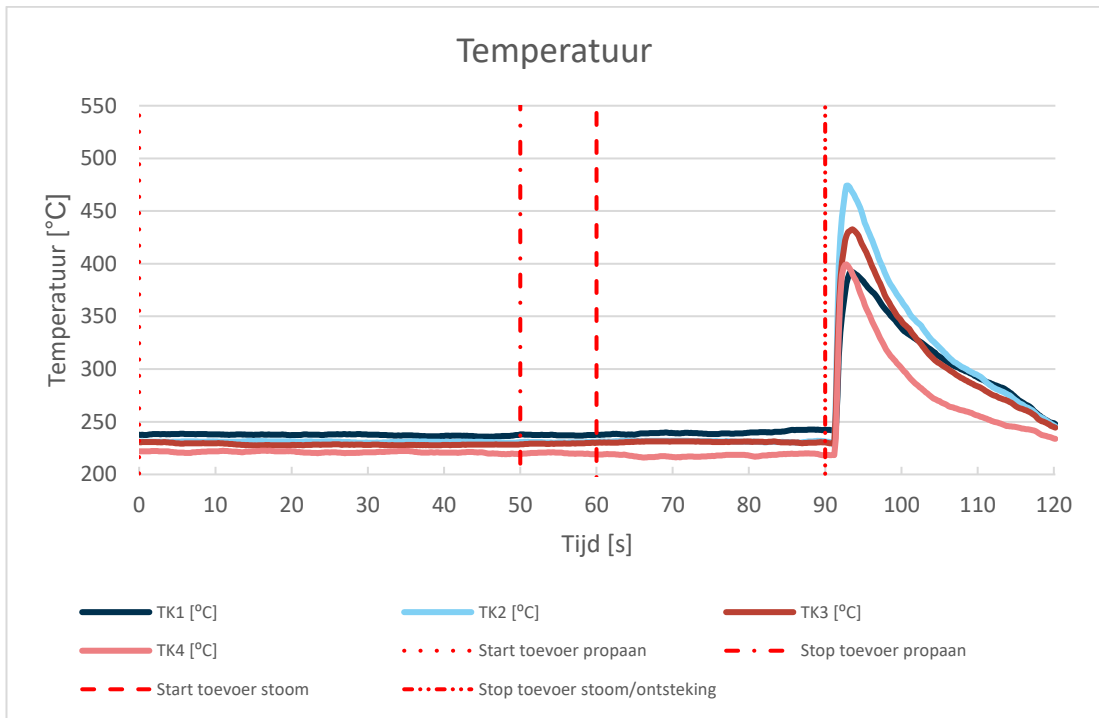
Test 3: Ontbranding bij 20 sec stoom



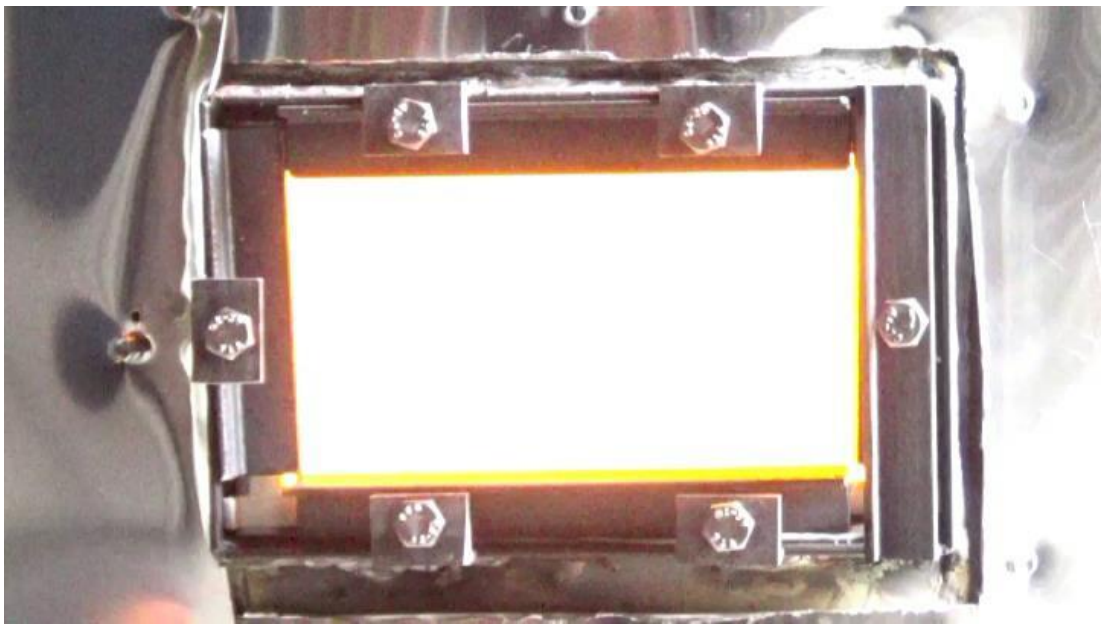
Test 4: 20 seconden



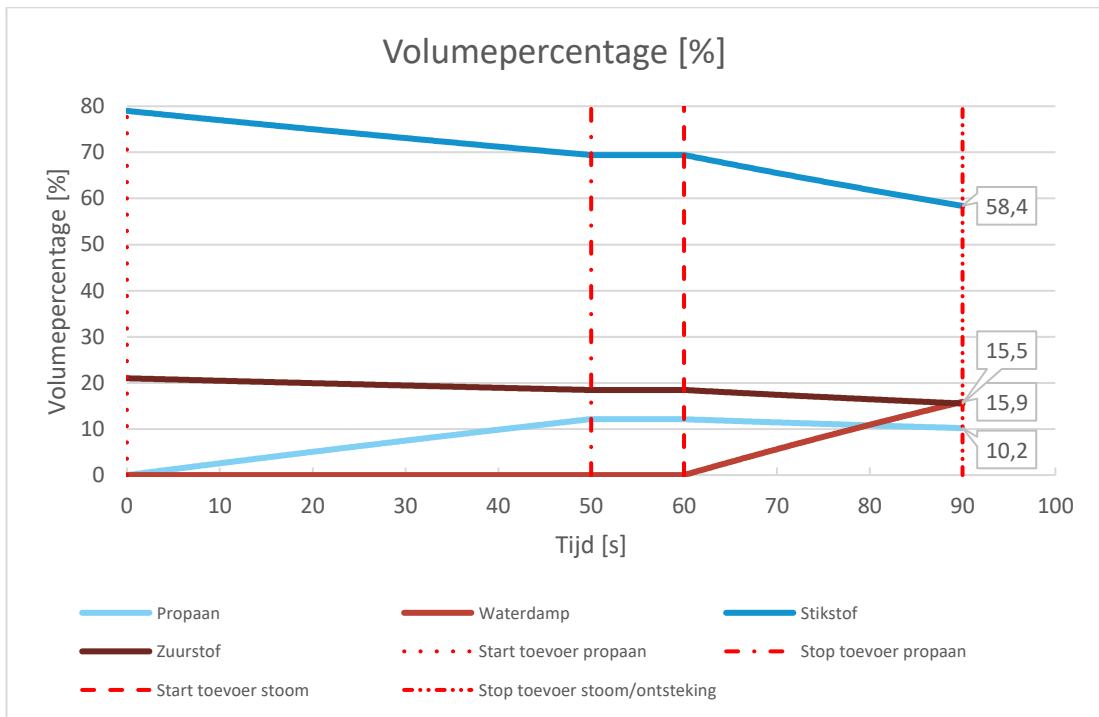
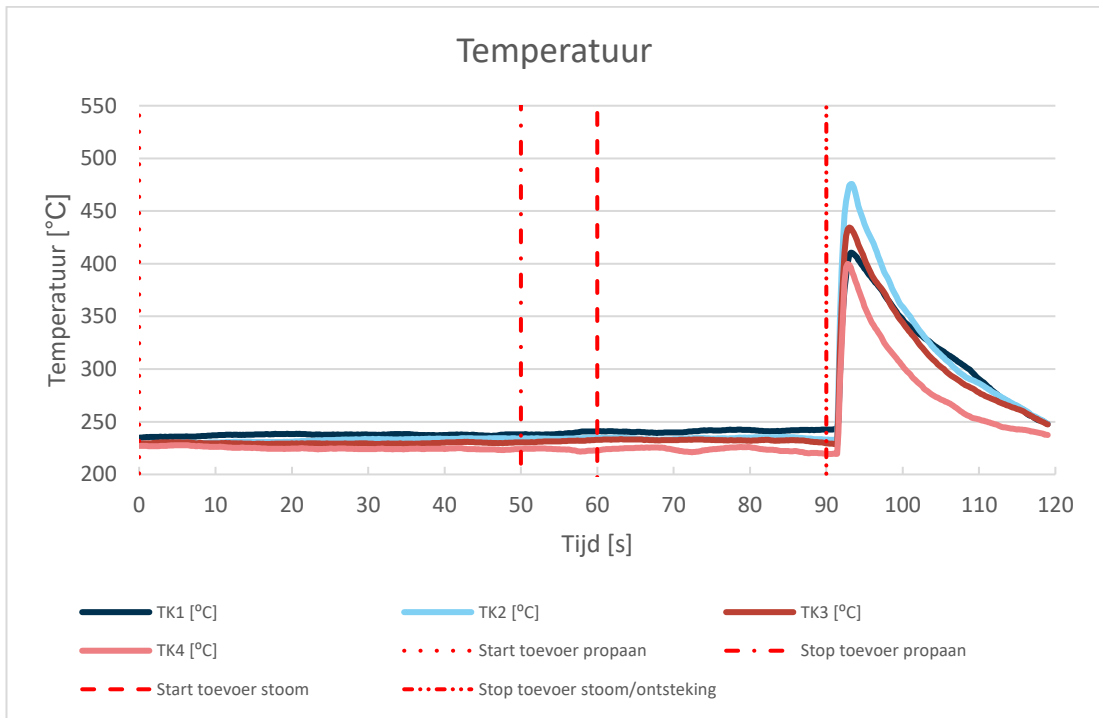
Test 5: 30 seconden



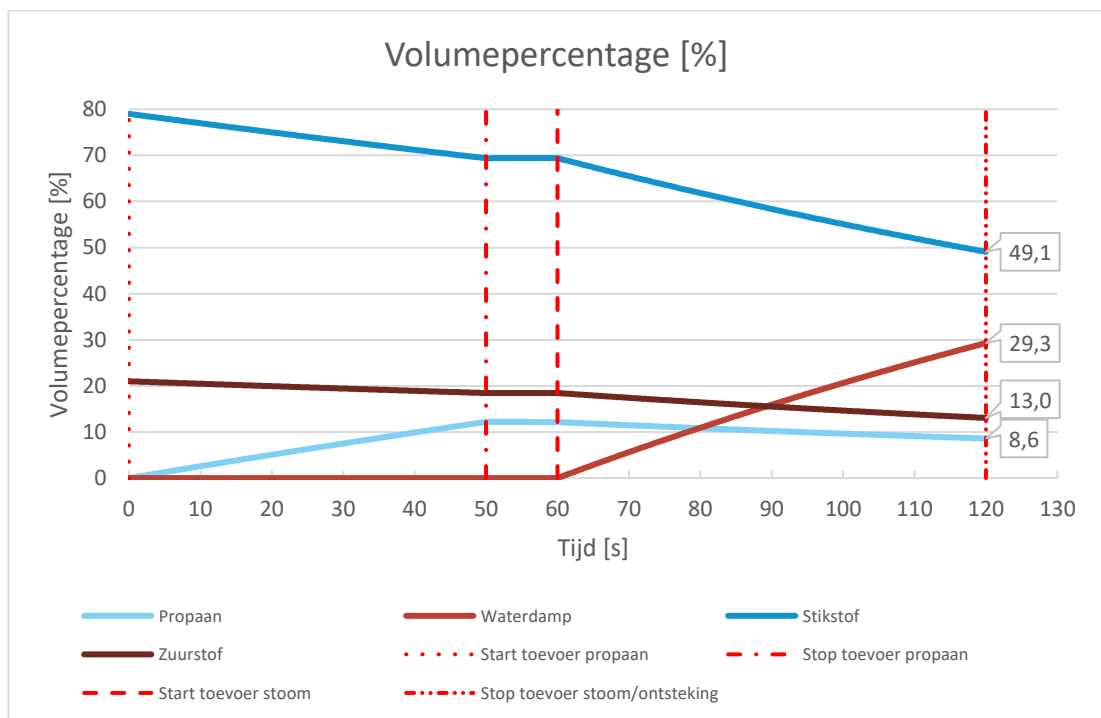
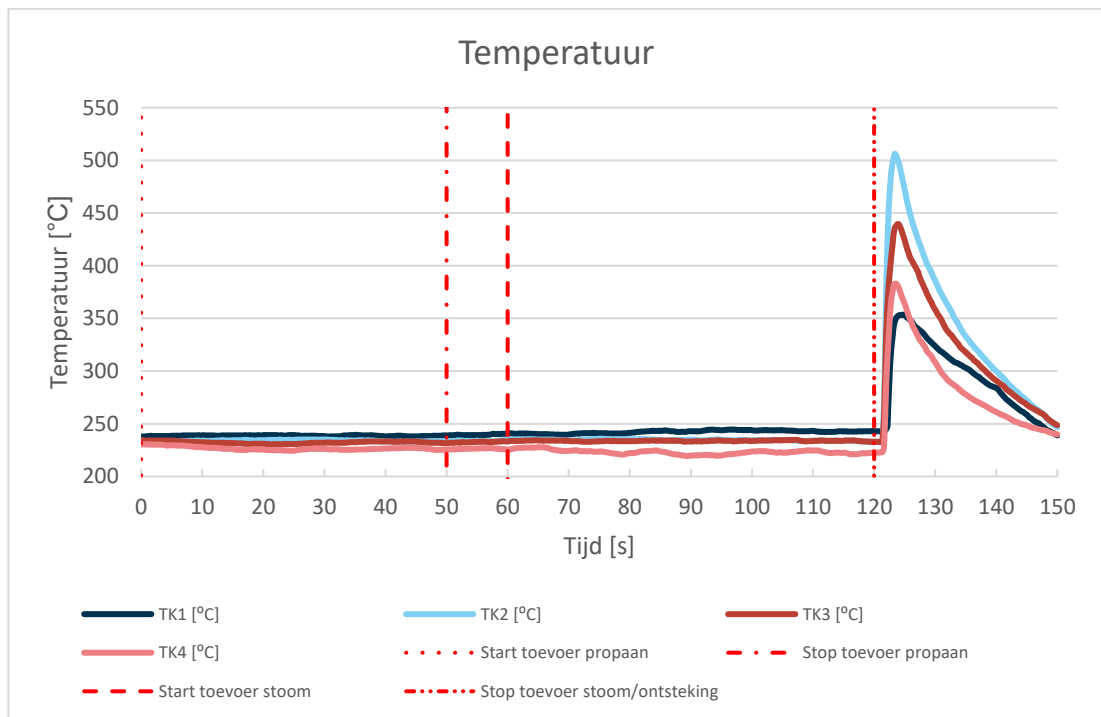
Test 5: Ontbranding bij 30 sec stoom



Test 6: 30 seconden



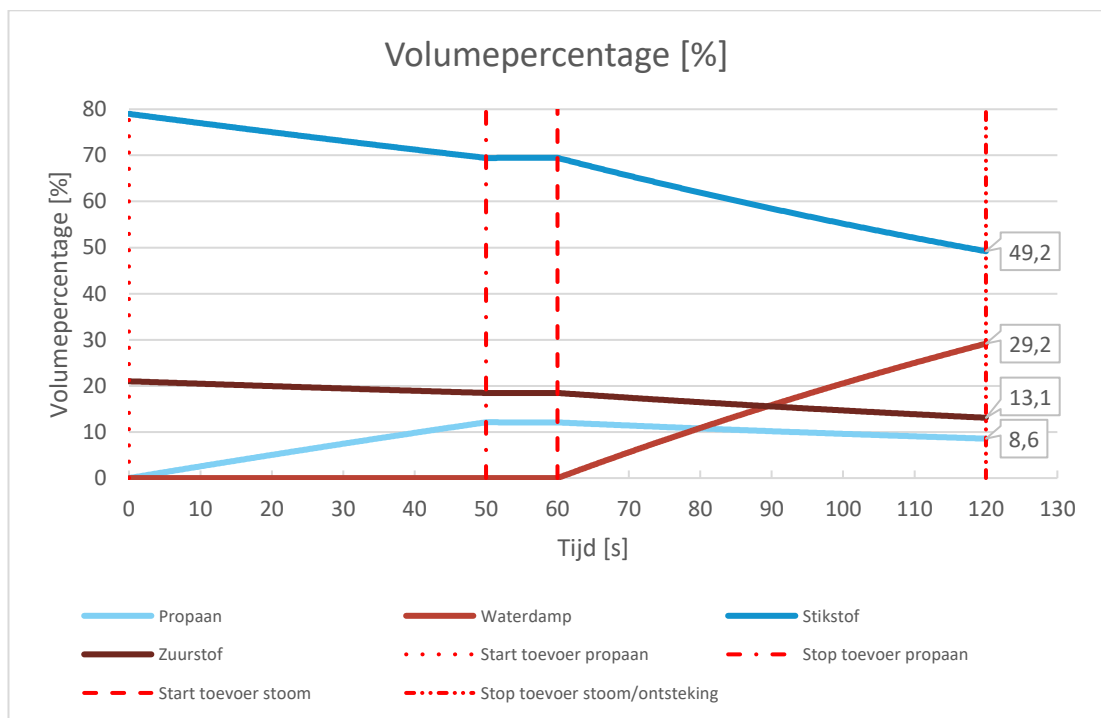
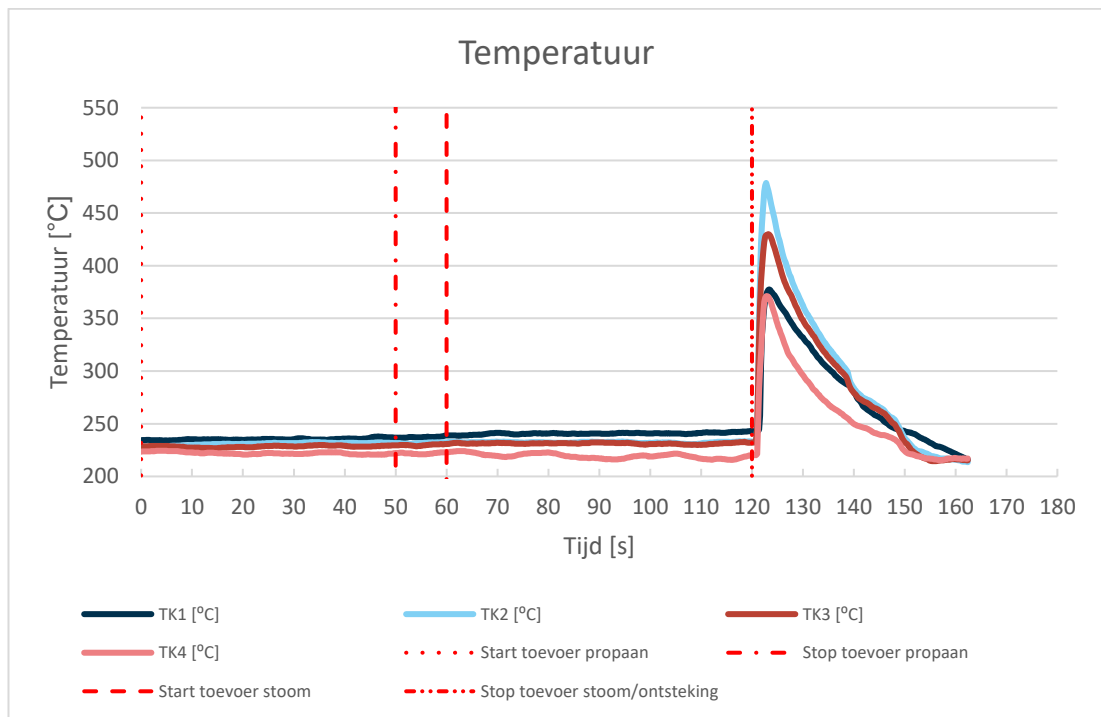
Test 7: 60 seconden



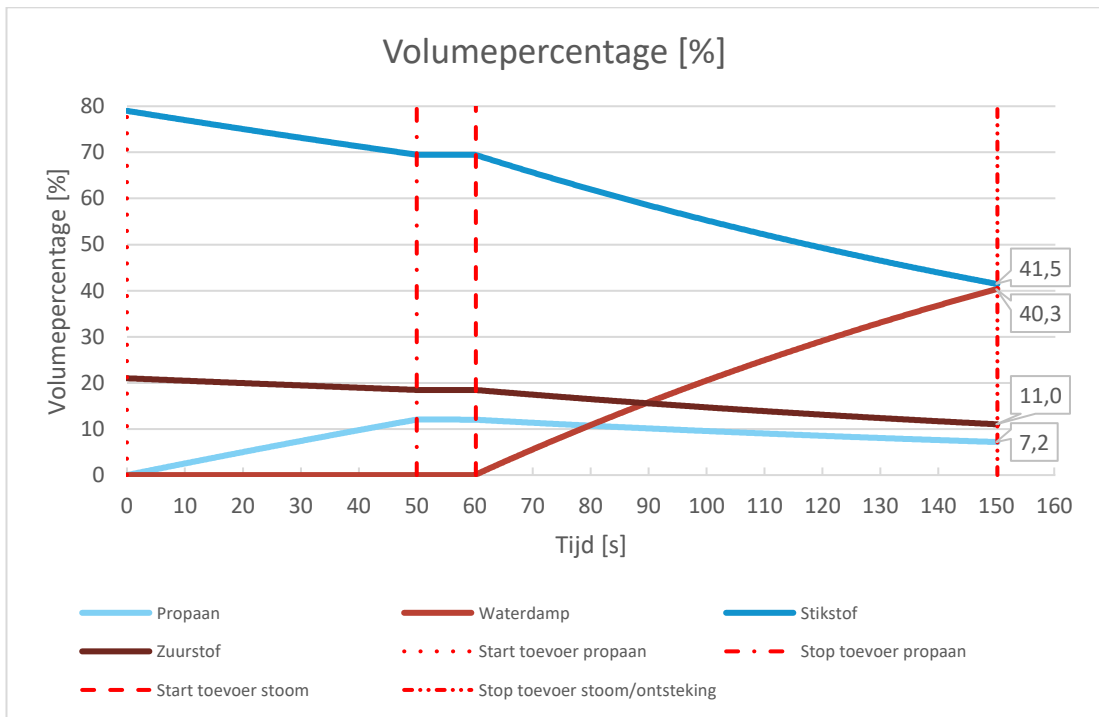
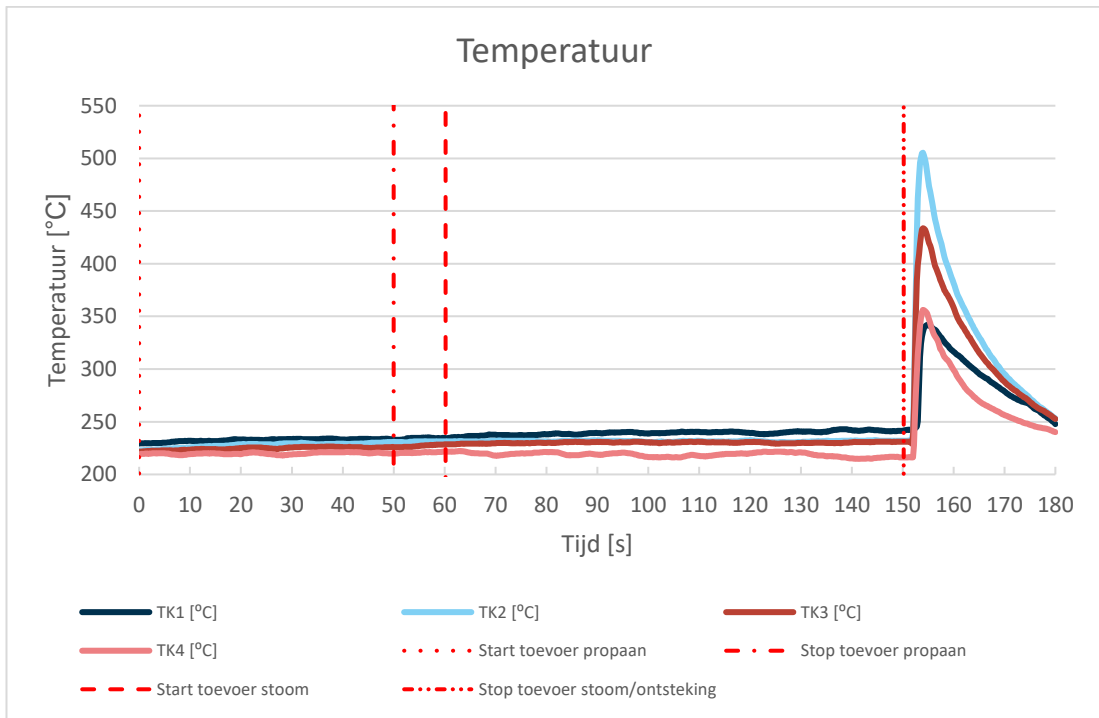
Test 7: Ontbranding bij 60 sec stoom



Test 8: 60 seconden



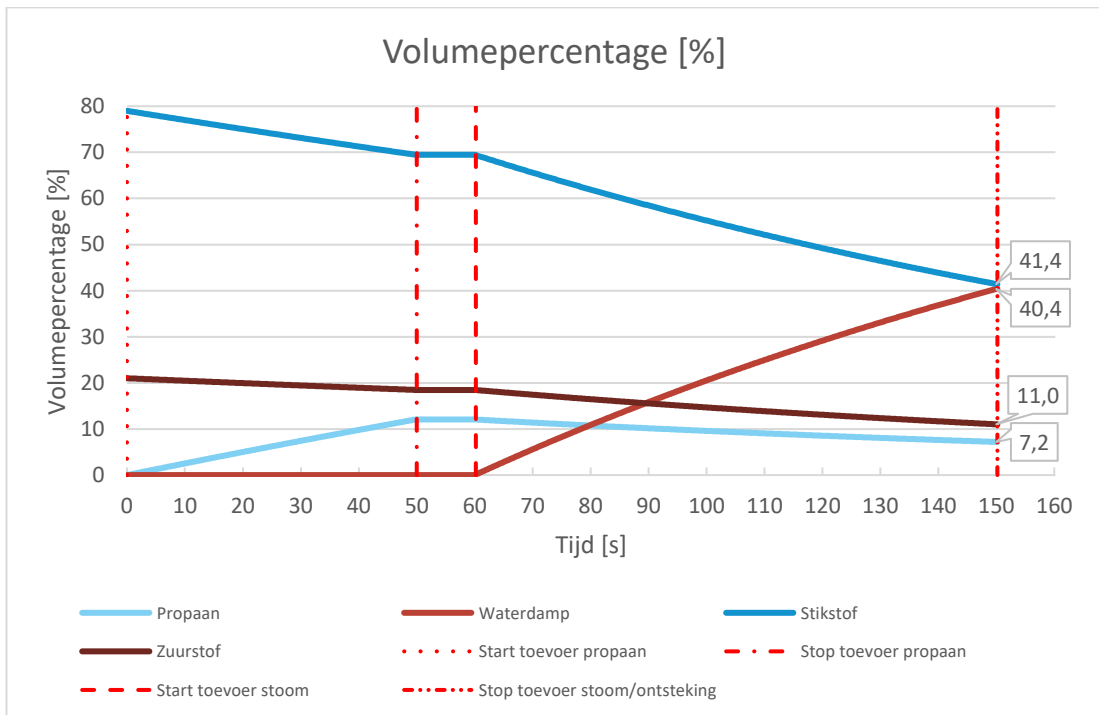
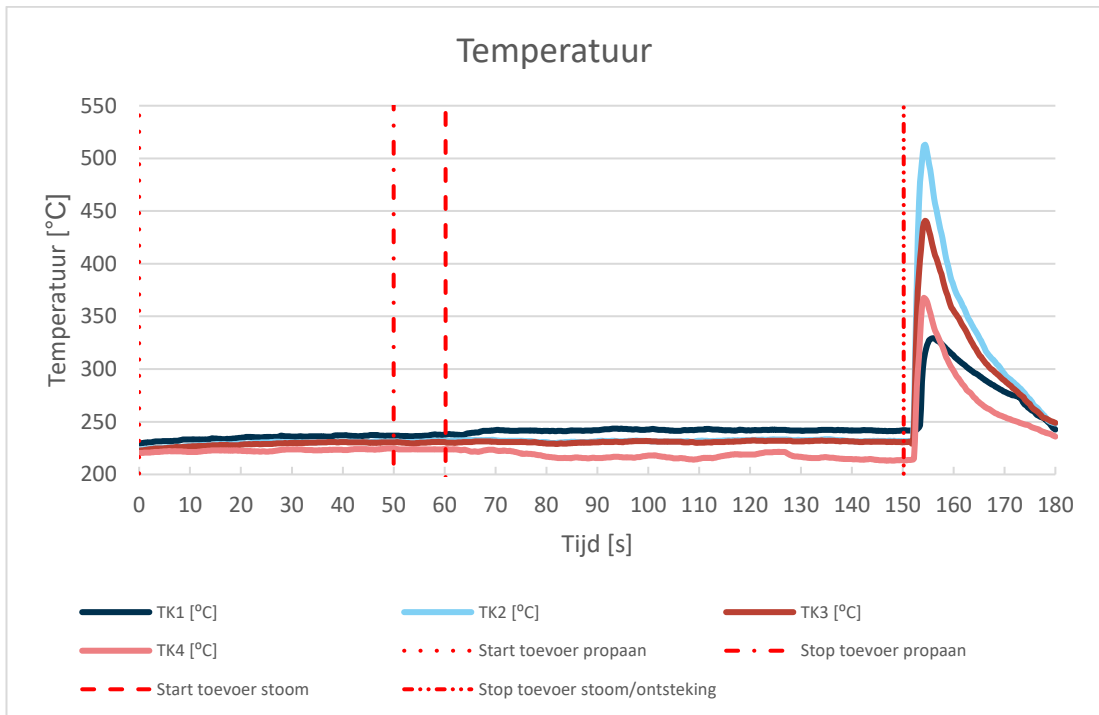
Test 9: 90 seconden



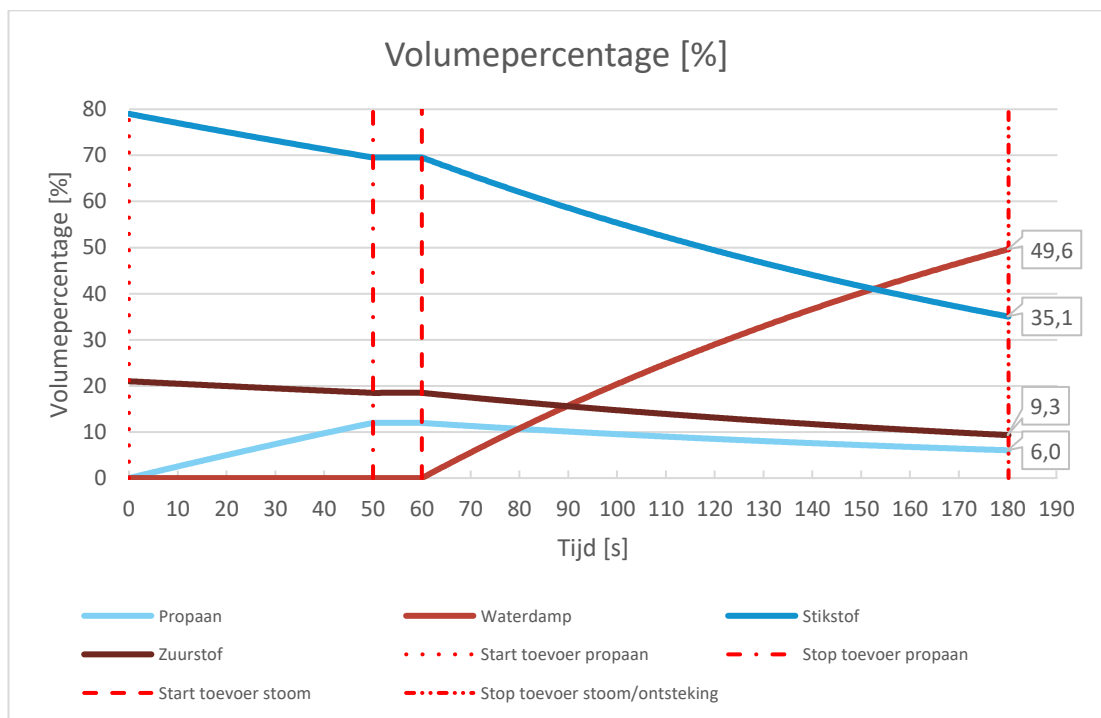
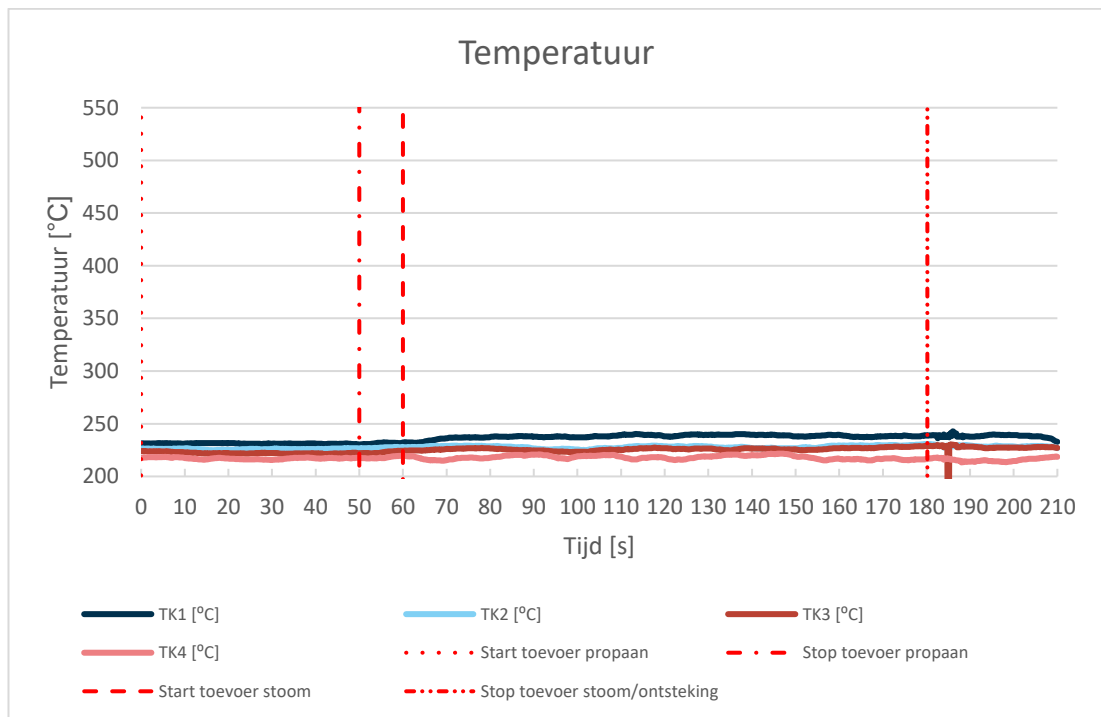
Test 9: Ontbranding bij 90 sec stoom



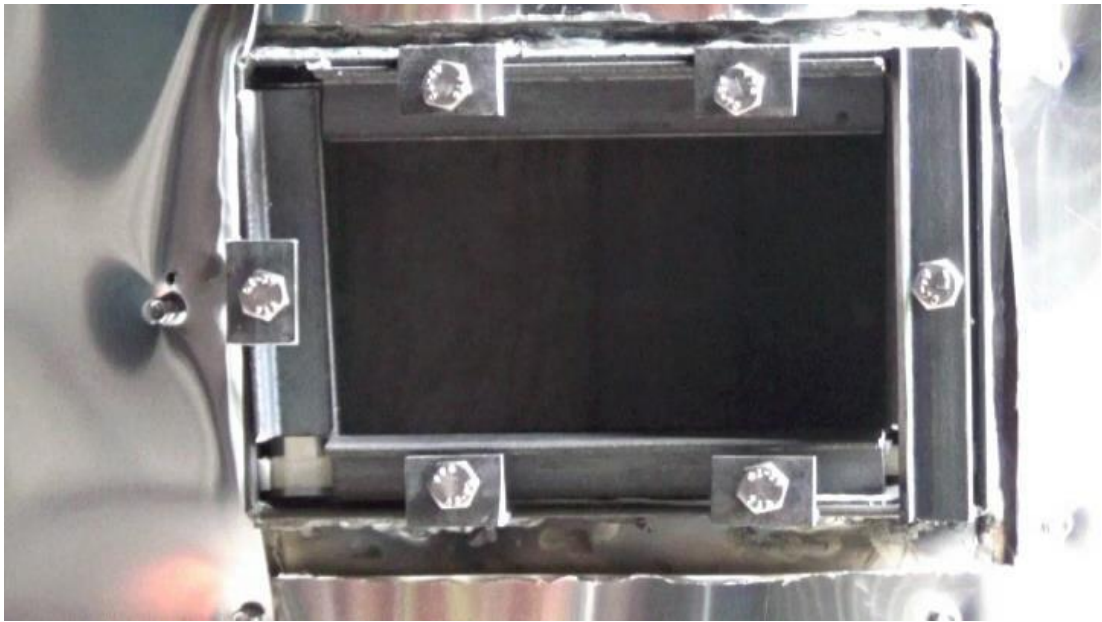
Test 10: 90 seconden



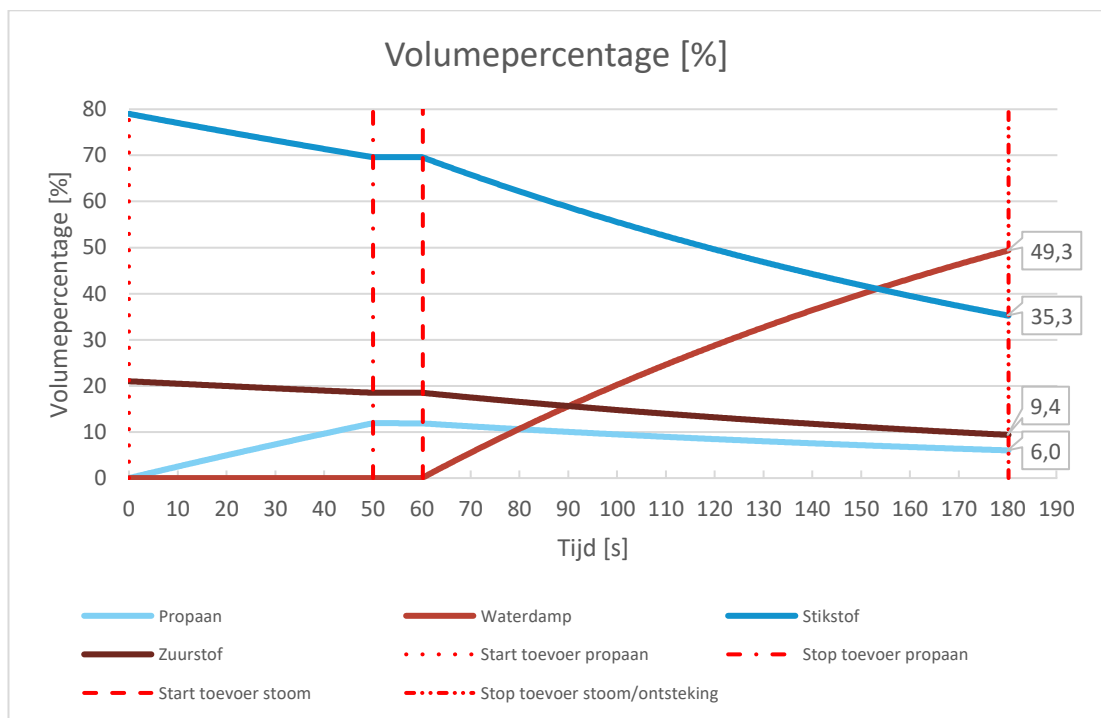
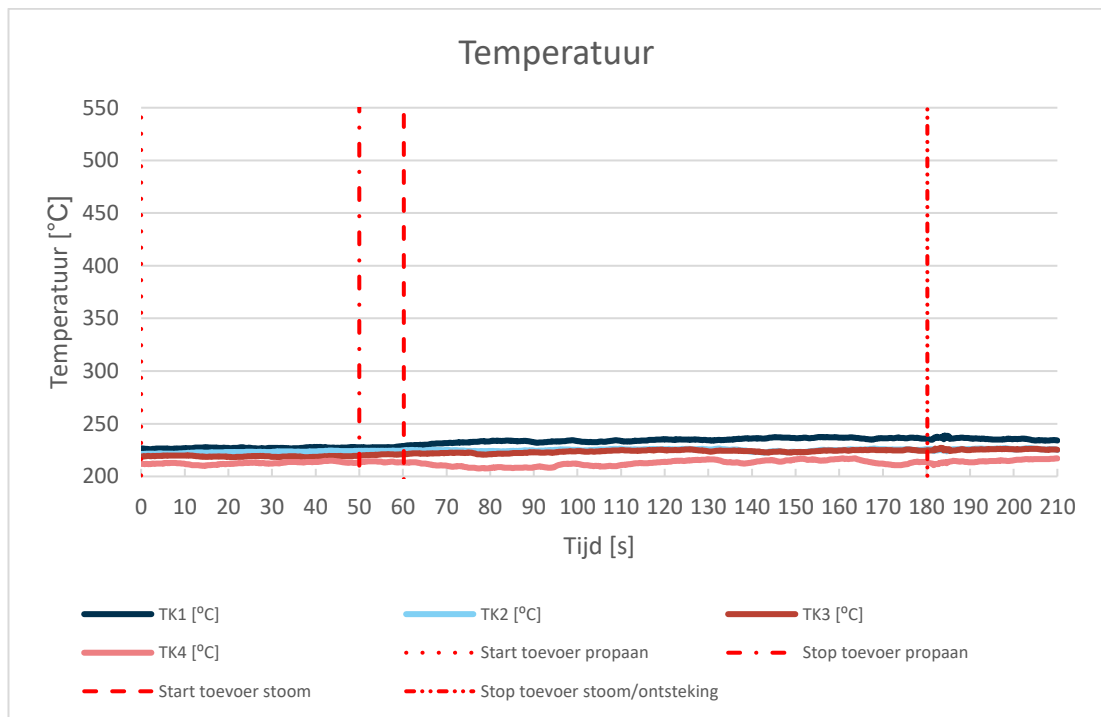
Test 11: 120 seconden



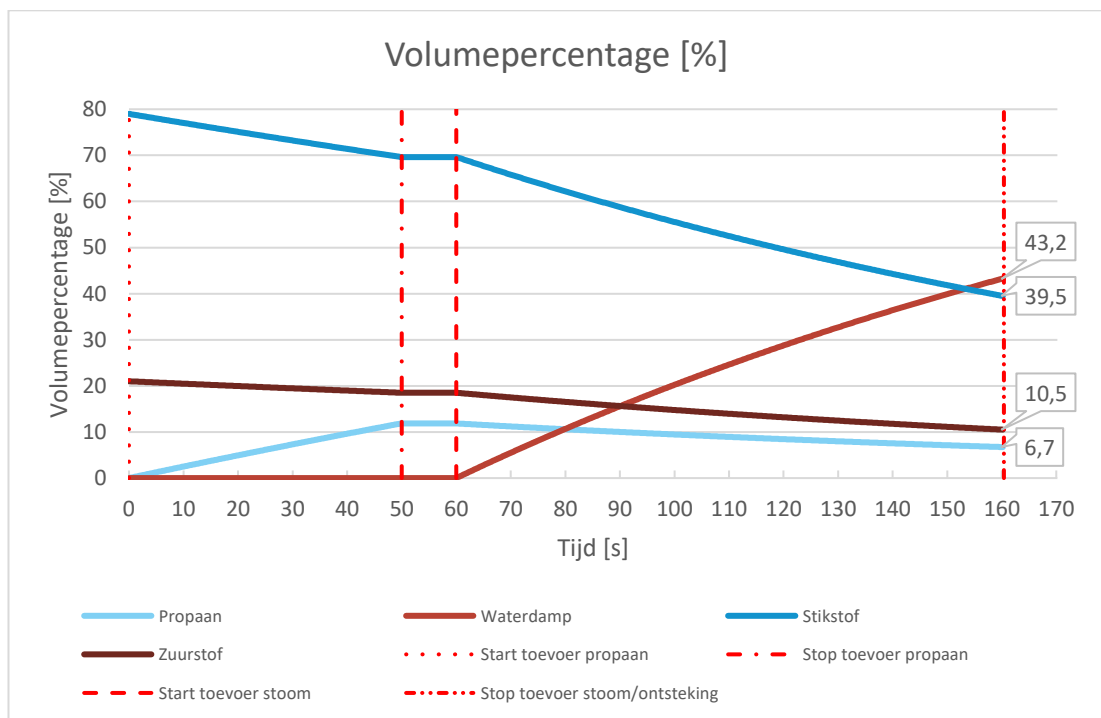
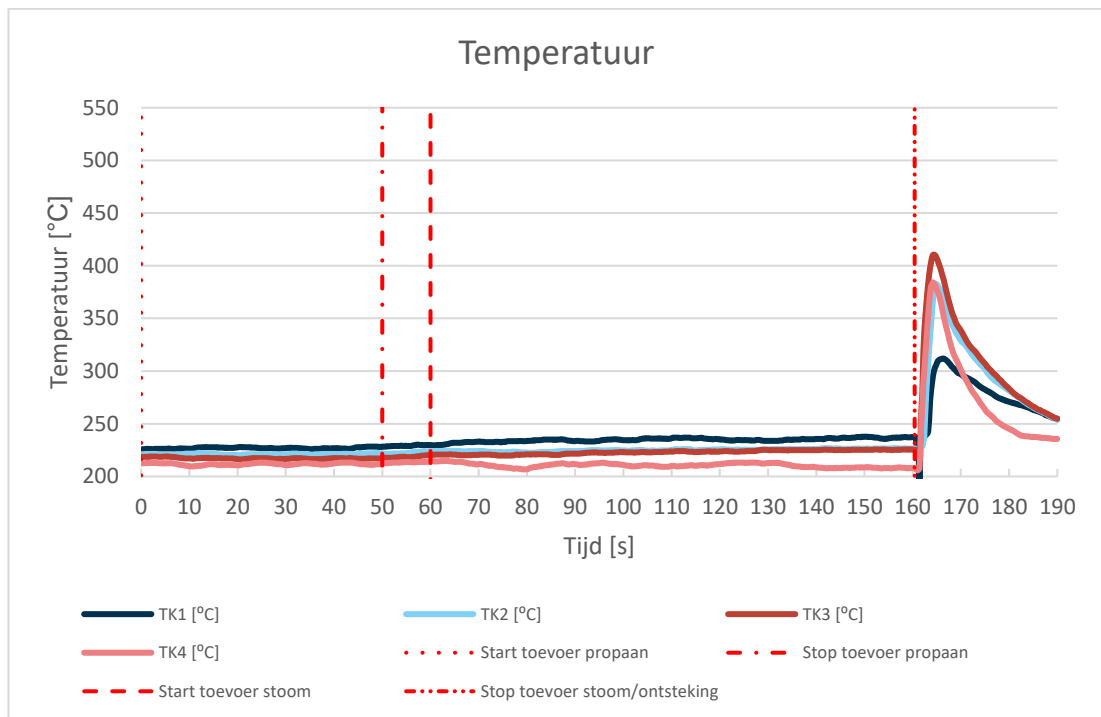
Test 11: Ontbranding bij 120 sec stoom



Test 12: 120 seconden



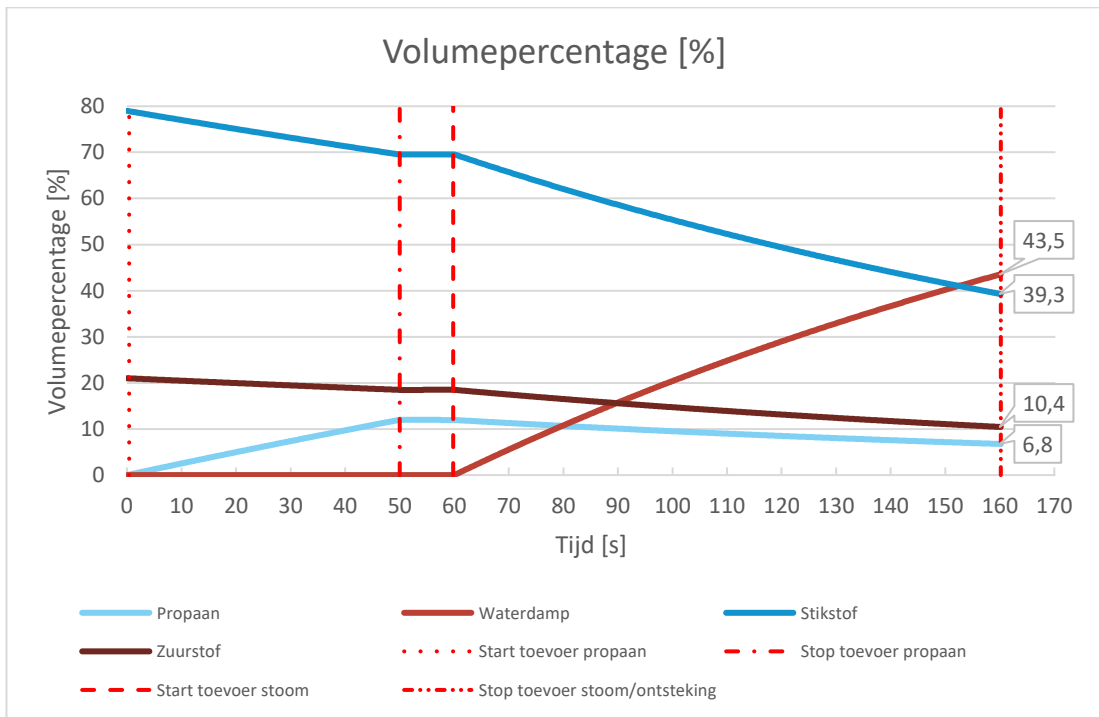
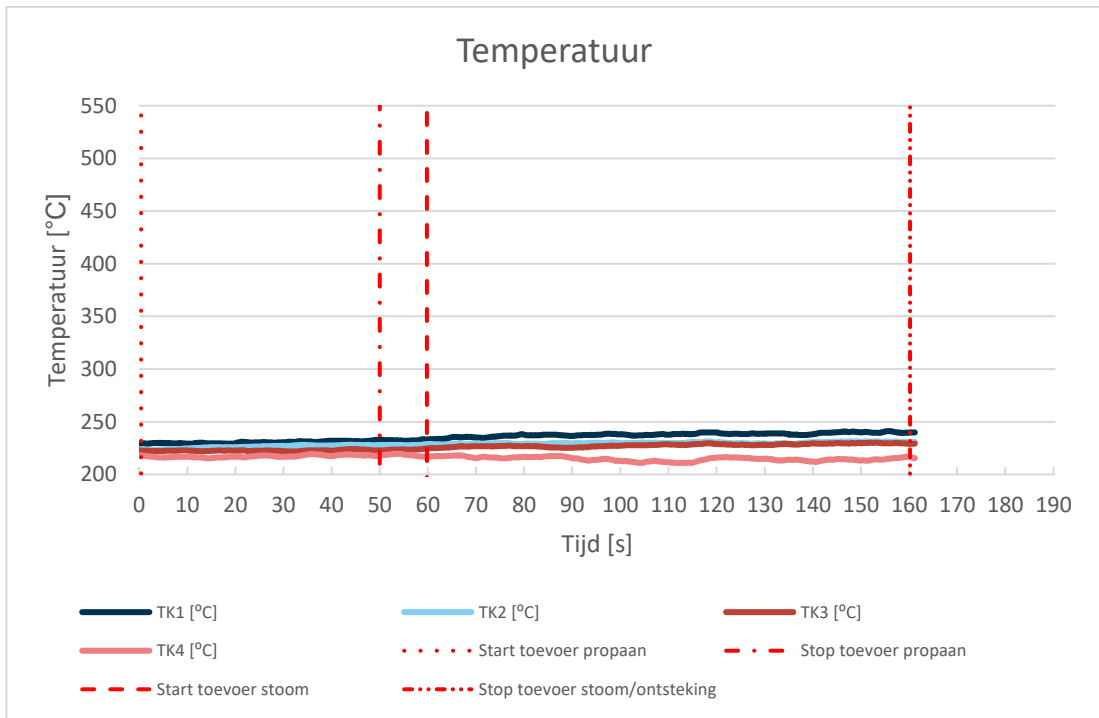
Test 13: 100 seconden



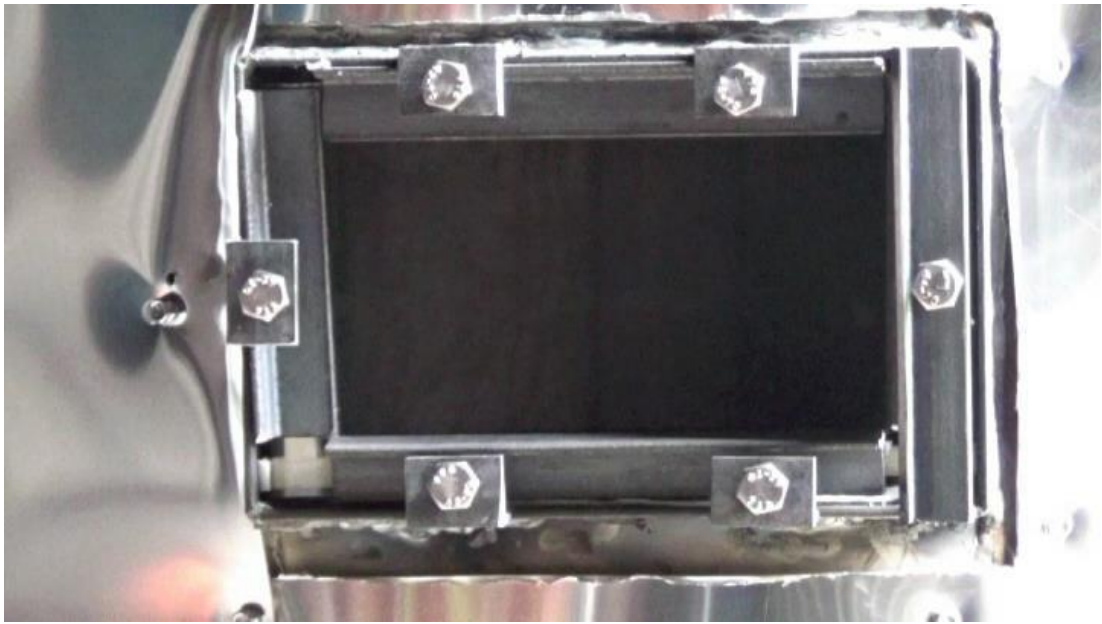
Test 13: Ontbranding bij 100 sec stoom



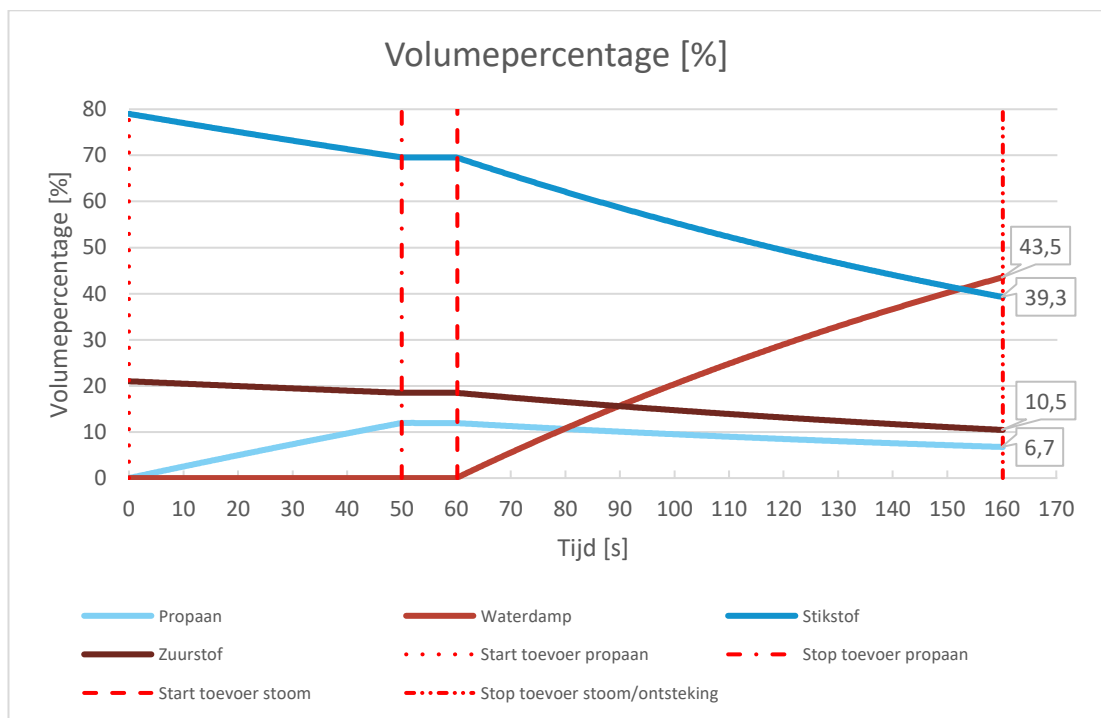
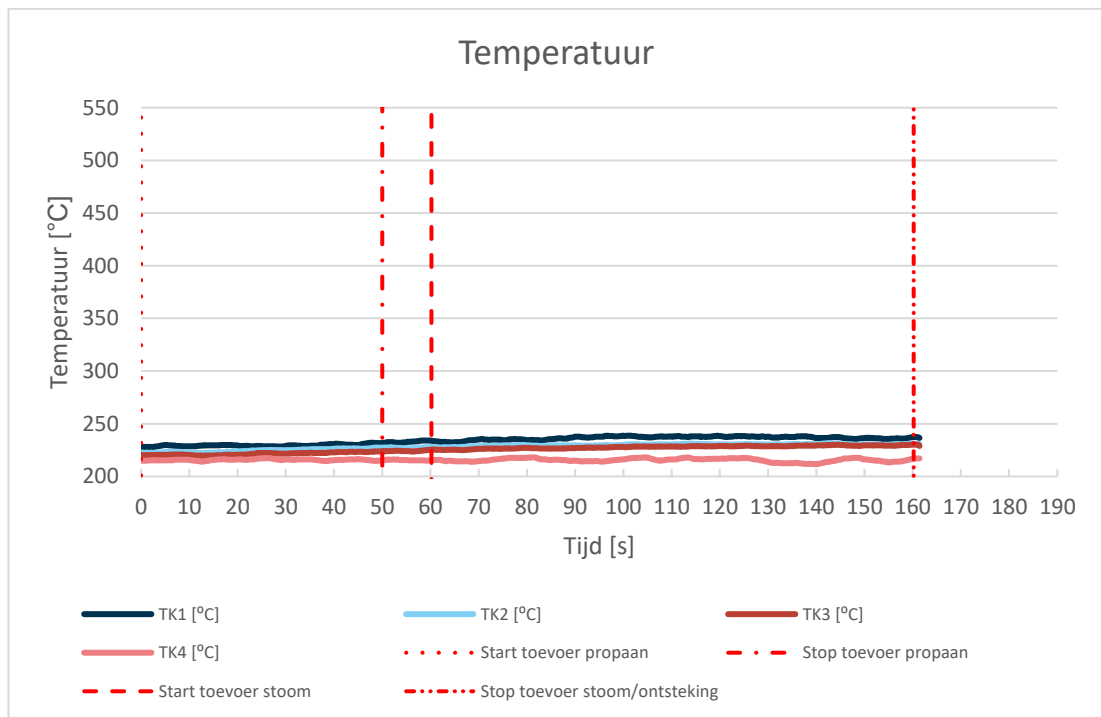
Test 14: 100 seconden



Test 14: Ontbranding bij 100 sec stoom



Test 15: 100 seconden

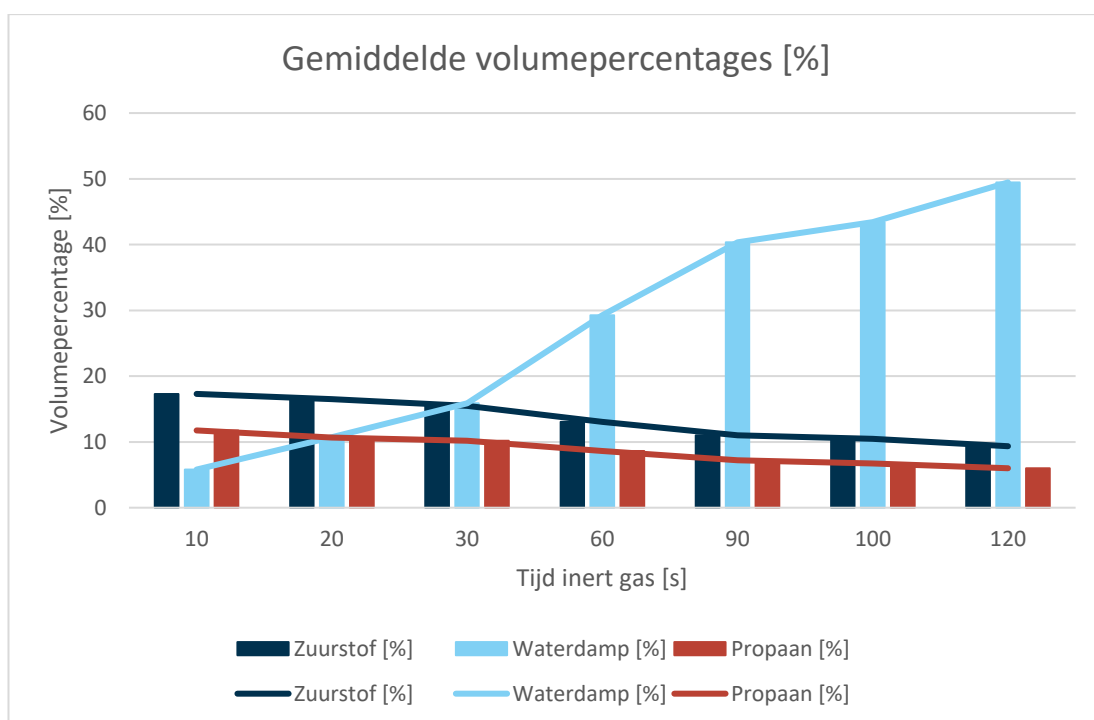


Test 15: Ontbranding bij 100 sec stoom

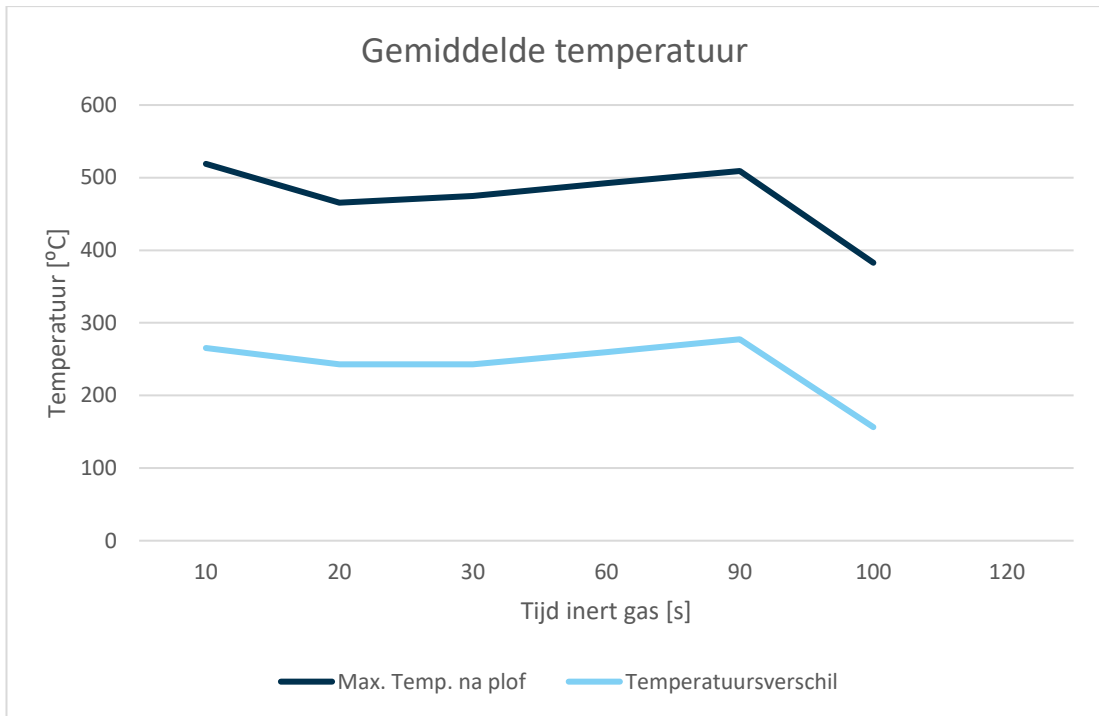


Samenvatting experimenten stoom warme gassen

Toevoertijd [s]	Volumepercentage [%]			Ontbranding [-]	Temperatuur [°C]	
	Zuurstof	Waterdamp	Propaan		Max. na plof	Verschil
10	17.3	5.8	11.8	Ja	519	265
20	16.5	10.7	10.7	Ja	466	243
30	15.5	18.9	10.2	Ja	475	243
60	13.1	29.3	8.6	Ja	493	259
90	11	40.4	7.2	Ja	509	277
100	10.5	43.4	6.7	Ja/nee	383	156
120	9.4	49.5	6	Nee	-	-

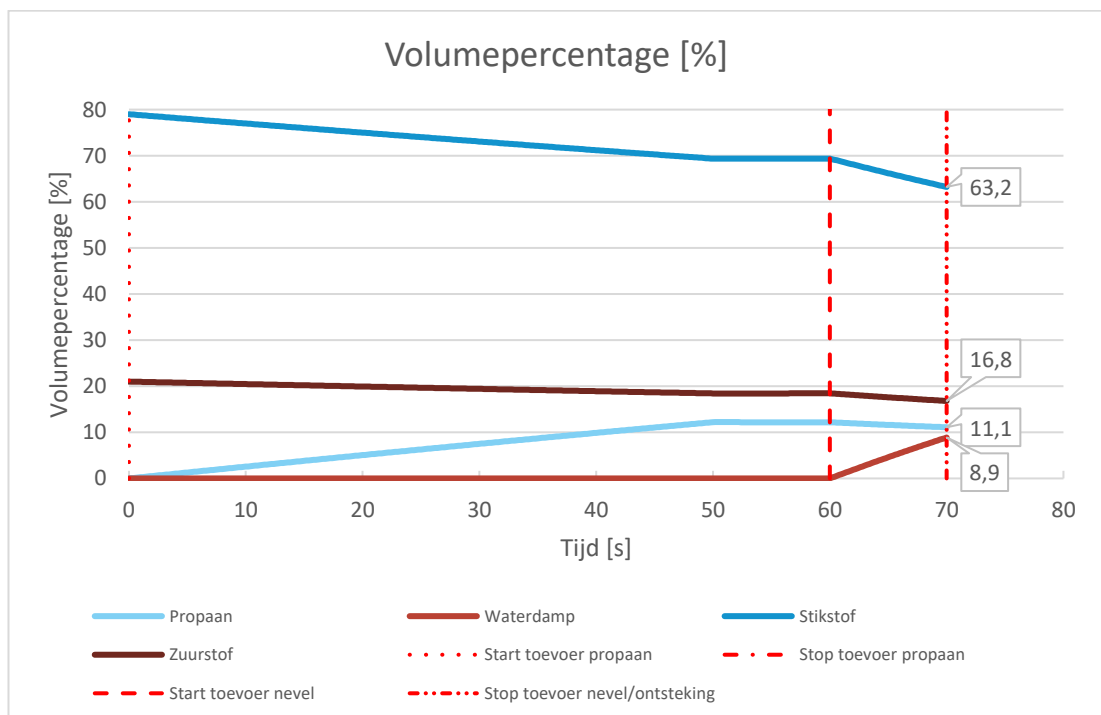
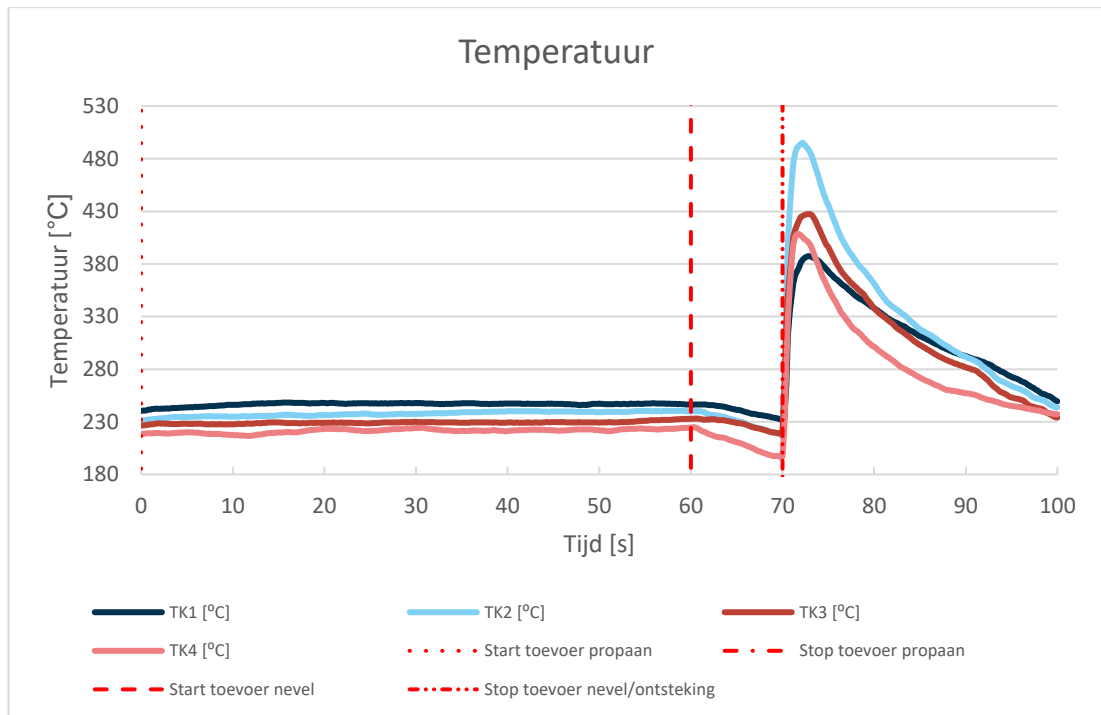


De maximaal toegevoerde hoeveelheid waterdamp ($100 \times 0.86 \text{ g/s} = 86 \text{ g}$) komt overeen met 146 l bij 100 °C. De plofkast heeft een volume van 343 l., dus de toevoer is ongeveer 43 % bij 100 °C. Dit komt overeen met een volumepercentage van 57 % bij 227 °C (500 K). Het resulterende percentage in de plofkast bedraagt ongeveer 43 % bij 227 °C.



Nevel

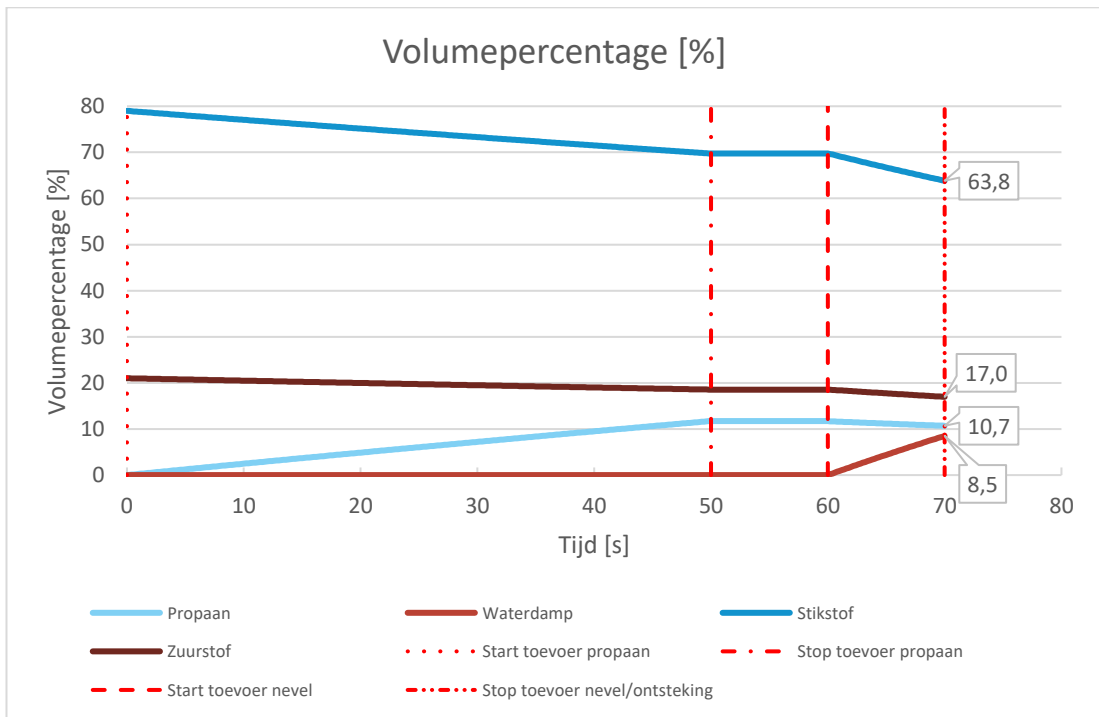
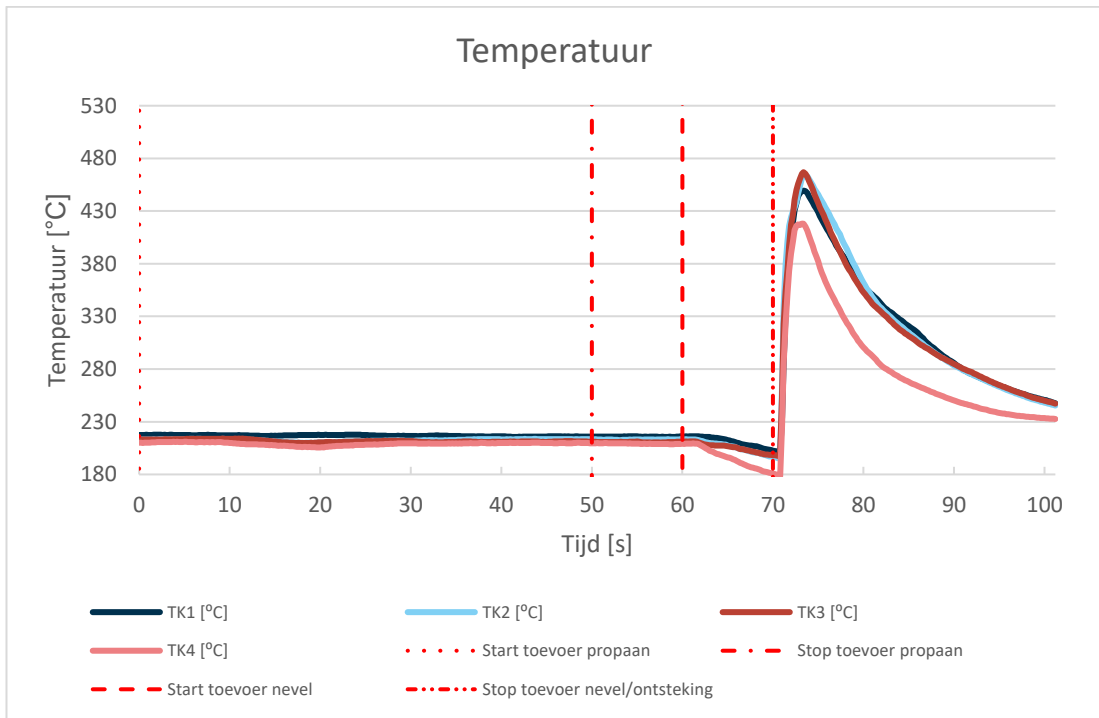
Test 1: 10 seconden



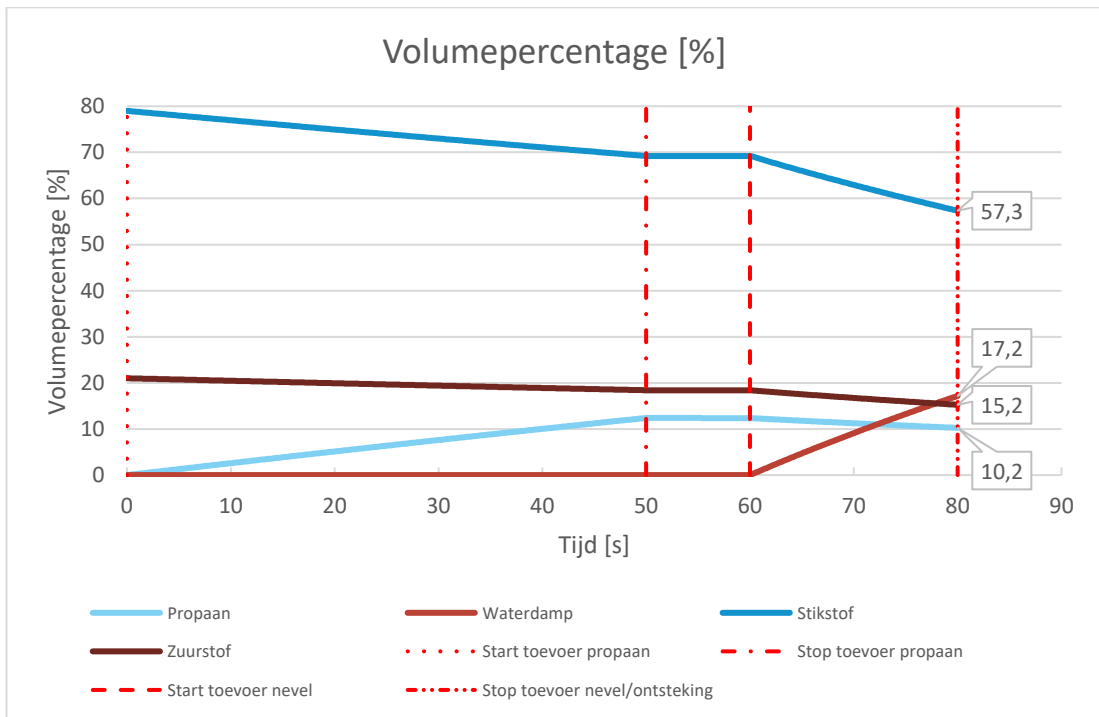
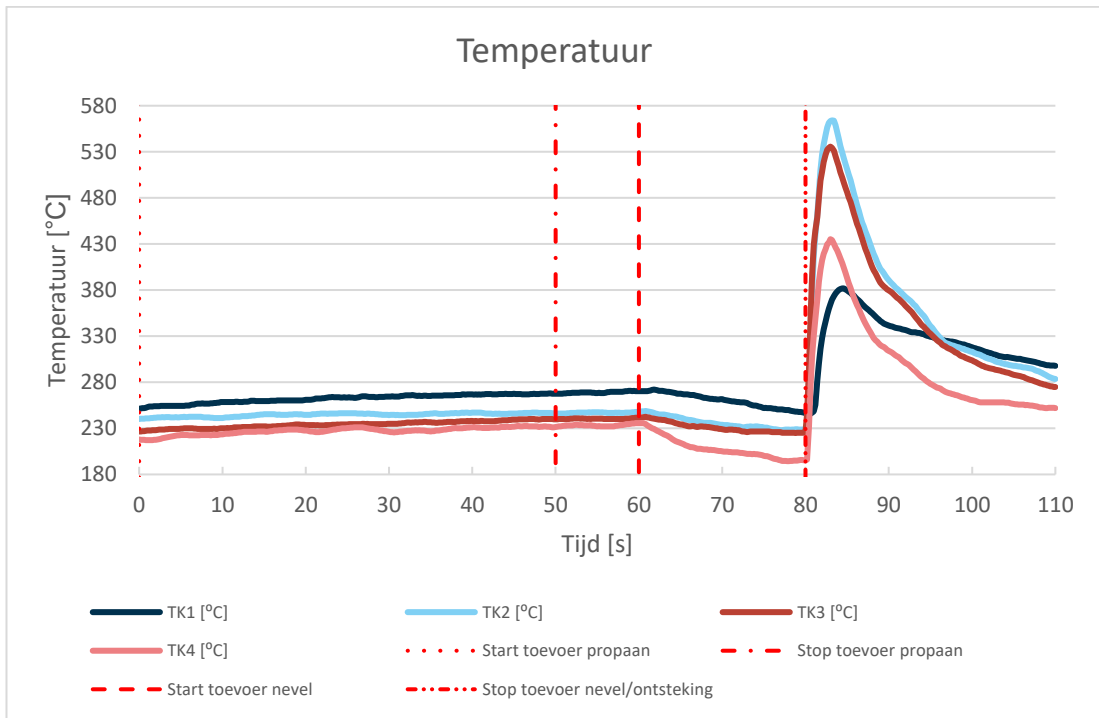
Test 1: Ontbranding bij 10 sec nevel



Test 2: 10 seconden



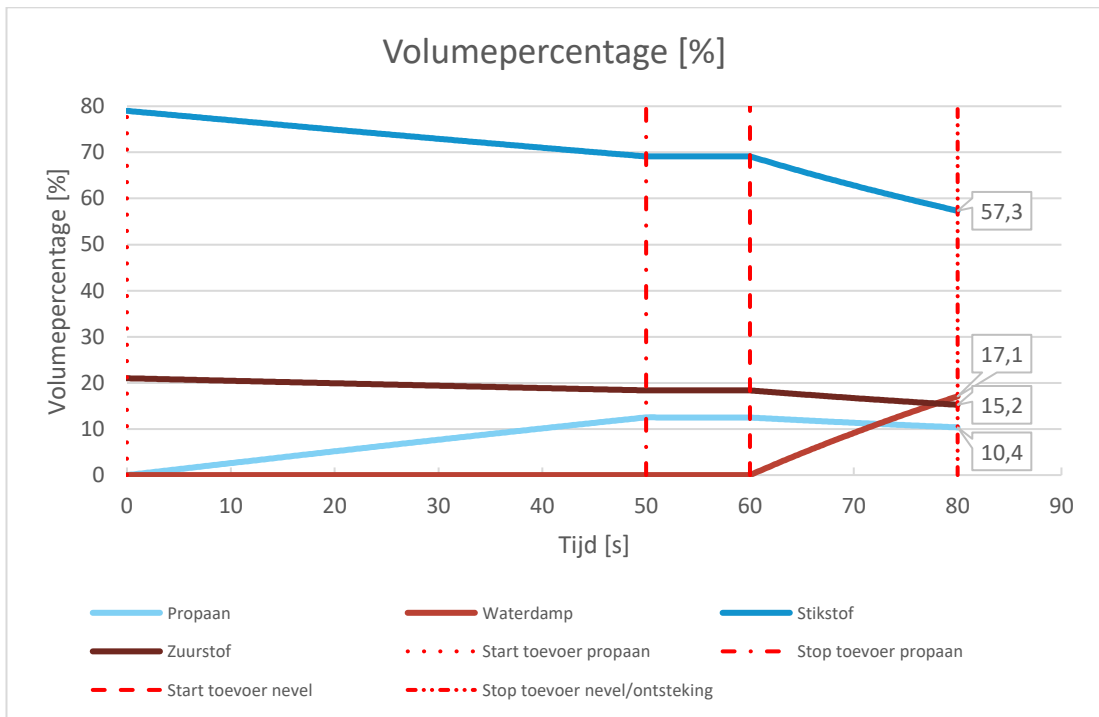
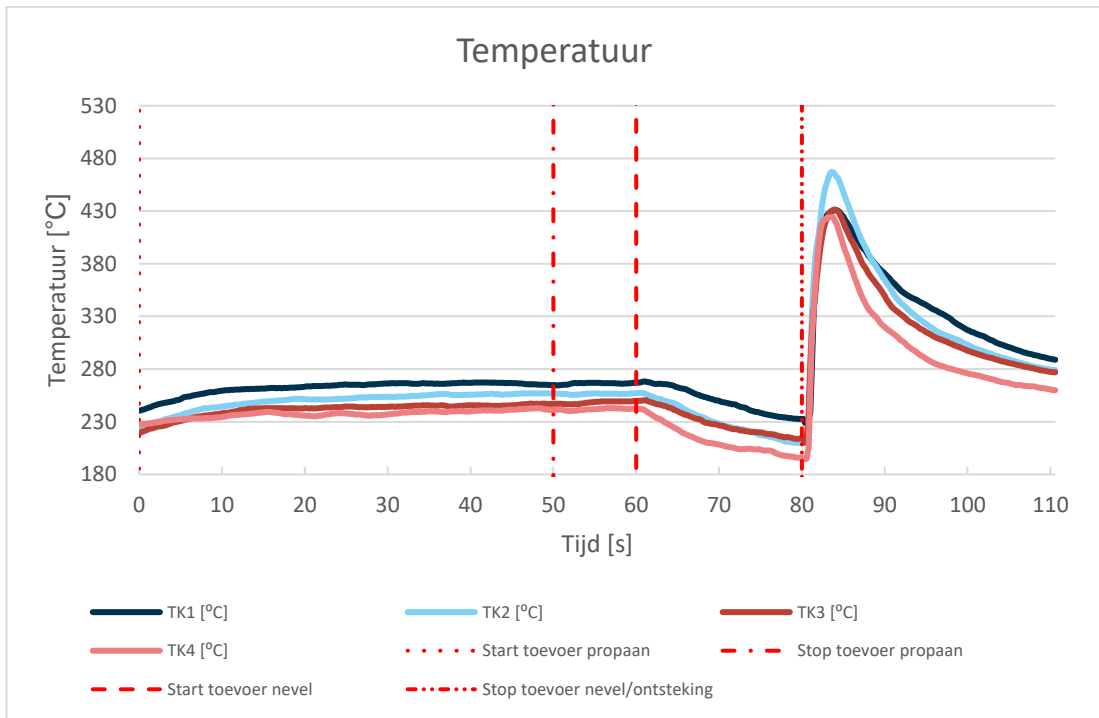
Test 3: 20 seconden



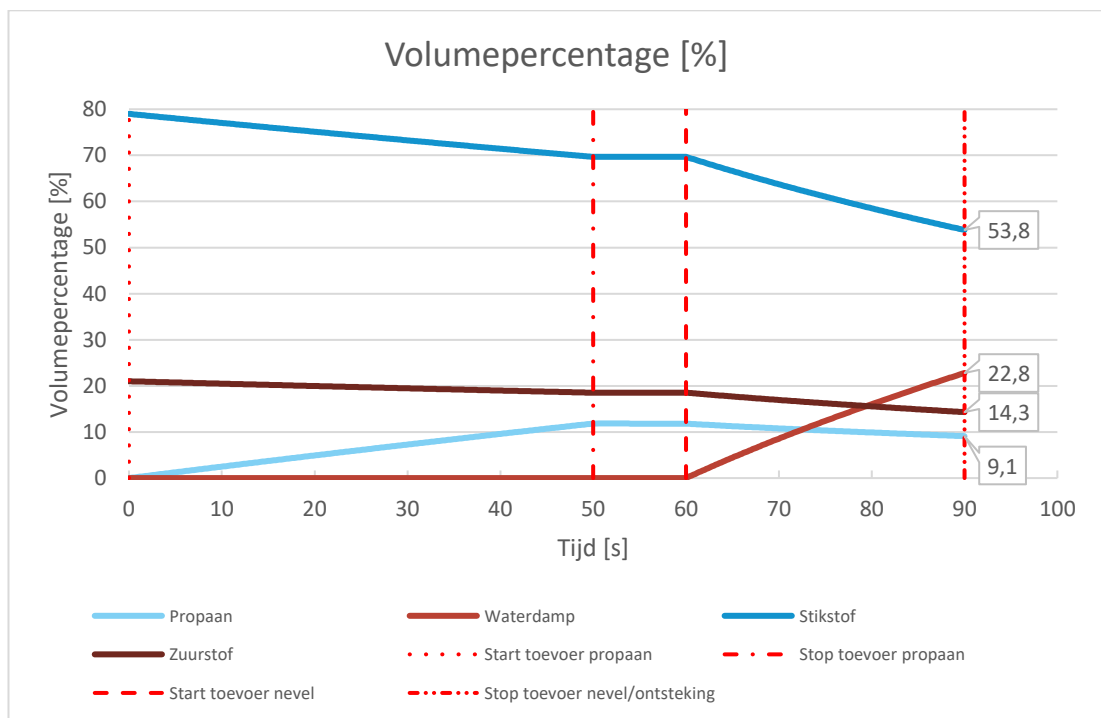
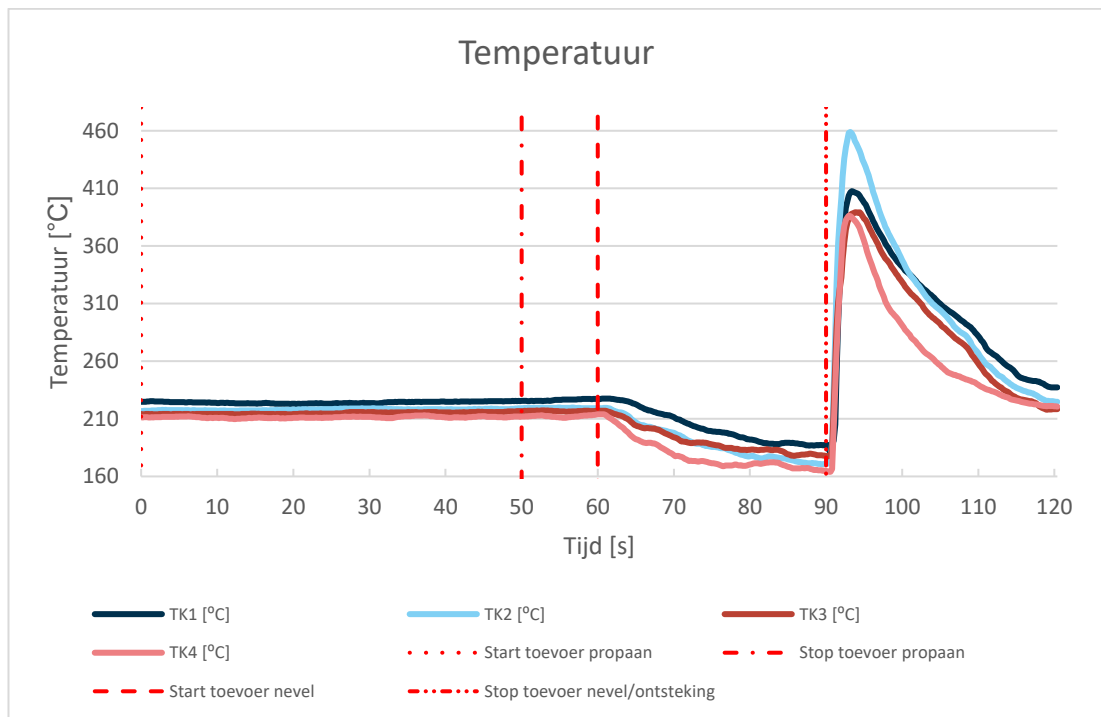
Test 3: Ontbranding bij 20 sec nevel



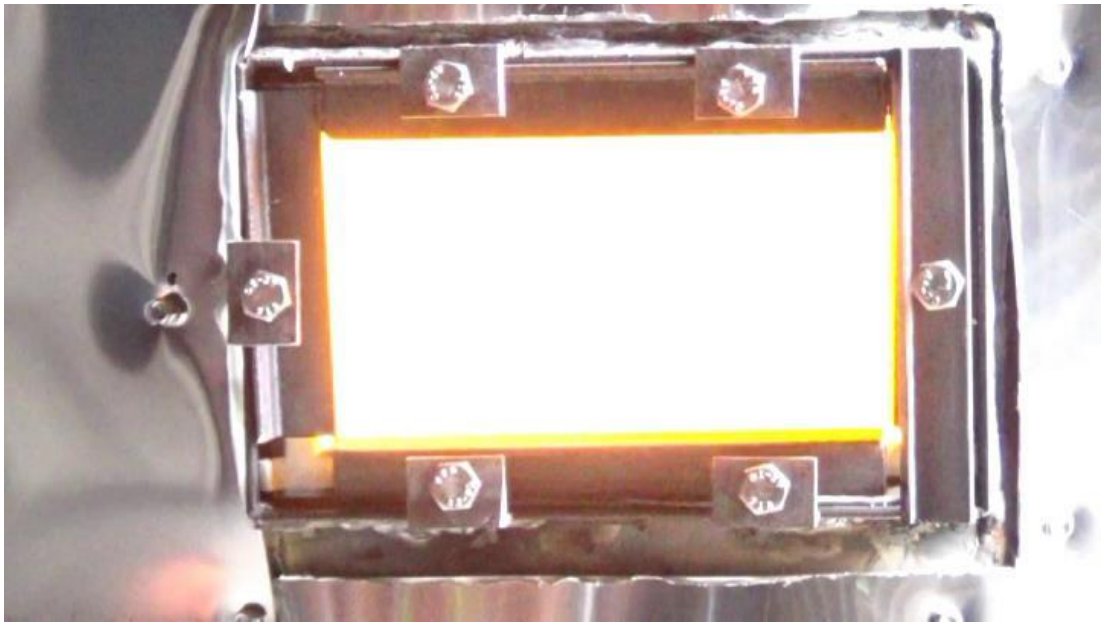
Test 4: 20 seconden



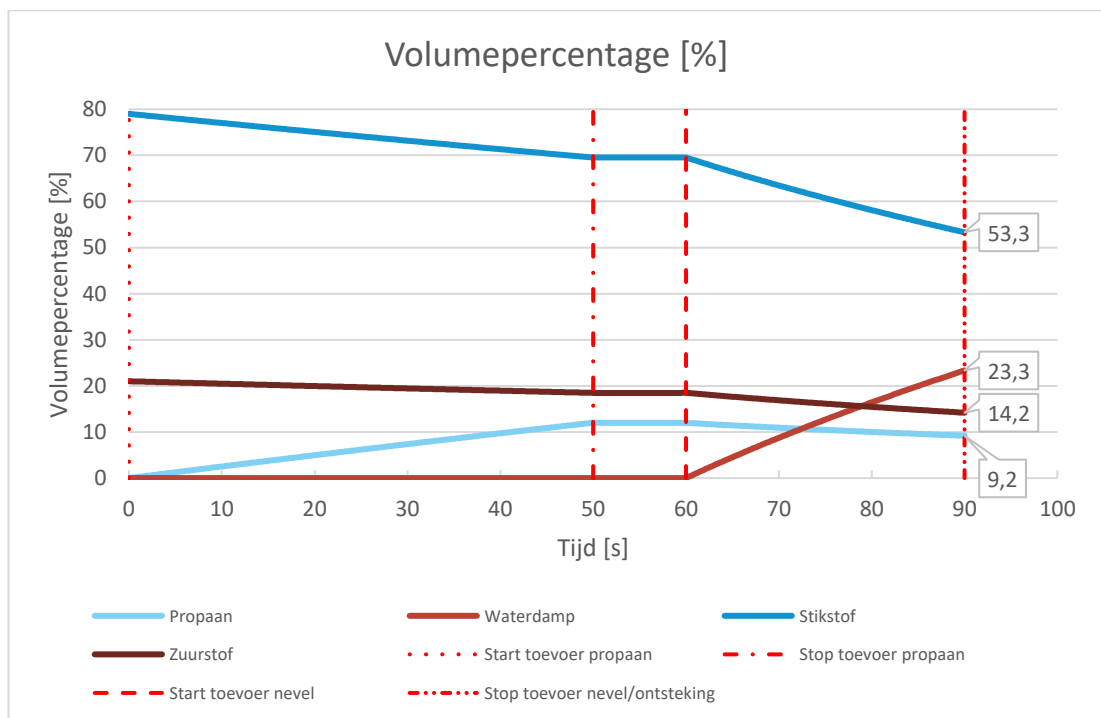
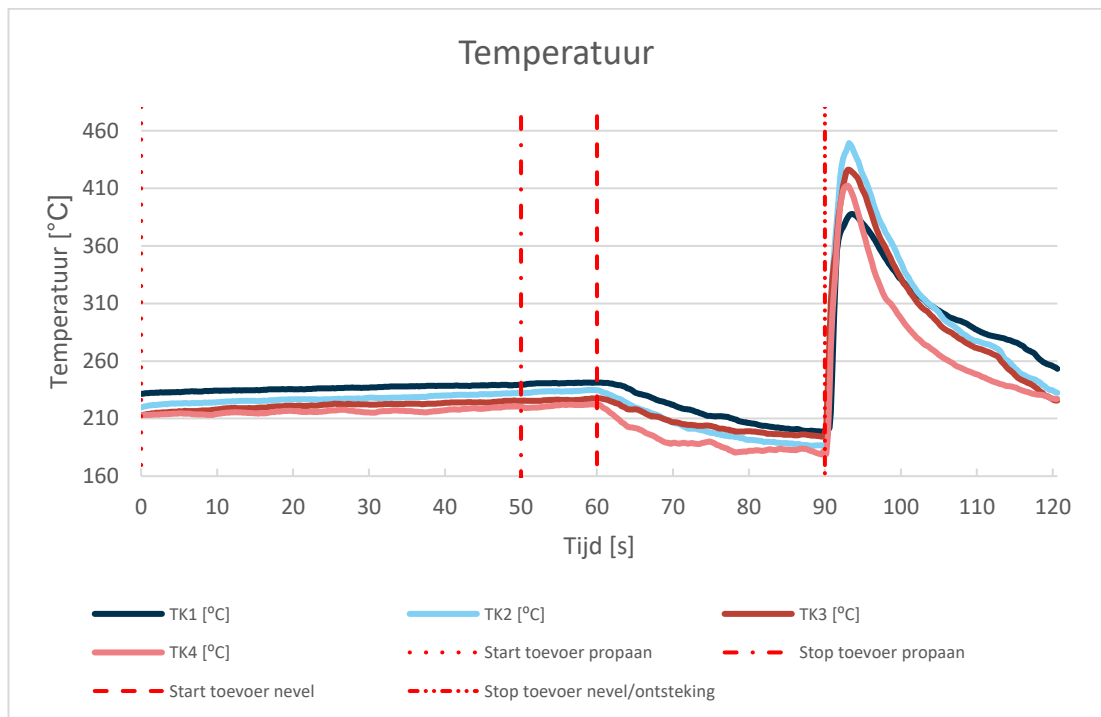
Test 5: 30 seconden



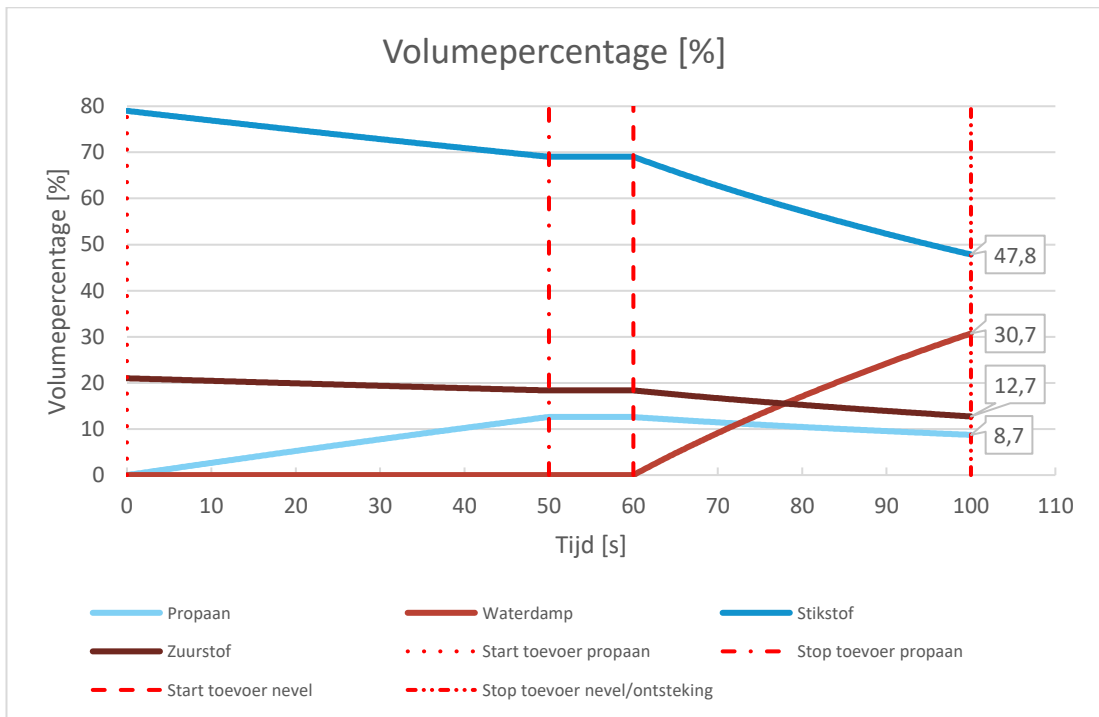
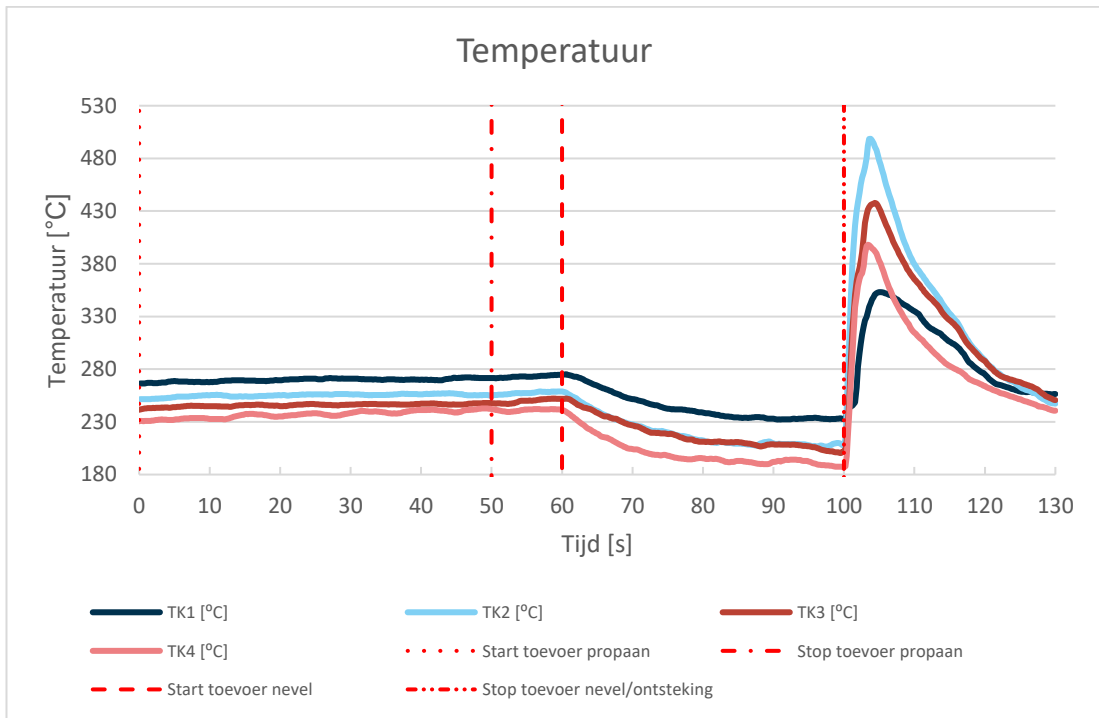
Test 5: Ontbranding bij 30 sec nevel



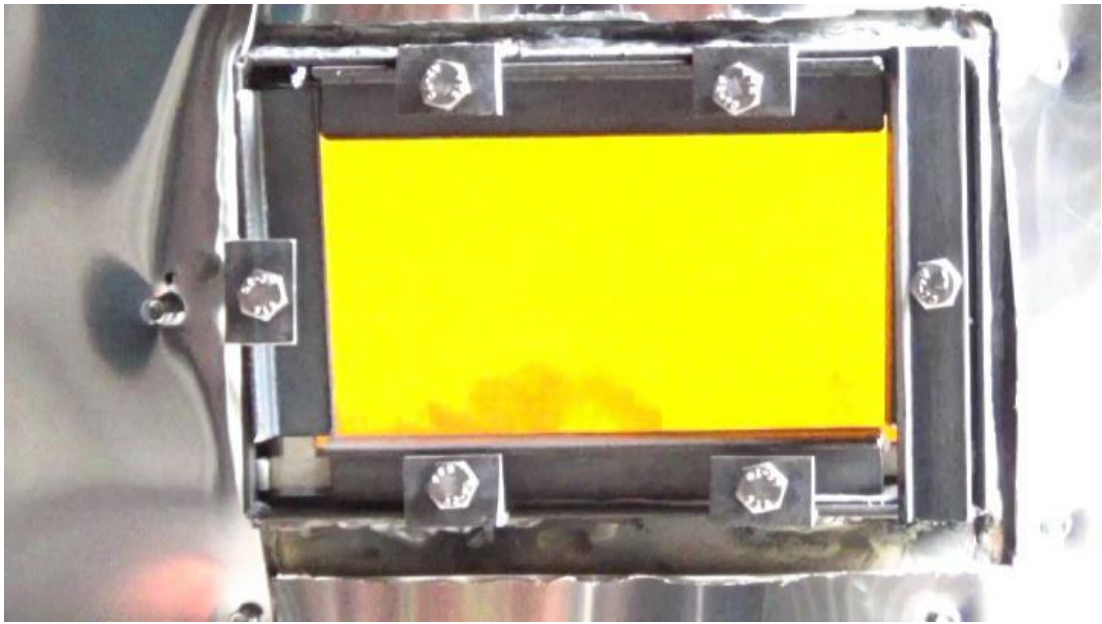
Test 6: 30 seconden



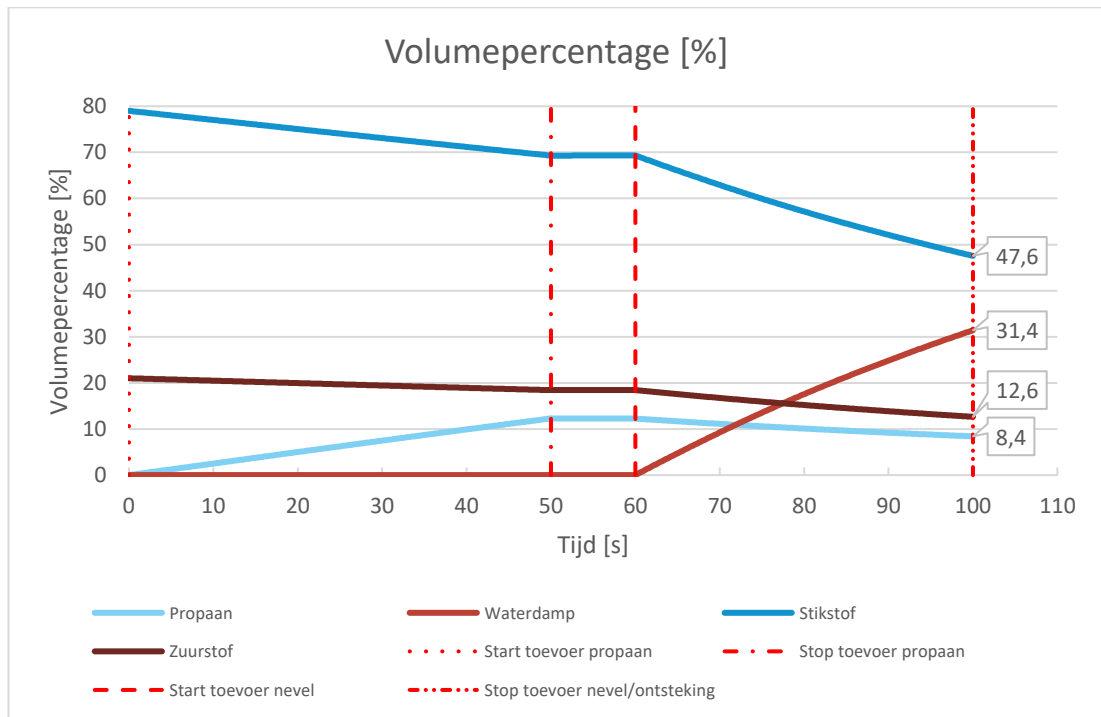
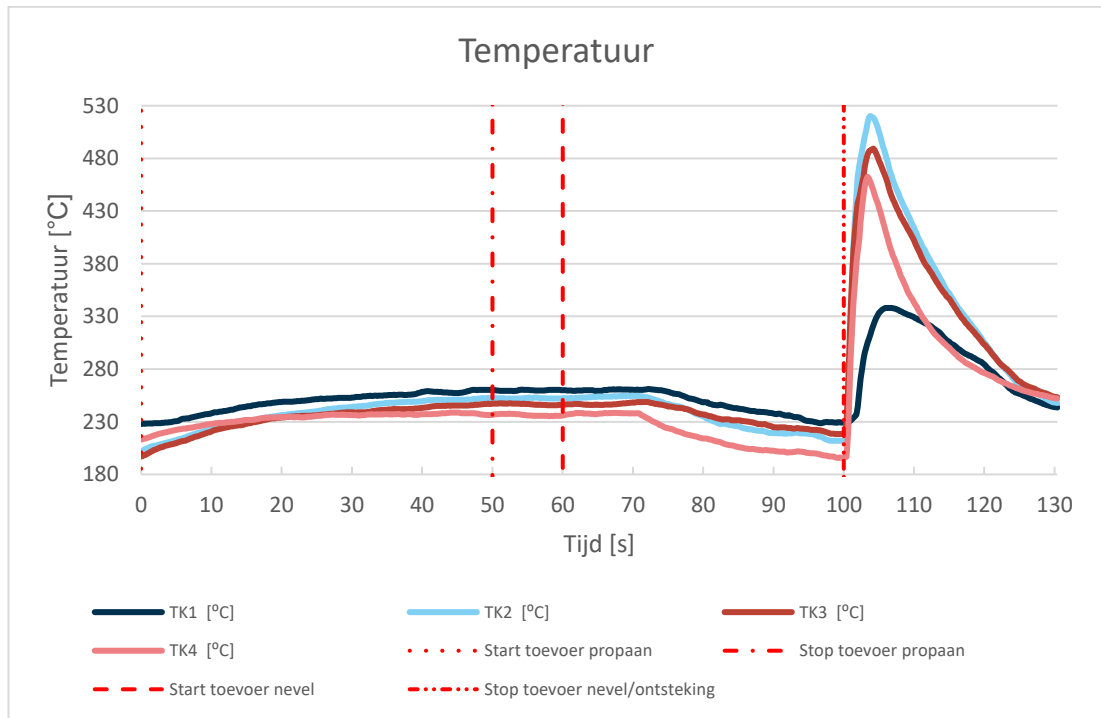
Test 7: 40 seconden



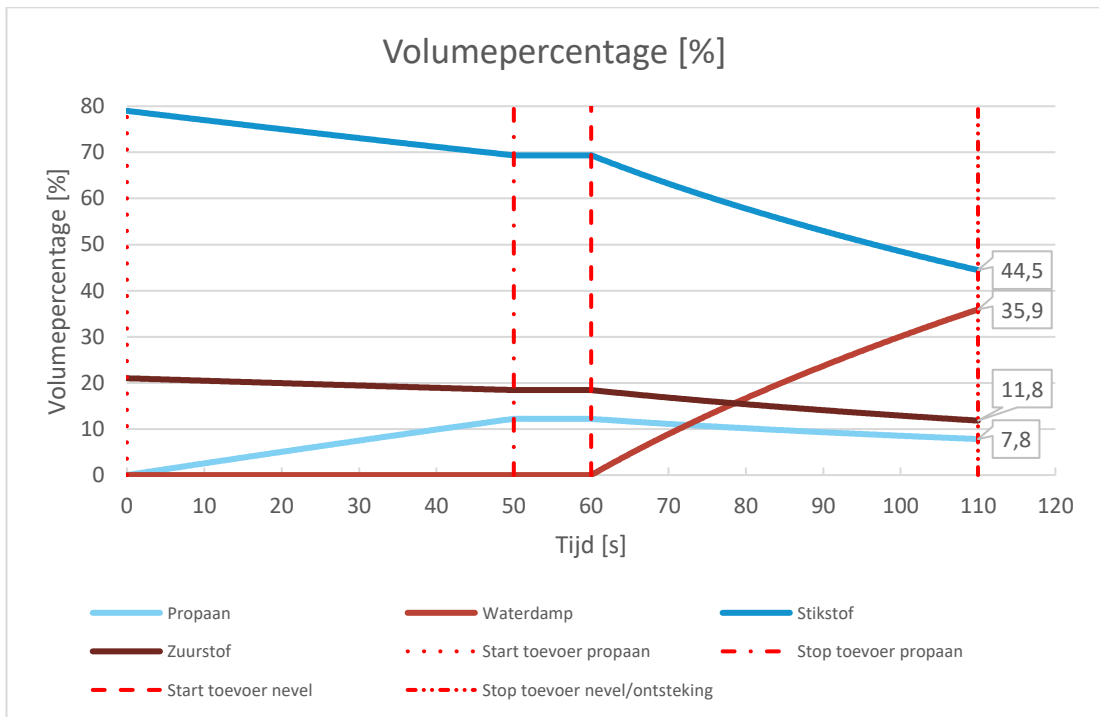
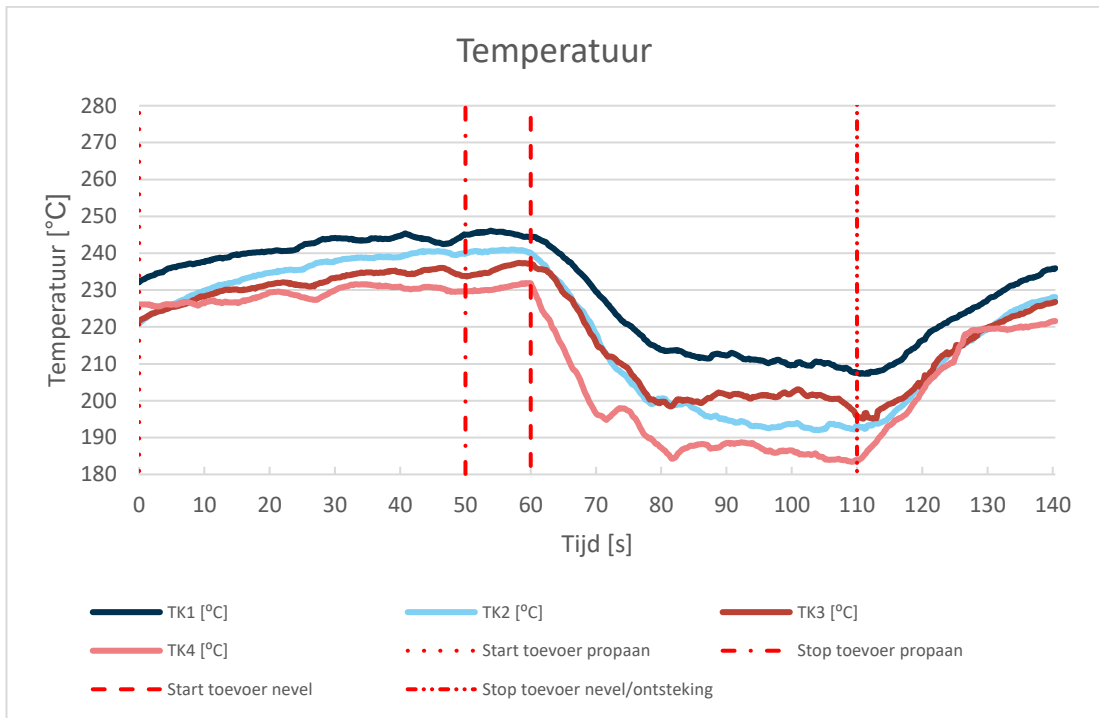
Test 7: Ontbranding bij 40 sec nevel



Test 8: 40 seconden



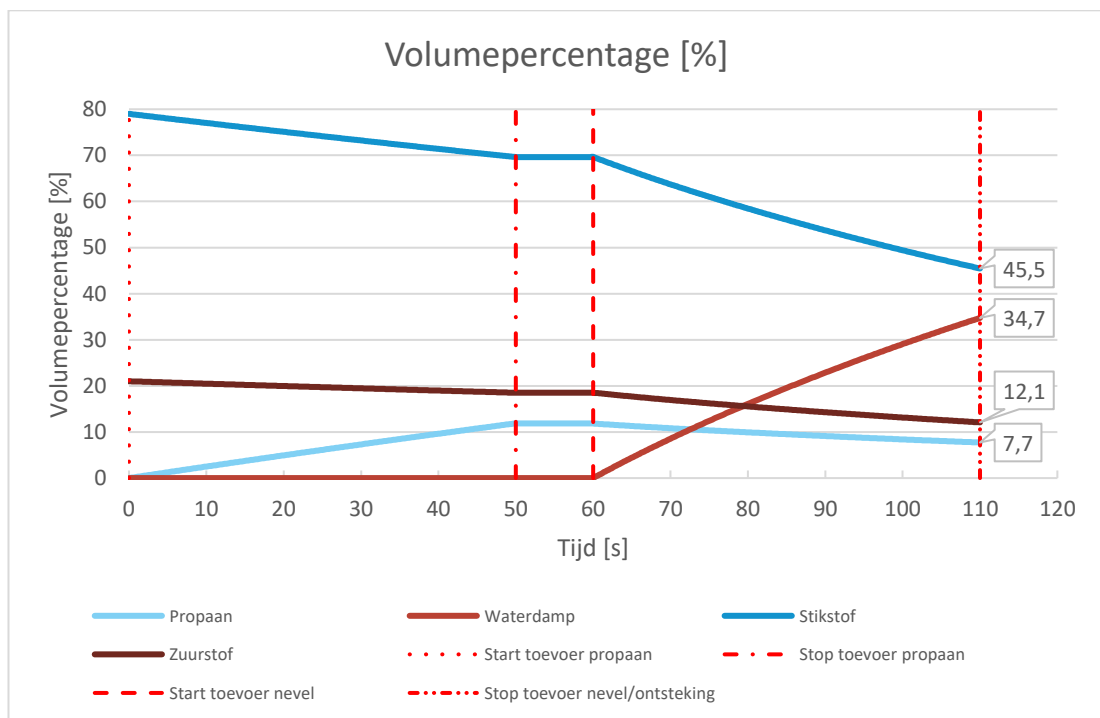
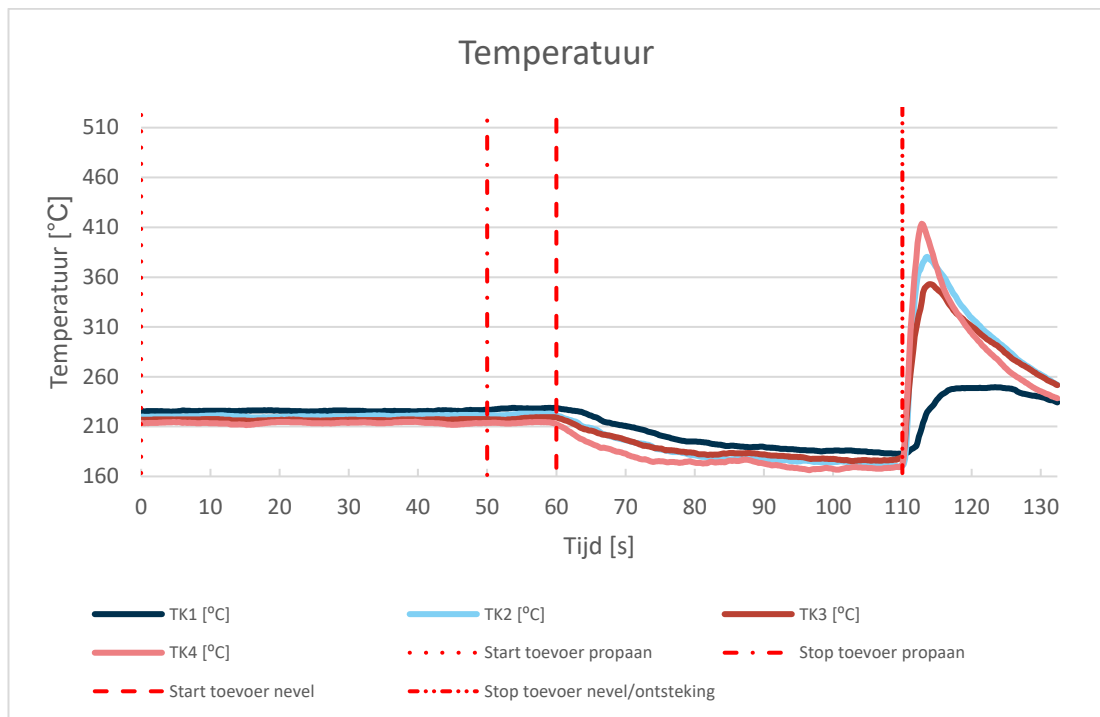
Test 9: 50 seconden



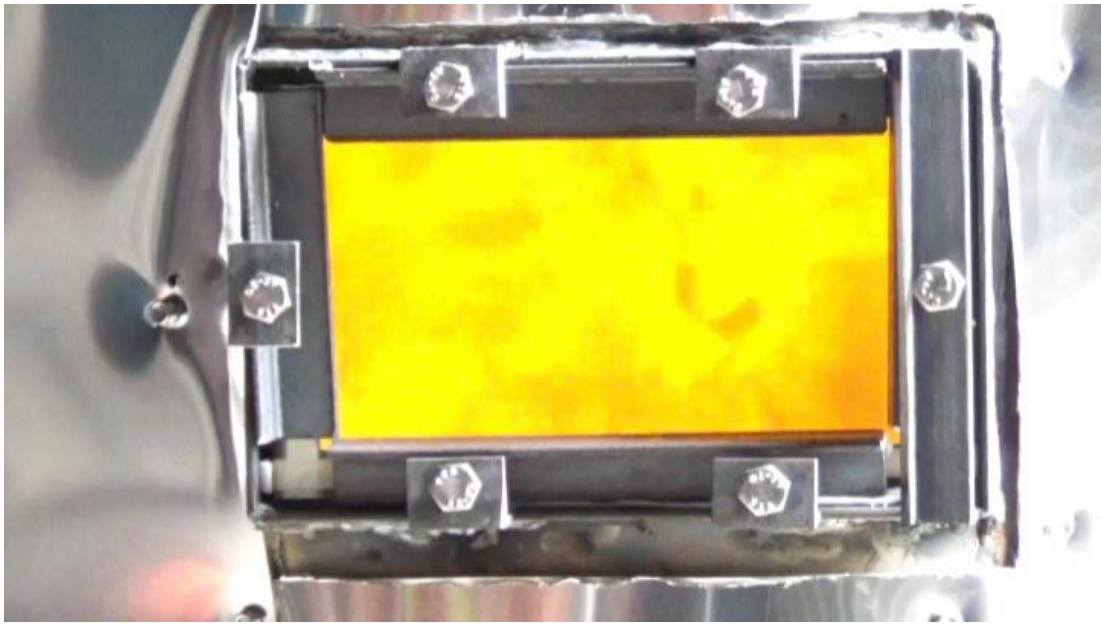
Test 9: Ontbranding bij 50 sec nevel



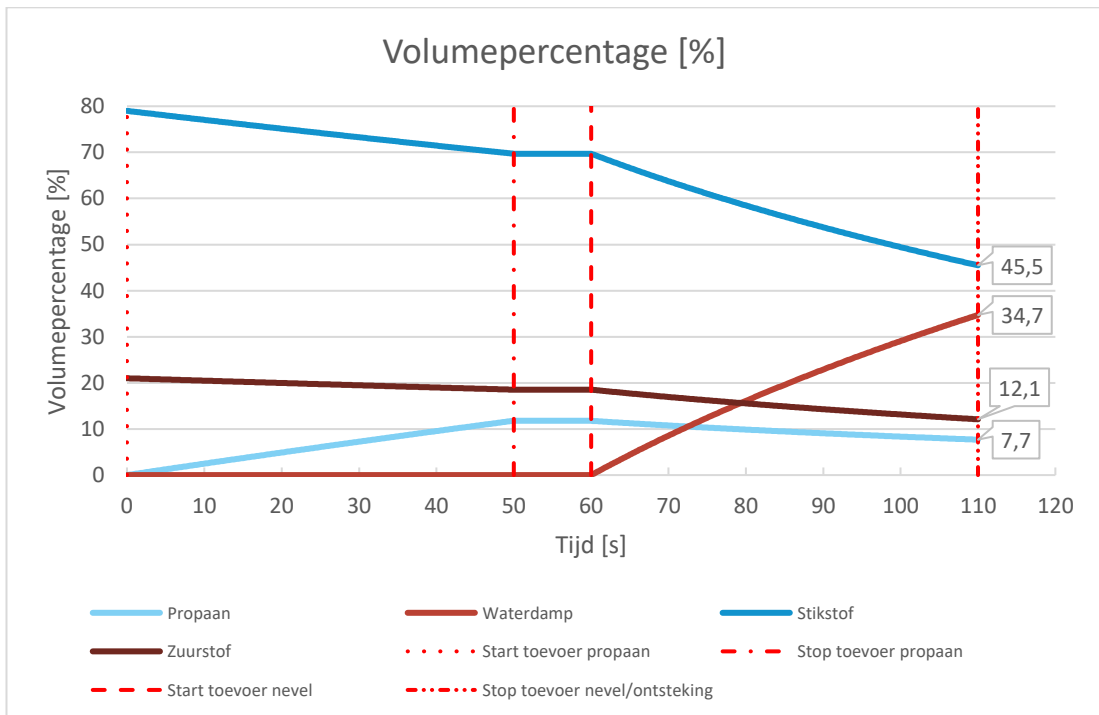
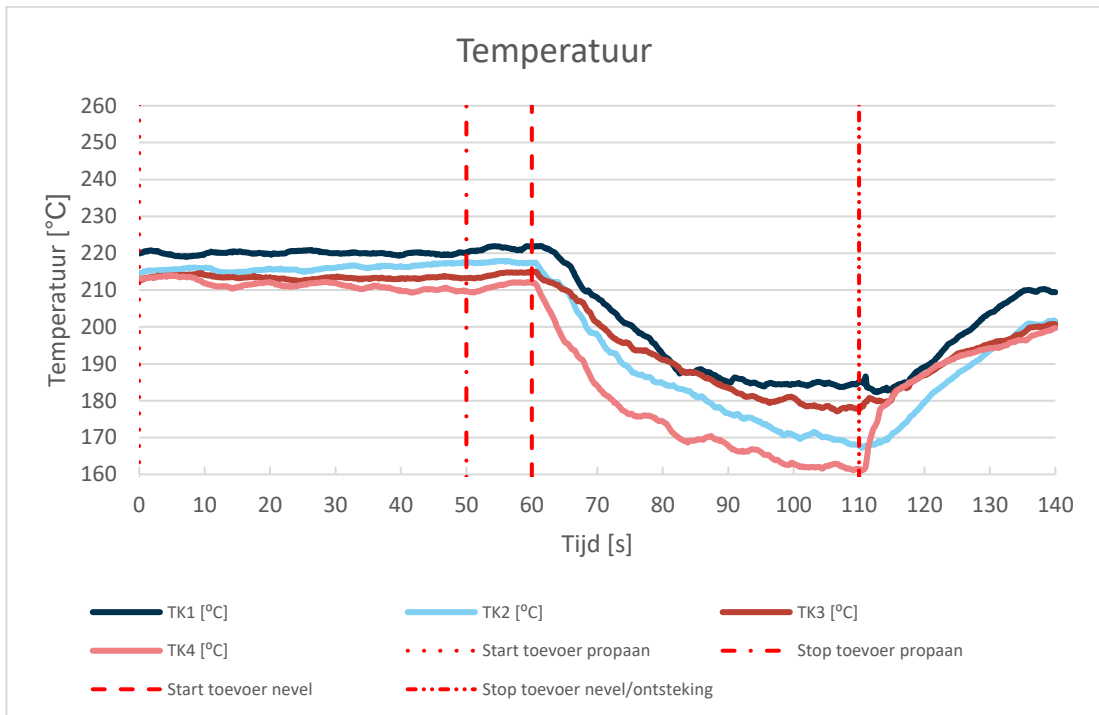
Test 10: 50 seconden



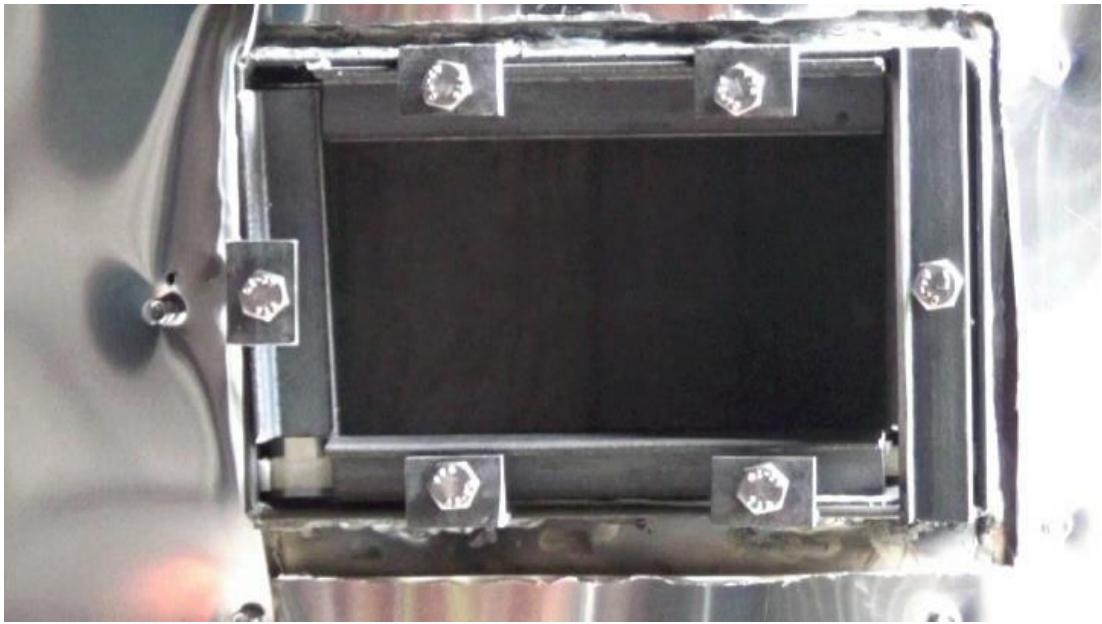
Test 10: Ontbranding bij 50 sec nevel



Test 11: 50 seconden



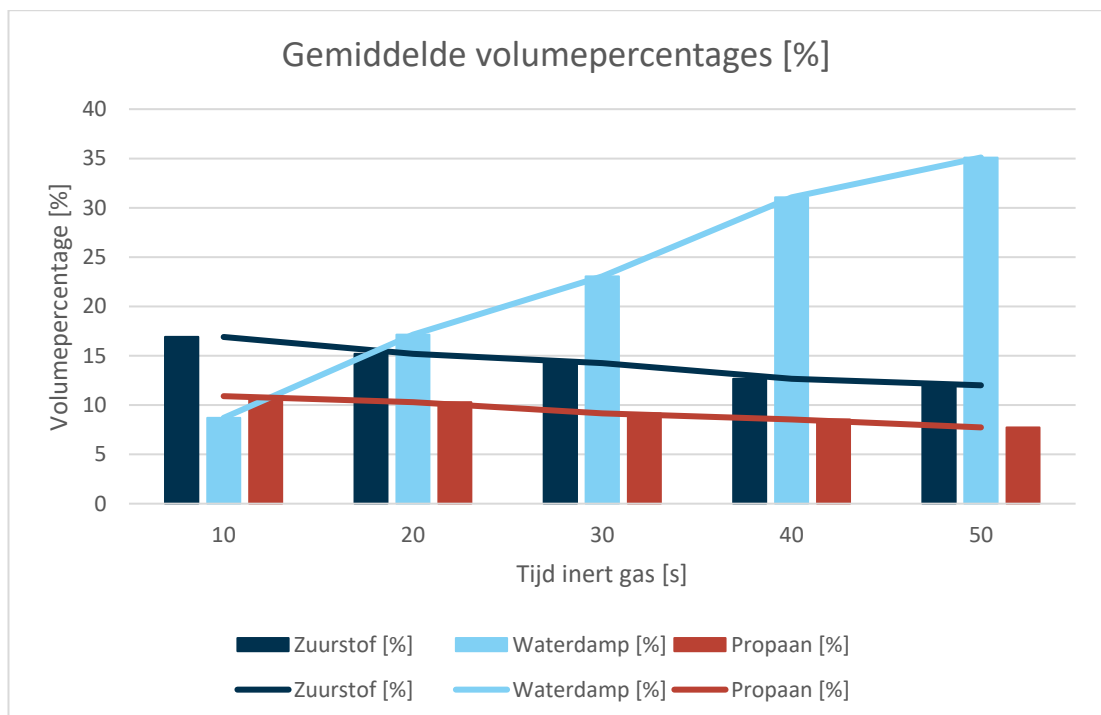
Test 11: Ontbranding bij 50 sec nevel

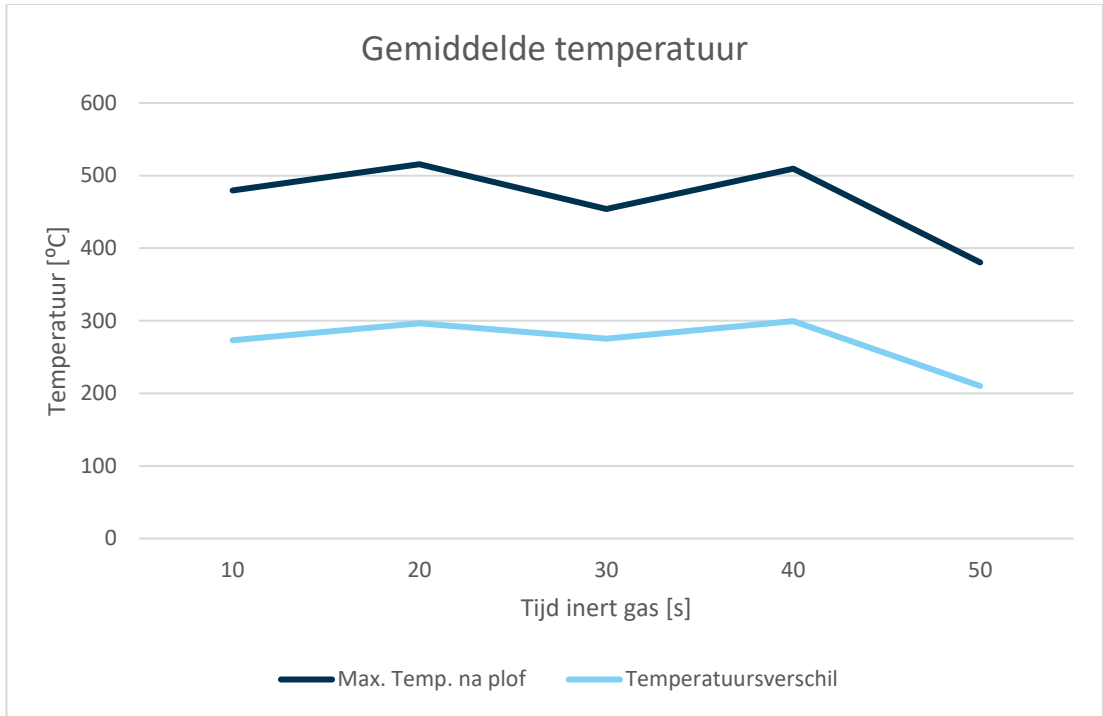


Samenvatting experimenten nevel warme gassen

Toevoertijd [s]	Volumepercentage [%]			Ontbranding [-]	Temperatuur [°C]	
	Zuurstof	Waterdamp	Propaan		Max. na plof	Vershil
10	16.9	8.7	10.9	Ja	480	273
20	15.2	17.2	10.3	Ja	516	296
30	14.3	23.1	9.2	Ja	454	276
40	12.7	31.1	8.6	Ja	510	300
50	12	35.1	7.7	Ja/Nee	380	210

De maximaal toegevoerde hoeveelheid nevel is 70 g ($50 \times 1,4 \text{ g/s} = 70$). Deze 70 gram wordt omgezet naar stoom met een volume van ongeveer 143 l bij 176 °C (449 K). Dit komt overeen met een volumepercentage van 42 % bij 176 °C. Het resulterende volumepercentage bedraagt ongeveer 35 % bij 176 °C.





Bijlage 4 Volumebalans

Bij de analyse van de resultaten van zowel de koude als warme experimenten is uitgegaan van de volgende volumebalans:

$$V_x[t] = \frac{T[t]}{T[t-1]} \cdot (V_x[t-1] - V_{uit_x}[t-1]) + V_{in_x}[t]$$

Hierin is:

- V_x het partiële volume van stof x
- V_{uit_x} de uitvoer van stof x
- V_{in_x} de invoer van stof x
- T de temperatuur

Hierbij is uitgegaan van de volgende uitgangspunten en randvoorwaarden:

- > Input voor de analyse zijn: temperatuurverloop gedurende de propaantoevoer, eventuele wachttijd en stoomtoevoer [K], propaanduur [s], stoomduur [s], wachttijd [s], propaantoevoer [m³/s], stoomtoevoer [m³/s], volume kast/vat [m³] en ploftijdstip [s].
- > Algemeen geldt dat de temperatuur van de propaantoevoer 20 °C is, en de temperatuur van de stoomtoevoer 100 °C. Verder geldt:

	Niet-verwarmd	Verwarmd
Propaantoevoer [m ³ /s]	5.167e ⁻⁴	2.5e ⁻⁴
Propaanduur [s]	32	50
Wachttijd [s]	0	10
Watertoevoer [m ³ /s]	1.46e ⁻³	1.46e ⁻³
Volume [m ³]	1.6644 e ⁻¹	3.43e ⁻¹
Middeling over aantal thermokoppels	2	4

- > De uitgevoerde berekeningen zijn integratieberekeningen met stap $dt = 0.2$ s. Dit is de meetfrequentie van de thermokoppels. De berekeningen lopen tot het moment van de ontsteking.
- > Voor zuurstof en stikstof is $V_{in_x}[t-1]$ i.p.v. $[t]$, omdat deze later in de loop van het experiment uitgerekend wordt.
- > Het totale volume V_{tot} is de som van de partiële volumes van propaan, zuurstof, stikstof en water.
- > Het totale volume kan, als gevolg van de invoer van stoffen en de temperatuursverandering, groter zijn dan het volume van het vat. De uitvoer van stoffen is dan gelijk aan het totale volume minus het volume van het vat (constante):

$$V_{uit}[t] = V_{tot}[t] - V$$

- > Het kan zijn dat de uitvoer van stoffen negatief is. Dit betekent dat, in vergelijking met de vorige tijdstap, het vat afgekoeld is en lucht het vat zal instromen. Voor zuurstof en stikstof geldt dan:

$$V_{in_x}[t] = -1 * f_x * V_{uit}[t]$$

Met f_x de fractie zuurstof (0.21) en stikstof (0.79) in lucht. Hierna wordt de uitvoer op nul gesteld.

- > De volumepercentages van stof x (Vol_x) worden gegeven door:

$$Vol_x[t] = \frac{V_x[t]}{V[t]} \cdot 100$$

Waarbij V het totale volume is.

- > De uitvoer van stof x wordt dan bepaald door:

$$V_{uit_x}[t] = \frac{Vol_x[t] \cdot V_{uit}[t]}{100}$$

- > De beginwaarden zijn:

$$V_{zuurstof} = V \cdot 0.21$$

$$V_{stikstof} = V \cdot 0.79$$

$$V_{in_{propan}} = propaantoevoer \cdot \frac{T[t]}{T_p}, \text{ met } T_p = \text{de temperatuur van het propaan (Charles'wet) op}$$

moment van toevoeren

$$Vol_{zuurstof} = 21$$

$$Vol_{stikstof} = 79$$

Alle overige beginwaarden zijn 0.