



**HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN**

**FACULTEIT SCHEEPSWERKTUIGKUNDE**

**Invloed van waterstof op de samenstelling  
van uitlaatgassen**

Sien van Oijen

Scriptie voorgedragen tot het behalen  
van de graad van  
Bachelor in de Scheepswerktuigkunde

Promotor: Raf Maes

academiejaar: 2017 - 2018

## Woord vooraf

Na vier jaar studeren aan de Hogere Zeevaartschool is een thesis de excellente manier om deze af te sluiten. De kennis die ik afgelopen jaren heb opgebouwd kan ik nu omzetten in een onderzoek. Uiteraard liep dit niet altijd van een leien dakje en heb je steun en ervaring van anderen nodig om dit te doen slagen, waarvoor mijn dank.

Deze thesis zal een onderzoek zijn naar de effecten op de emissies wanneer men waterstof zal toevoegen in een verbrandingskamer. De belangrijkste componenten in de testopstelling omvatte een Javac diesgenerator en een OH-generator, vanuit deze configuratie zijn onze metingen het resultaat.

In de eerste plaats wil ik mijn promotor bedanken, Raf Maes, die mij van het begin tot het einde heeft gesteund en geholpen heeft wanneer ik het nodig had. Mijn ouders die mij elke dag opnieuw steunen en motiveren, en alle andere personen die mij van dichtbij hebben geholpen.

# Samenvatting

De thesis omvat de effecten van de emissies bij het toevoegen van waterstof in een dieselgenerator met RME. De verwachtingen waren zeer positief, waterstof zou de emissies aanzienlijk moeten doen dalen. Tijdens de metingen lag de focus op NO (stikstofmonoxide), NO<sub>2</sub> (stikstofdioxide) en PM (particulate matter). Helaas vonden we na een t-toets, een betrouwbaarheidstest, geen significant verschil. Bij het uitvoeren van andere gelijkaardige onderzoeken, kwamen heel opmerkelijke resultaten boven, zo ontstond de stijging van NO, de belangrijkste oorzaak voor de stijging van NO is de verhoging van de verbrandingstemperatuur ten gevolge van de flame speed van waterstof. Omdat we door toevoeging van waterstof de hoeveelheid HO<sub>2</sub> in de cilinder gaan verhogen, zal H<sub>2</sub> de conversie van NO naar NO<sub>2</sub> beïnvloeden waardoor men een hogere waarde aan NO<sub>2</sub> bekommt. Mits optimalisaties kan men deze NO<sub>x</sub>'en wel verder reduceren. Particulate matter of de vervuilende deeltjes die men gaat uitstoten zullen ook met toevoeging van waterstof stijgen. Dit is te wijten zijn aan het oxiderend effect van waterstof in de cilinder waardoor, deze deeltjes komen vervolgens via de uitlaat in de atmosfeer terecht. Verder maakten we ook de vergelijking van de effecten op emissies wanneer men waterstof gaat toevoegen bij andere soorten brandstoffen.

# Abstract

In this study, the effect of hydrogen enrichment on emissions of a diesel generator were examined. Our expectations were that hydrogen enrichment would reduce the emissions quite a lot. During our measurements, our focus led on the emissions of NO, NO<sub>2</sub> and PM's. Unfortunately our results were not significant, but from other similar studies we found remarkable results. We found an increase of NO, this effect is due to the high combustion temperature, this is a result of the high flame speed of hydrogen. When we increased the amount of H<sub>2</sub> in the cylinder, H<sub>2</sub> improved the conversion of NO to NO<sub>2</sub>, which also led to an increase of NO<sub>2</sub>. With the right optimization methods, we could achieve better results so less emissions. PM's also increase proportionally with the increase of hydrogen enrichment. This as a result of the oxidizing effect of hydrogen in the combustion chamber. To broaden our research, we made a comparison with the effects of hydrogen on emissions combined with different types of fuel.

# Inhoudsopgave

<b>0</b>	<b>INLEIDING</b> .....	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>WATERSTOF</b> .....	<b>4</b>
1.1	<i>Wat is waterstof?</i> .....	4
1.2	<i>De eigenschappen van waterstof</i> .....	4
1.3	<i>De productie van waterstof</i> .....	6
1.4	<i>Waterstof en scheepvaart</i> .....	7
1.5	<i>De effecten van waterstof in een explosiemotor</i> .....	8
1.6	<i>De effecten van waterstof op verbrandingsmotoren</i> .....	8
<b>2</b>	<b>ONDERZOEKSVRAAG</b> .....	<b>10</b>
2.1	<i>Methode</i> .....	10
2.2	<i>Materialen</i> .....	12
2.2.1	<i>Detectie instrumenten</i> .....	12
2.2.2	<i>Oxy- hydrogen generator</i> .....	14
2.2.3	<i>Javac Nanomag</i> .....	16
2.3	<i>Proef</i> .....	17
2.3.1	<i>Vorbereiding</i> .....	17
2.3.2	<i>Opstelling</i> .....	17
2.3.3	<i>Testresultaten proef</i> .....	18
2.4	<i>Besluit</i> .....	30
<b>3</b>	<b>VERDIEPING</b> .....	<b>32</b>
3.1	<i>Emissies van verscheidene brandstoffen vergelijken</i> .....	32
3.1.4	<i>Diesel- RME- H<sub>2</sub></i> .....	32
3.1.5	<i>Biogas- H<sub>2</sub></i> .....	33
3.1.6	<i>Methaan- H<sub>2</sub></i> .....	33
3.2	<i>Optimaliseren van het gebruik van waterstof</i> .....	34
3.3	<i>Andere methodes voor het elimineren van emissies</i> .....	34
<b>4</b>	<b>CONCLUSIE</b> .....	<b>36</b>

## Lijst van figuren

Figuur 1 Reactie van elektrolyse .....	4
Figuur 2 FSC Alsterwasser.....	7
Figuur 3 Onderzoekopstelling .....	11
Figuur 4 Crowncon Gas-Pro .....	12
<i>Figuur 5 Dusttrack DRX aerosol monitor 8533 .....</i>	<i>13</i>
Figuur 6 Oxy-hydrogen generator.....	14
Figuur 7 HHO-elektrolyse .....	15
Figuur 8 Javac Nanomag.....	16
Figuur 9 Opstelling OH generator .....	17
Figuur 10 Opstelling generator .....	18

## Lijst van tabellen

Tabel 1 Meetlimieten Crowncon Gas- Pro.....	13
Tabel 2 Parameters OH200 generator .....	16
Tabel 3 Algemene testresultaten .....	18
Tabel 4 Testresultaten NO.....	19
Tabel 5 T-toets NO .....	23
Tabel 6 Testresultaten NO <sub>2</sub> .....	24
Tabel 7 T-toets NO <sub>2</sub> .....	26
Tabel 8 Testresultaten PM.....	26
Tabel 9 T-toets PM .....	28
Tabel 10 Vergelijking emissies .....	32
Tabel 11 Vergelijking emissies .....	33

## Lijst van grafieken

grafiek 1 Testresultaten NO .....	19
grafiek 2: Gemiddelden NO .....	20
grafiek 3: Effect of different percentages of hydrogen enrichment on in-cylinder gas pressure related to the crank angle at 1100 rpm engine speed & fuel engine load ..	20
grafiek 4: : Effect of different percentages of hydrogen enrichment on in-cylinder gas temperature related to the crank angle at 1100 rpm engine speed & fuel engine load .....	21
grafiek 5: Effect of different percentage of hydrogen enrichment on cylinder gas pressure related to cylinder volume at 1100 rpm engine speed and full engine load	22
grafiek 6 Testresultaten NO <sub>2</sub> .....	24
grafiek 7: Gemiddelden NO <sub>2</sub> .....	25
grafiek 8 Testresultaten PM.....	27
grafiek 9: Gemiddelden PM .....	28



## Verklarende woordenlijst

H <sub>2</sub>	Waterstof
Fuel cells	Brandstof cellen
HHO	Oxy- Hydrogen, mengsel van waterstof en zuurstof
NO <sub>x</sub>	Verzamelnaam voor de mono-stikstofoxiden
NO	Stikstofmonoxide
NO <sub>2</sub>	Stikstofdioxide
KOH	Kaliumhydroxide (elektrolyt)
PM	<i>Particulate matter</i> , eenheid om concentraties in uit te drukken. Deeltjes met een diameter kleiner dan 10 micrometer.
CO	Koolstof
CO <sub>2</sub>	Koolstofdioxide
HC	Koolwaterstoffen
VOC's	<i>Volatile organic compounds</i> , de verzamelnaam voor alle koolwaterstoffen die gemakkelijk verdampen.

## 0 Inleiding

In dit onderzoek gaan we de emissies bestuderen wanneer men oxy- waterstof zal toevoegen bij een verbrandingsmotor. Dit omdat pollutie hoog op de agenda staat en alternatieve brandstoffen de meer en meer aandacht krijgen. We waren op voorhand van overtuigd dat de toevoeging van waterstof voor een daling van de emissies zou zorgen. Toch hebben we gedurende het onderzoek de verwachtingen moeten bijschaven.

In dit werk worden de basisbegrippen van elektrolyse, emissies en alternatieve brandstoffen verduidelijkt aan de hand van het onderzoek dat is uitgevoerd. Waterstof, als alternatieve brandstof, wekt op verschillende niveaus de interesse op. Ondanks het feit dat er reeds verschillende projecten in werking zijn, blijft men nog steeds actief zoeken naar oplossingen omtrent efficiënter gebruik, opslag en productie. De materialen en installaties die tijdens de onderzoekproef gebruikt zijn, zijn gedetailleerd beschreven.

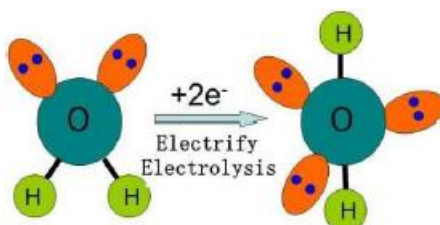
Daarna wordt de vergelijking opgesteld van de verschillende emissies die worden uitgestoten bij een variabele hoeveelheid oxy- waterstof en belasting op de motor. Naargelang onze resultaten zullen we onze motor moeten optimaliseren bij het gebruik van waterstof.

Als laatst vergelijken we de verschillende soorten brandstoffen. Deze zijn diesel, RME (Rapeesed Oil Methyl Esters), biogas en methaan. Hoe reageren deze brandstoffen bij toevoeging van waterstof?

# 1 Waterstof

## 1.1 Wat is waterstof?

We benoemen waterstof als  $H_2$ , dit wil zeggen dat het waterstofmolecuul is opgebouwd uit twee waterstofatomen. Onder atmosferische omstandigheden vormt deze stof een twee -atomige molecule met zuurstof . Waterstof komt in grote hoeveelheden voor doorheen het universum, men vindt het op de zon, in sommige sterren, en de planeet Jupiter bestaat grotendeels uit waterstof. Op aarde wordt waterstof meestal geproduceerd door elektrolyse.



*Figuur 1 Reactie van elektrolyse*

*Bron: Researchgate*

## 1.2 De eigenschappen van waterstof

De vlamsnelheid van waterstof heeft een zeer groot bereik in vergelijking met andere brandstoffen. Dit maakt het mogelijk om te werken met waterstof in zowel rijke als arme condities, waterstof is dus nagenoeg gemakkelijk hanteerbaar.

De hoeveelheid energie nodig om waterstof te ontsteken, is opmerkelijk laag. Dit heeft zijn voor- en nadelen, een gevaar hierbij kan zijn dat waterstof gemakkelijk zal ontsteken wanneer deze in contact komt met *hot spots*, punten, plaatsen die onderhevig zijn aan extreem hoge temperaturen, of gassen met hoge temperaturen. Daarentegen bevat één liter waterstof 3100 keer minder energie dan één liter diesel, dit maakt waterstof zeer ongunstig in gebruik als brandstof. Daarom zal waterstof meer gebruikt worden in *fuel cells*, omdat waterstof efficiënter is inzake opslag en productie.

*Fuel cells* gebruiken energie, van bijvoorbeeld waterstof, om elektriciteit te produceren. Een fuel cell bestaat uit twee elektrodes: een positieve kant (anode) en een negatieve kant (kathode), met daartussen een elektrolyt. Waterstof wordt naar de anode gevoerd en zuurstof naar de kathode, waarna de katalysator waterstof zal splitsen in elektronen en protonen. Deze nemen elks een verschillend pad naar de kathode. Elektronen hebben een extern pad waardoor er een stroom van elektriciteit wordt opgewekt. De protonen gaan via elektrolyten naar de kathode, hieruit volgt dat zuurstof en elektronen met elkaar gaan reageren. Deze reactie resulteert in warmte en water.

Wanneer men waterstof zal comprimeren, zal de temperatuur stijgen. Dit kan gevaarlijk worden omdat waterstof een *auto ignition temperature* heeft, dit wil zeggen dat waterstof zelf zal ontbranden bij een bepaalde temperatuur. Hierbij wordt de thermische efficiëntie beperkt.

Waterstof heeft een hoge *flame speed*, dit is de snelheid waarbij er een vlam ontstaat na een verbranding. Deze waarde is bepaald voor alle soorten brandstoffen en wordt vooral gebruikt door wetenschappers.

Het samenvoegen van waterstof en lucht (*fuel- air ratio*) is zeer goed, waterstof heeft als eigenschap goed mengbaar te zijn. Deze eigenschap zorgt voor een homogeen mengsel tussen waterstof en lucht. Een groot nadeel hieraan verbonden is dat bij het lekken van deze stof, de waterstof gemakkelijk zal verspreiden in de atmosfeer.

De lage dichtheid van waterstof beperkt de gebruiksmogelijkheden, men heeft meestal grote volumes nodig wanneer men deze wil toevoegen bij de verbranding in een motor. De lage dichtheid zal dan ook een lager vermogen met zich meebrengen.

### 1.3 De productie van waterstof

Vandaag de dag zijn er meerdere methodes om waterstof te produceren, elektrolyse, is een methode waarbij zuiver water door een elektrische spanning gesplitst wordt in waterstof en zuurstof.

Elektriciteit die afkomstig is van een duurzame energiebron, zon-, water- of windenergie, wordt ontwikkeld met behulp van een duurzaam productieproces. Helaas wekken we nog steeds elektriciteit op met behulp van kerncentrales wat geen duurzame energie is. Men kan ook uit fossiele brandstoffen, ook koolwaterstoffen genoemd, waterstof produceren. Koolwaterstoffen bevatten verbindingen met koolstof -en waterstofdeeltjes. De nieuwere auto's maken reeds gebruik van dit principe door aardgas te tanken. Het aardgas gaat door een omvormer om waterstof te produceren. Een nadeel is dat de samenstelling van de uitlaatgassen naast water ook nog andere componenten zullen bevatten.

Daarnaast kan men ook waterstof uit biomassa halen. Dit is een proces waarbij verschillende micro-organismen biomassa omzetten in waterstof. Dit proces vinden we bijvoorbeeld terug in moerassen en in de maag van een koe.

Die 'geproduceerde' waterstof wordt dan weer gebruikt door andere micro-organismen als voedingsstof waarbij methaan wordt gevormd.

Als laatste kan men door fotosynthese ook waterstof produceren, een project van Japanse wetenschappers.

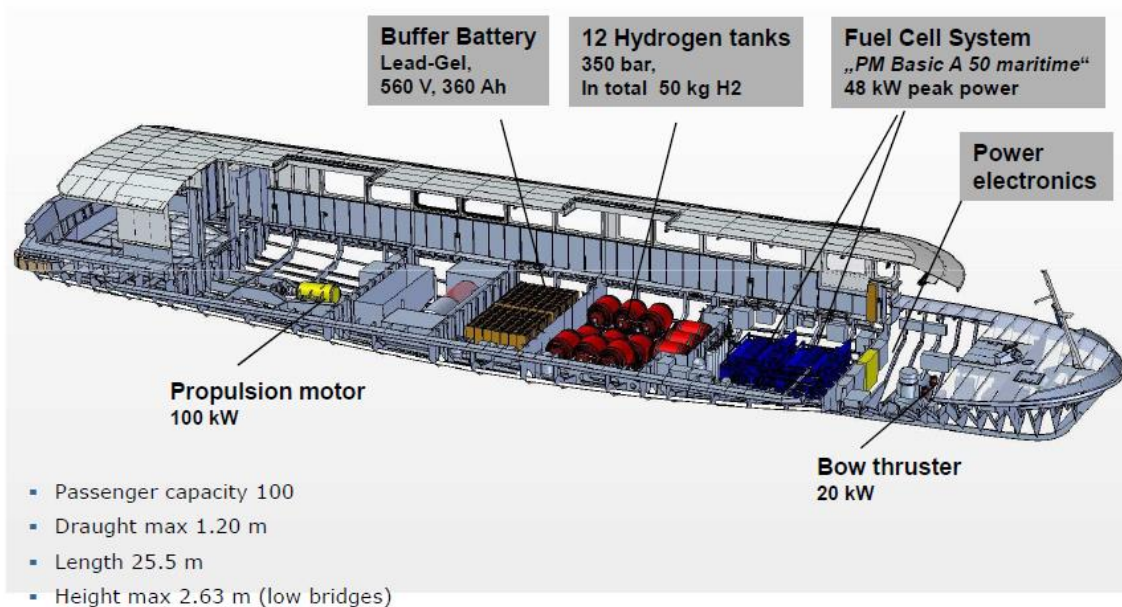
Doordat waterstof een lage dichtheid heeft, is de opslag van waterstof als gas enkel op grote schaal en met gigantisch hoge drukken (700 atm. bar) mogelijk. Wanneer men waterstof terug vloeibaar zou willen maken gaat er een 40% van zijn energie verloren, wat immens veel is. De opslag van waterstof als vloeistof is even moeilijk te hanteren, men heeft extreem lage temperaturen (-253°C) hiervoor nodig. Beide aggregatievormen zijn geen optimale vorm om waterstof op te slaan.

## 1.4 Waterstof en scheepvaart

Alternatieve brandstoffen zijn voor vele particulieren, reders, of industrieën een oplossing voor de hoge bunkerprijzen en de verplichte emissiezones. *Low Sulphur Fuel Oils\**, waaronder waterstof, worden daarom op veel plaatsen door veel mensen onderzocht.

Al zijn er enkele proefprojecten in de vaart, waaronder de FSC Alsterwasser en een containerschip Zero, boeken goede resultaten.

Daarentegenover blijft de opslag van waterstof zeer risicovol, hierdoor zal deze toepassing niet voor elk schip zal renderen. Bijvoorbeeld schepen die langere afstanden afleggen.



Figuur 2 FSC Alsterwasser

Bron: <https://www.h2fc-fair.com/hm10/images/pdf/proton-motor06.pdf>

---

\* LSFO is een brandstof dat een zwavelgehalte van maximum 1,0% mag hebben. Dit soort brandstof moet gebruikt worden in SECA's (Sulphur Emission Control Area's) ,opgesteld door de MEPC (Marine Environment Protection Committee). Op de Noordzee en de Baltische zee geldt de ECA zone, hier moeten ook LSFO worden verbrand. Vergeliken met een standaard brandstof heeft deze een zwavelgehalte van 3,5%.

Wanneer men toch overweegt om op waterstof te varen, moet men hier toch enkele aantekeningen bij maken. Waterstof is een zeer klein molecuul dat mogelijks kan ontsnappen. Wanneer deze stof in de atmosfeer terecht komt, is de kans op ontploffingsgevaar groot. Een tweede factor waar men rekening moet mee houden is de reactie tussen waterstof en metaal. Metaal wordt heel broos in contact met waterstof, hierdoor zullen de opslagtanks uit een ander materiaal vervaardigd moeten worden.

### 1.5 De effecten van waterstof in een explosiemotor

Een explosiemotor zal brandstof en zuurstof op voorhand mengen, zodat er een mengsel wordt aangezogen in de cilinder. Door middel van een vonk zal deze 'ontploffend' en energie genereren. Wanneer men waterstof in een explosiemotor gaat gebruiken, stoot men op enkele problemen, zoals een vermindering van vermogen, kloppen van de motor, back-fire, pre-ignition (voorontsteking) en 'super -of megaknock'. (I.T. Yimaz, M. Gumus, A. Demir, 2016). Een voorontsteking wordt meestal veroorzaakt door het verkleinen van de omvang van de motor of door het gebruik van turbochargers.

Met als gevolg dat de temperatuur en druk sneller zullen stijgen dan normaal waardoor er 'super -of megaknock' kan ontstaan en schade aan de motor zullen brengen. Men kan concluderen dat het gebruik van waterstof niet aan te raden is bij ontploffingsmotoren. Het gebruik bij verbrandingsmotoren daarentegen is wel een haalbare kaart.

### 1.6 De effecten van waterstof op verbrandingsmotoren

Waterstof kan men op verscheidene manieren inbrengen in de verbrandingsmotor, als brandstof dus via de injectoren of als gas/ lucht mengsel via de inlaatcollector. Invloeden zoals temperatuur, druk, eventuele ontstekingsvertragingen en een verandering van de verbrandingsduur werden onderzocht. De verbrandingsanalyse van Yasin Karagoz, e.a. (2016) ontwikkelde zeer gunstige resultaten, de combinatie van brandstof en waterstof zal de verbranding dus stimuleren. Wanneer waterstof in de cilinder terecht kwam, steeg de druk en temperatuur aanzienlijk. De verbrandingscyclus is ongeveer van dezelfde duur, maar start later door de toevoeging van waterstof. Dit kan een gevolg zijn doordat de ontsteking een vertraging oploopt.

## 2 Onderzoeksvraag

Wat ons bezighoudt is de reactie van HHO in combinatie met een verbrandingsmotor. Deze reactie kan men onderzoeken aan de hand van de samenstelling van de uitlaatgassen.

Omdat waterstof één van de grootste energiedragers is, in vergelijking met andere chemische stoffen, kan deze gemakkelijker organische en anorganische vervuilende stoffen oxideren tegen een hoge snelheid ondanks dat het energiebehoud van korte duur is.

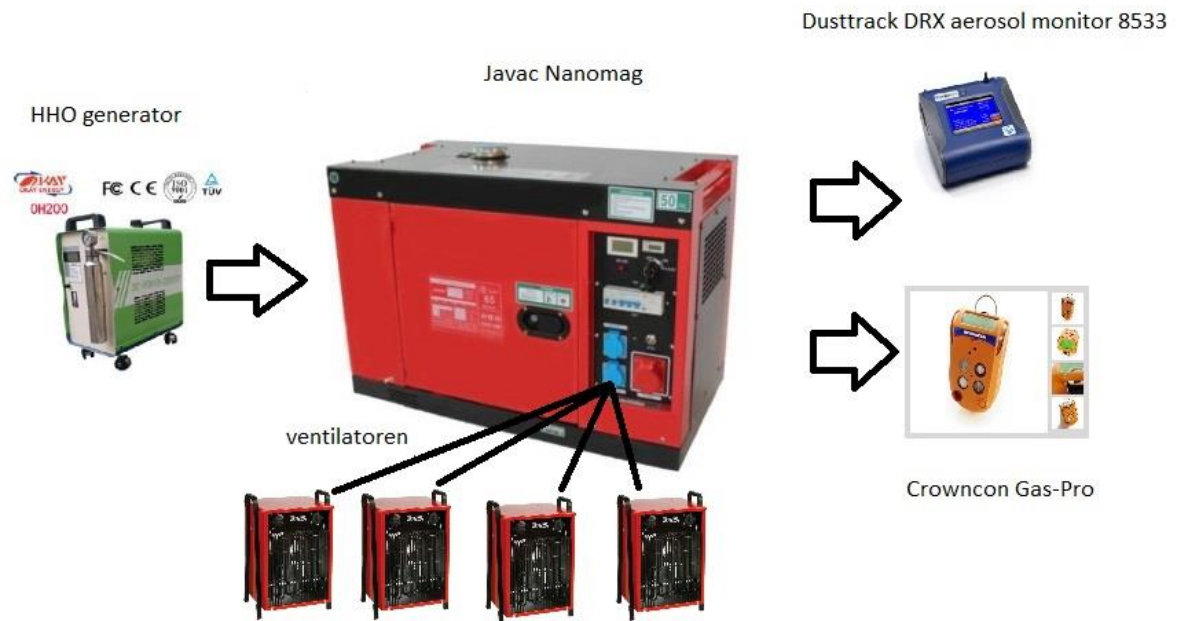
Wanneer deze HHO in de motor terecht komt, zal deze een katalytische verbranding veroorzaken. Hierdoor wordt de CH-ketting gestimuleerd, de verbranding van ontvlambare gassen verbeterd en onverbrande HC, CO en PM worden geoxideerd.

Wij hopen tijdens ons onderzoek gunstige resultaten te bekomen, waarbij men bij het toevoegen van waterstof lagere emissies zal meten. Deze emissies omvatten NO, NO<sub>2</sub> en PM's worden gemeten bij verschillende belastingen. Hieruit hopen we te leren welke veranderingen er in de motor zelf afspeelen.

### 2.1 Methode

De HHO-generator wordt gekoppeld met de inlaat van de dieselgenerator (Javac Nanomag), HHO wordt dus mee aangezogen in de verbrandingskamer van de generator. De samenstelling van de uitlaatgassen gaan we onderzoeken aan de hand van de waardes van NO, NO<sub>2</sub> en PM's met volgende detectie instrumenten; de Crowncon Gas -Pro en de Dusttrack DRX aerosol monitor 8533. De generator belastte we met ventilatoren. Als brandstof is er RME (Rapeesed Oil Methyl Esters) gebruikt, een soort biodiesel dat onder de alternatieve brandstoffen valt.





Figuur 3 Onderzoeksopstelling

Bron: Eigen werk

De waarden NO en NO<sub>2</sub> worden hieronder gespecificeerd.

- NO<sub>x</sub>'en

Worden beschreven als de verzamelnaam van alle mono- stikstofoxiden, deze omvatten NO, NO<sub>2</sub> en NO<sub>3</sub>.

- NO

Stikstofmonoxide is een anorganische verbinding die ontstaat bij verbrandingsprocessen. Het is een kleur- en geurloze stof die luchtverontreiniging veroorzaakt.

- NO<sub>2</sub>

Stikstofdioxide is een is een anorganische verbinding van zuurstof en stikstof, deze draagt ook bij de vervuiling van de lucht, zure regens en smog. NO<sub>2</sub> is zeer gevaarlijk voor ons ademhalingsstelsel. Wanneer men voor een korte periode wordt blootgesteld, leidt dit tot astma of andere ademhalingsproblemen.

Een langere blootstelling leidt tot de ontwikkeling van astma en kan infecties op het ademhalingsstelsel ontwikkelen. De stof is van roodbruine kleur en heeft als eigenschap dat ze gemakkelijk oplost in water. NO<sub>2</sub>, naast andere NO<sub>x</sub>' en draagt bij tot de reactie met andere chemicaliën die PM 's en ozon vormen.

- PM

PM staat voor *particulate matter* of *particulate pollution*, het is de term voor de mix van vaste deeltjes en vloeibare druppels aanwezig in de atmosfeer. Deze deeltjes bestaan meestal uit stof, vuil, roet en rook. Sommige zijn met het blote oog waarneembaar andere zijn dan weer te klein en zijn enkel zichtbaar met een daarvoor ontworpen detectietoestel. De grootte van deze deeltjes wordt uitgedrukt door PM<sub>25</sub> en PM<sub>10</sub>. PM 's zijn meestal het resultaat van complexe reacties van chemicaliën zoals SO<sub>2</sub> of NO. Deze emissies worden vaak uitgestoten door power plants, industrieën of gemotoriseerde voertuigen. Wanneer men PM 's zal inhaleren kan dit tot serieuze gezondheidsproblemen leiden, zeker wanneer deze kleiner dan 10 micrometer zijn, want deze kunnen tot diep in de longen geraken en sommige komen zelfs tot in de bloedbaan terecht.

## 2.2 Materialen

### 2.2.1 Detectie instrumenten

- Crowncon Gas-Pro:



Figuur 4 Crowncon Gas-Pro

Bron: <https://www.crowncon.com/uk/products/portables/gas-pro.html>

Een detectie toestel dat tot vijf verschillende soorten gas kan meten, speciaal ontworpen voor arbeiders die beperkt bereikbare ruimtes moeten betreden.

Meetlimieten:

<b>GAS</b>	<b>BEREIK</b>	<b>ALARM</b>	<b>RESOLUTIE</b>
<b>NO<sub>x</sub></b>	0-100 PPM	25 PPM	1 PPM
<b>NO</b>	0-20 PPM	1 PPM	0,5 PPM

*Tabel 1 Meetlimieten Crowncon Gas- Pro*

Bron: <https://www.crowcon.com/uk/products/portables/gas-pro.html>

- Dusttrack DRX aerosol monitor 8533



*Figuur 5 Dusttrack DRX aerosol monitor 8533*

Bron: <http://www.tsi.com/DUSTTRAK-DRX-Aerosol-Monitor-8533/>

Dit toestel laat ons toe de PM te meten. PM heeft een luchtverontreinigende eigenschap dat schadelijk kan zijn voor onze gezondheid, wanneer deze in geringe concentraties aanwezig is in de atmosfeer.

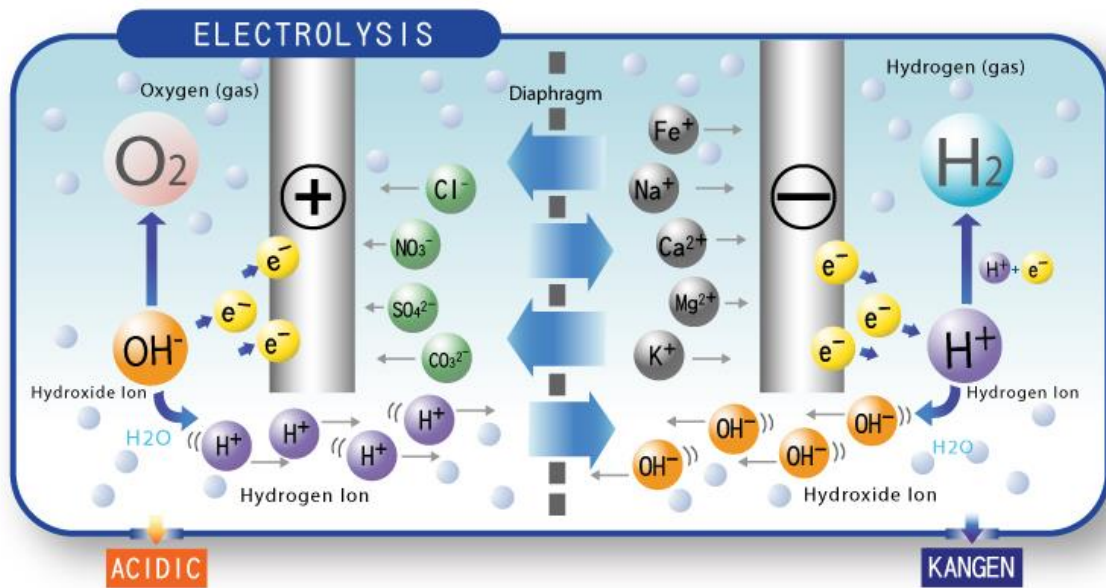
## 2.2.2 Oxy- hydrogen generator



*Figuur 6 Oxy-hydrogen generator*

*Bron: [http://www.okayenergy.com/d/files/download/okay-catalogue-2016\\_1.pdf](http://www.okayenergy.com/d/files/download/okay-catalogue-2016_1.pdf)*

De HHO-generator (type OH200) zal water door elektrolyse splitsen in waterstof en zuurstof, specifiek in twee waterstofmoleculen en één zuurstofmolecuul. De elektrolyse van HHO is op elke manier anders dan de klassieke elektrolyse. Men gaat een reactie krijgen tussen water en een elektrolyt, namelijk KOH, de reactie ontstaat door een spanning op de elektrodes te zetten. Bij de kathode gaan de watermoleculen elektronen aantrekken om  $\text{OH}^-$  ionen en  $\text{H}_2$  moleculen te maken.  $\text{OH}^-$  ionen gaan via de elektrolyt naar de anode waar deze samen smelten en elektronen opgeven om water, elektronen en  $\text{O}_2$  te maken.



Figuur 7 HHO-elektrolyse

Bron: <http://hydrogen-car.eu5.org/?p=124>

De generator kan voor meerdere toepassingen gebruikt worden namelijk lassen, snijden, polieren, ... maar voornamelijk door de juwelenindustrie.

De HHO-generator heeft twee verticale cilindervormige tanks waar de elektrolyse zal plaatsvinden met behulp van elektrodes. De productie zal het hoogst zijn wanneer de alternerende polariteit + + + is. De toevoer van water en van het elektrolyt, wordt gebruikt voor de productie van de elektrolyse te versnellen door het geleidingsvermogen te verhogen, vindt men in het horizontaal geplaatst buffervat. Bij de volgende proeven wordt KOH (kaliumhydroxide) gebruikt, men moet wel opletten want deze stof is zeer corrosief en kan er ook tijdens elektrolyse chloorgas vrijkomen. Elektrolyse wordt gestuurd met PWM† hiermee wordt de productie ook geregeld wordt. Het debiet kan men manueel regelen aan de hand van een potentiometer en afgelezen worden op de display. De geleverde druk is terug te vinden op de barometer. Hieronder enkele parameters van de OH200:

---

† PWM: pulse width modulation of puls breedte modulatie is een vorm van elektrische voeding of een manier voor digitale dataoverdracht. Het is een elektrisch signaal in blok golf met een vaste frequentie. Men heeft een signaal 1 (volledige spanning) of 0 (spanning wordt uitgeschakeld). Bij PWM gaat men de arbeidscyclus van het signaal aanpassen, dit met behulp van de tijd.

AC Voltage Requirement (V)	220/110 50/60Hz
Phase	single
DC Voltage & Current (A)	5V 60A
Power Consumption (kw/h)	0.7
Max Gas Output	200L/h
Max. Working Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	2
Max. Water Consumption (L/h)	0.11
Water Feed	manual
Max. Flame Modifier Consumption (L/h)	0.1
Flame Modifier Feed	manual
Dimensions - L*W*H (mm)	450*250*510mm
Gross Weight (kg)	20
Power Supply Protection Grade	IP21S
Ventilation Space Requirement (mm)	200 in each direction

*Tabel 2 Parameters OH200 generator*

Bron: [http://www.okayenergy.com/d/files/download/okay-catalogue-2016\\_1.pdf](http://www.okayenergy.com/d/files/download/okay-catalogue-2016_1.pdf)

### 2.2.3 Javac Nanomag

De generator die onze proefopstelling bevatte, was een Javac Nanomag. De Nanomag generatoren wekken elektriciteit op door een permanent magnetisch veld door middel van magneten gemaakt van aluminium, nikkel en koolstof. Deze magneten worden gemonteerd op de rotor. De generator is een luchtgekoelde versie waaruit men een vermogen van 6kW kan halen. Deze is uitgerust met een 400V uitgang, voor zeer zware toepassingen te voeden met een snelheid van 3000 toeren per minuut.



*Figuur 8 Javac Nanomag*

Bron: <https://javac.eu/product/nanomag-3000-tpm-generatoren/>

## 2.3 Proef

### 2.3.1 Voorbereiding

Bij de eerste testopstelling is er geprobeerd de maximale leveringsdruk en debiet te testen. Dit door de kraan (output) gesloten te houden tot een druk van 1,8MPa, vervolgens zal het debiet en druk dalen. Op 1,6MPa gaan we de kraan terug openzetten om het debiet de mogelijkheid te geven om zich te kunnen stabiliseren, waarna we de kraan opnieuw sluiten. De ideale situatie verkrijgen we bij een druk van 1,6MPa met een piekdebiet van 80l/h en met een constante van 72l/h (wanneer deze regeling nog niet optimaal is, kan de druk zakken naar 1,3MPa). Het is belangrijk om bij de opstart de output gesloten te houden zodat de druk zich kan opbouwen.

### 2.3.2 Opstelling

Als eerst is er een mengsel van KOH en water gemaakt die in het horizontaalgeplaatst vat werd gegoten. De dieselgenerator werd opgestart. Wanneer deze een bepaalde uitlaatemperatuur had, konden we de testen uitvoeren zonder het toevoegen van waterstof. Nadat deze testen tot een goed einde waren gebracht, konden we de HHO-generator opstarten en de testen uitvoeren met de toevoeging van waterstof. Allereerst hanteerde we deze met een debiet van 100 l/ h, daarna met 150 l/ h. De generator werd ook belast met behulp van ventilatoren.



*Figuur 9 Opstelling OH generator*

*Bron: Eigen werk*



Figuur 10 Opstelling generator

Bron: Eigen werk

### 2.3.3 Testresultaten proef

Het onderzoek werd uitgebreid tot het meten van verschillende parameters namelijk de samenstelling en de temperatuur van de uitlaatgassen. Deze parameters werden gemeten bij verschillende belastingen (namelijk 0kW, 1,4kW, 2,8kW, 3,5kW en 4,9kW) met of zonder toevoeging van HHO.

<b>NO</b>				
<b>Load</b>	<b>RME</b>	<b>100IH2</b>	<b>150IH2</b>	
<b>0</b>	0,00	0,00	0,83	
<b>1,4</b>	0,00	1,67	1,50	
<b>2,8</b>	3,33	7,67	7,67	
<b>3,5</b>	6,00	11,83	9,83	
<b>4,9</b>	8,50	21,33	13,50	
<b>NO<sub>2</sub></b>				
<b>0</b>	3,30	3,23	3,53	
<b>1,4</b>	4,58	5,43	6,05	
<b>2,8</b>	4,28	5,10	5,30	
<b>3,5</b>	3,52	3,97	4,53	
<b>4,9</b>	1,10	1,50	1,62	
<b>PM</b>				
<b>0</b>	1,99	2,36	3,61	
<b>1,4</b>	2,75	4,87	5,24	
<b>2,8</b>	4,35	7,93	7,72	
<b>3,5</b>	4,72	8,67	8,00	
<b>4,9</b>	7,00	16,35	14,75	

Tabel 3 Algemene testresultaten

Bron: Eigen werk



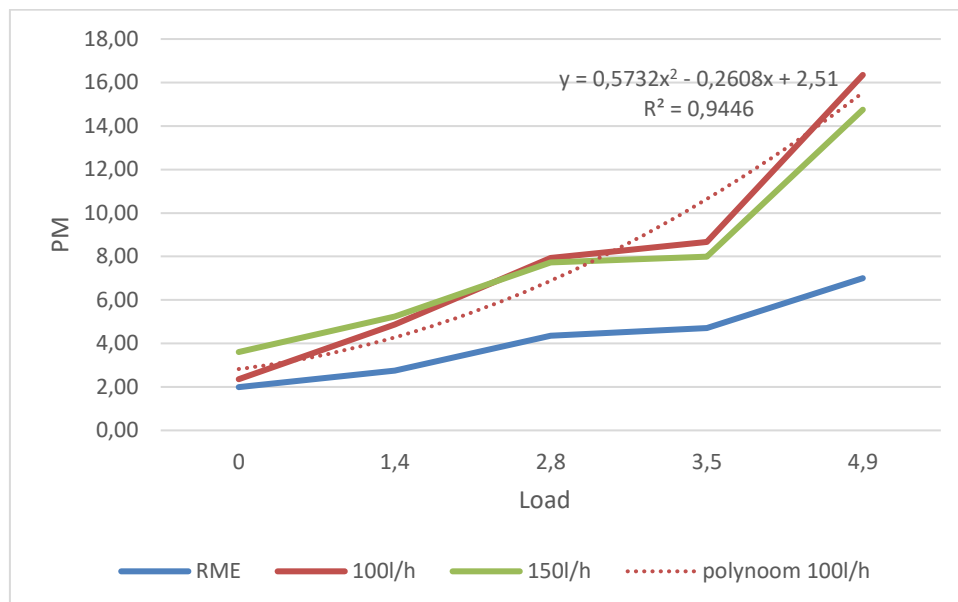
### 2.3.3.1 Testproef: NO

Volgende testresultaten geven de waarden van NO weer met of zonder toevoeging van waterstof en bij de verschillende belastingen.

NO	RME	100IH2	150IH2
0	0,00	0,00	0,83
1,4	0,00	1,67	1,50
2,8	3,33	7,67	7,67
3,5	6,00	11,83	9,83
4,9	8,50	21,33	13,50

Tabel 4 Testresultaten NO

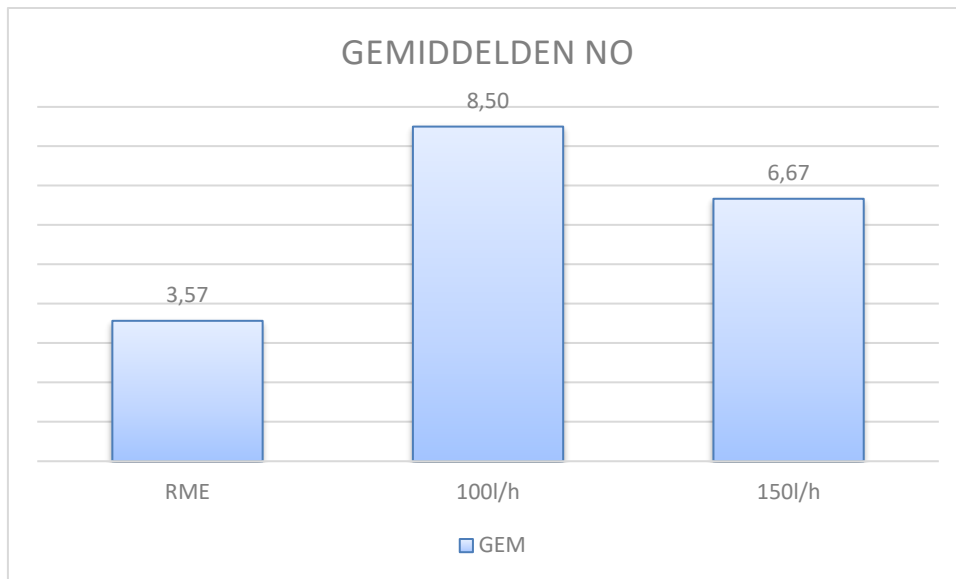
Bron: Eigen werk



grafiek 1 Testresultaten NO

Bron: Eigen werk

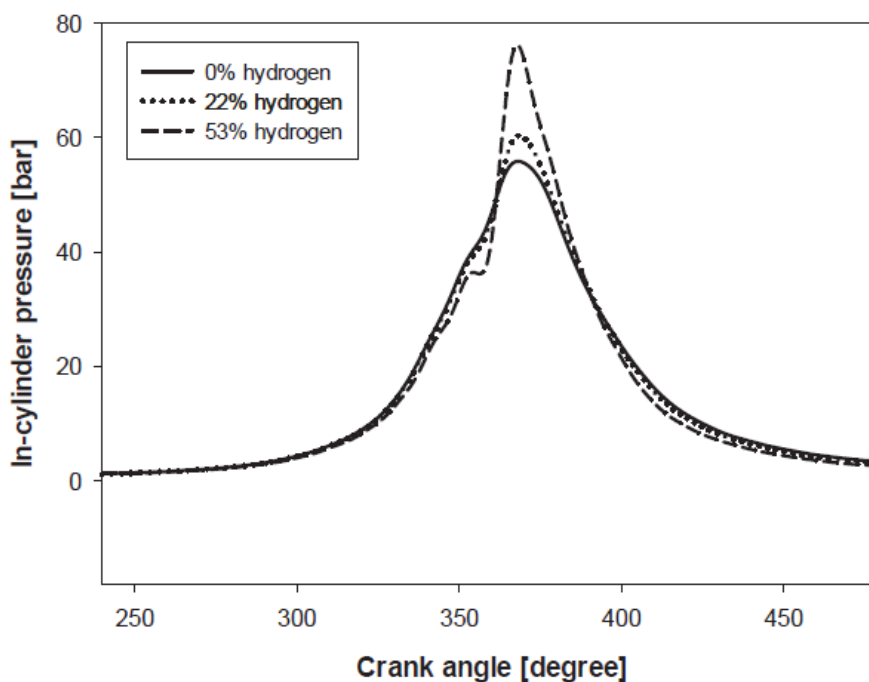
Uit deze resultaten vinden we een toename van NO. De grafiek wordt steiler naargelang de belasting meer is dan 1,4kW. Hierdoor zal de motor meer brandstof inspuiten en meer lucht aanzuigen. Wanneer we HHO in de cilinder introduceren, zal deze sneller verbranden met als gevolg dat er hogere drukken en temperaturen in de cilinder aanwezig zullen zijn. Dit resulteert in een stijging van NO emissies.



grafiek 2: Gemiddelden NO

Bron: Eigen werk

Op grafiek 2 zijn de gemiddelden van de gemeten NO -waarden bij een verschillende fase opgesteld, namelijk met RME of met toevoeging van waterstof (100l/h – 150l/h). Vanuit de trendlijn zien we duidelijk dat NO stijgt wanneer men RME met een toevoeging van waterstof simuleert. Deze vaststelling wordt bevestigd op de grafieken 1 & 2.

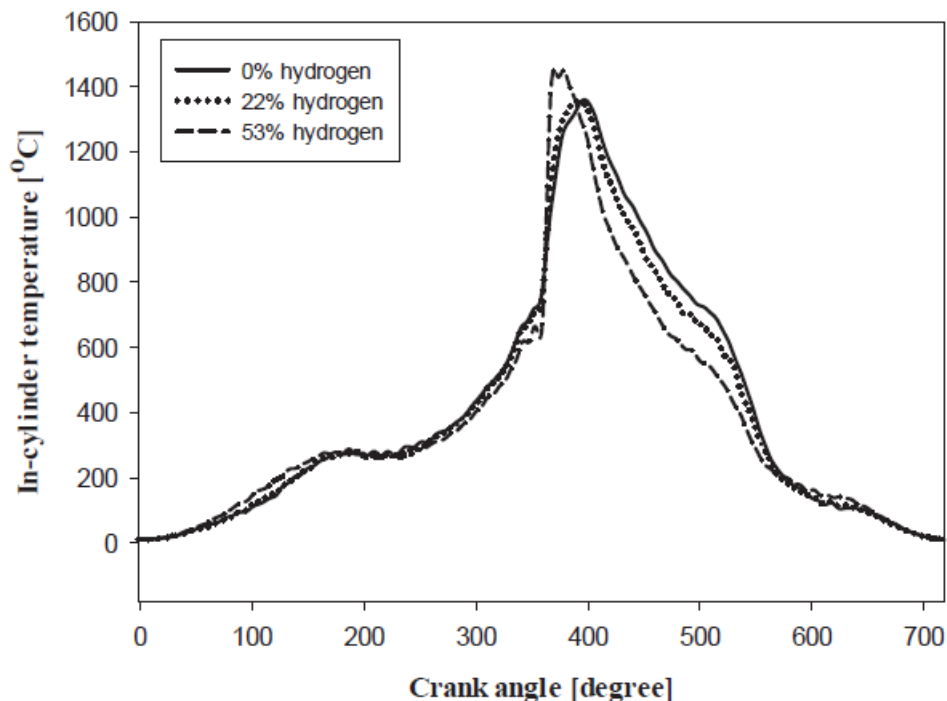


grafiek 3: Effect of different percentages of hydrogen enrichment on in-cylinder gas pressure related to the crank angle at 1100 rpm engine speed & fuel engine load

Bron: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915301750>

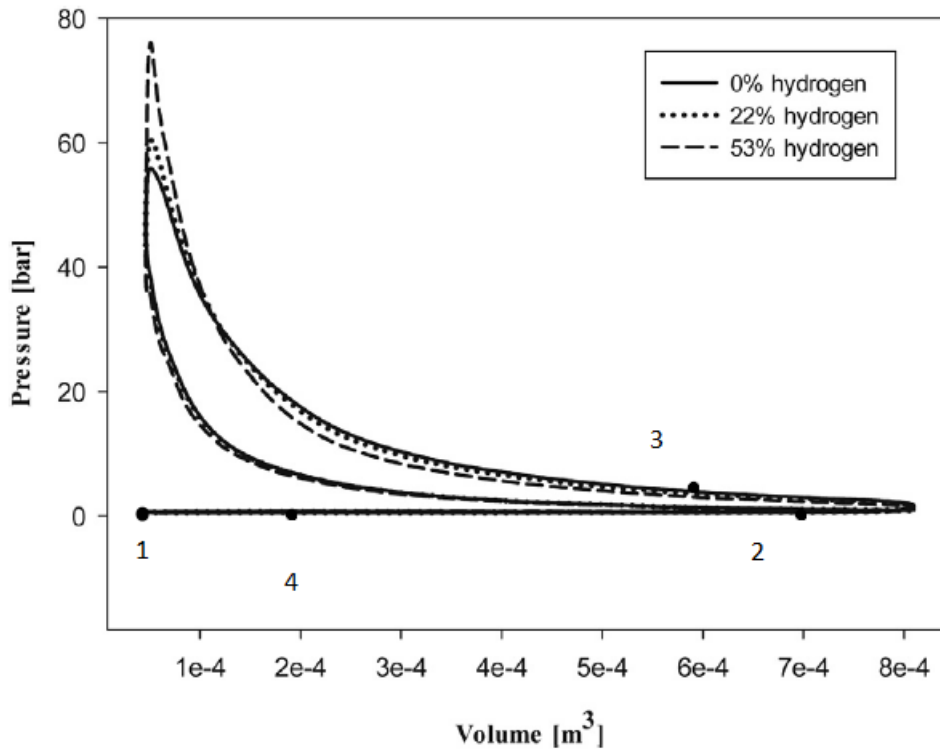
De hogere drukken in de cilinder zijn te danken aan de hoge vlamsnelheid van waterstof, waterstof zal dus een snellere ontbranding met zich meebrengen. In grafiek 3 ziet men het effect van waterstof op de drukken in de cilinder bij een constant toerental en een constante belasting van de motor. Deze waarden zijn afkomstig vanuit een onderzoek van Yasin Karagoz, Ilker Güler, Tarkan Sandalci, Levent Yûksek en Ahmet Selim Dalkılıc (2015). Bij een toevoeging van 53% waterstof zal de druk met ongeveer 20 bar gestegen zijn bij een krukhoek van 370°, t.o.v. de druk met de klassieke brandstof. In grafiek 4 vindt men het effect van waterstof op de temperatuur in de cilinder, deze stijgt een 100°C bij een toevoeging van waterstof (53%) t.o.v. de klassieke brandstof beide onder een krukhoek van 400°.

Vanuit een andere bron (I.T. Yilmaz, A. Demir en M. Gumus, 2016) kan men ook stellen dat de piekdrukken in de cilinder vroeger vallen ten gevolge van de ontbrandingsvertraging die zich voordoet. Deze is volgens hen te wijten aan de chemische reactie die waterstof heeft op de klassieke brandstof tijdens de verbranding.



grafiek 4: : Effect of different percentages of hydrogen enrichment on in-cylinder gas temperature related to the crank angle at 1100 rpm engine speed & fuel engine load

Bron: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915301750>



grafiek 5: Effect of different percentage of hydrogen enrichment on cylinder gas pressure related to cylinder volume at 1100 rpm engine speed and full engine load

Bron: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915301750>

Grafiek 5 (Yasin Karagoz, Ilker Güler, Tarkan Sandalci, Levent Yûksek en Ahmet Selim Dalkılıc ,2015), stelt een PV- diagram voor. Een PV- diagram geeft de verbrandingscyclus weer van een motor, in ons geval de diesel- of verbrandingsmotor. Bij n°1 in de grafiek gaat de motor lucht aanzuigen, op atmosferische druk, hierbij meten we een constante druk met een veranderend volume, dit wordt een isobaar genoemd in de thermodynamica. Vanaf n°2 in de grafiek gaat men deze comprimeren, hierbij stijgt de druk aanzienlijk. Nadat de verbranding heeft kunnen plaatsvinden, zal men expanderen naar n°3. Als laatste zal men zich van de uitlaatgassen ontdoen naar n°4. De totale geleverde arbeid van het systeem kan men bepalen aan de hand van de oppervlakte van de 'banaan'. Met deze informatie in het achterhoofd en de gemeten waarden, kan men besluiten dat met toevoeging van waterstof de verbranding verbetert. Men bekommt ook hogere piekdrukken en bereikt een homogener verbranding, ten gevolge van de hoge vlamsnelheid van waterstof.

Bij een onderzoek is het belangrijk de betrouwbaarheid van de gemeten waarden te testen, dit kan met behulp van een t-toets gedaan worden.

Bij een t-toets gaan we de betrouwbaarheid toetsen van een gemiddelde tegenover een gekend gemiddelde en dit op een betrouwbaarheidsfactor van 5% betrouwbaarheidsinterval, ook wel het toetsen van de hypothesen genoemd. Het is een manier om hypothesen te vergelijken. Door middel van het verschil van het steekproefgemiddelde en een referentiewaarde van dat gemiddelde te berekenen. De gevonden waarden vergelijkt men dan met het acceptatiegebied in de t-tabel (zie bijlage). Zo kan men berekenen of dat een gemeten waarde significant zijn of niet.

NO	RME	100IH2	150IH2
	$\mu_0$	$\mu_1$	$\mu_2$
<b>GEM</b>	3,57	8,50	6,67
<b>DEV</b>	3,73	8,59	5,44
			5% t-verdeling
<b>t-toets 100I/h</b>	1,28356405		$\Leftrightarrow$ 2,13
<b>t-toets 150I/h</b>	1,27385309		
<b>H0:</b>	$\mu_0 < \mu_1$ $\mu_0 < \mu_2$	=	WAAR
<b>H1:</b>	H0	=	ONWAAR

Tabel 5 T-toets NO

Bron: Eigen werk

Uit deze berekening kunnen we besluiten dat de waarden niet significant zijn. De nulhypothese wordt verworpen. Dus er wordt geen verbetering vastgesteld ten gevolge van het toevoegen van H<sub>2</sub>.

### 2.3.3.2 Testproef NO<sub>2</sub>

Volgende testresultaten geven de waarden van NO<sub>2</sub> weer met of zonder de toevoeging van waterstof en bij verschillende belastingen.

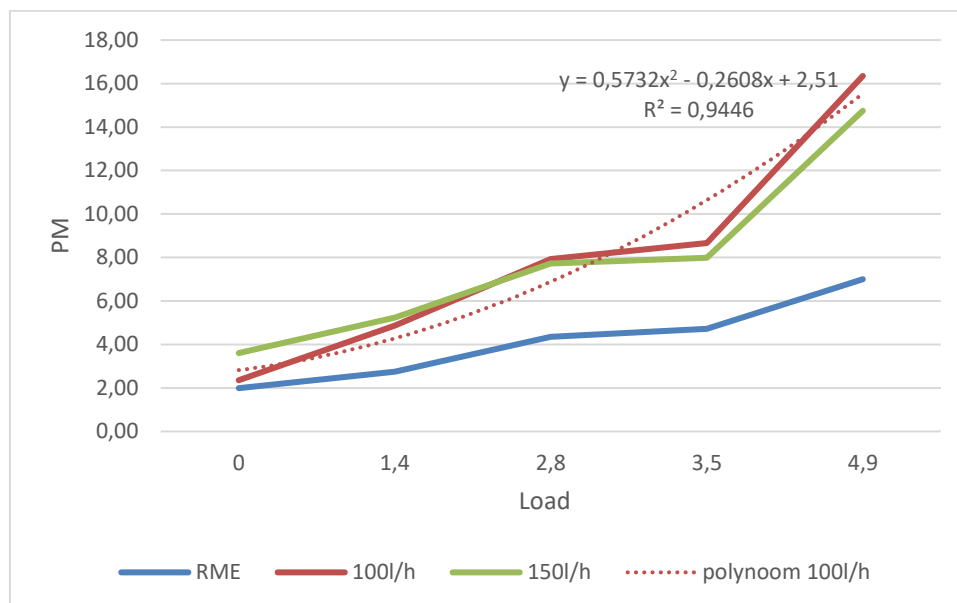
NO <sub>2</sub>	RME	100IH2	150IH2
0	3,30	3,23	3,53
1,4	4,58	5,43	6,05
2,8	4,28	5,10	5,30
3,5	3,52	3,97	4,53
4,9	1,10	1,50	1,62

Tabel 6 Testresultaten NO<sub>2</sub>

Bron: Eigen werk

NO<sub>2</sub> is sterk afhankelijk van de reactie duur van de verbranding, de temperatuur in de cilinder en de hoeveelheid zuurstof. Doordat waterstof hogere temperaturen met zich mee zal brengen, kan men zich dus verwachten aan hogere emissie waarden.

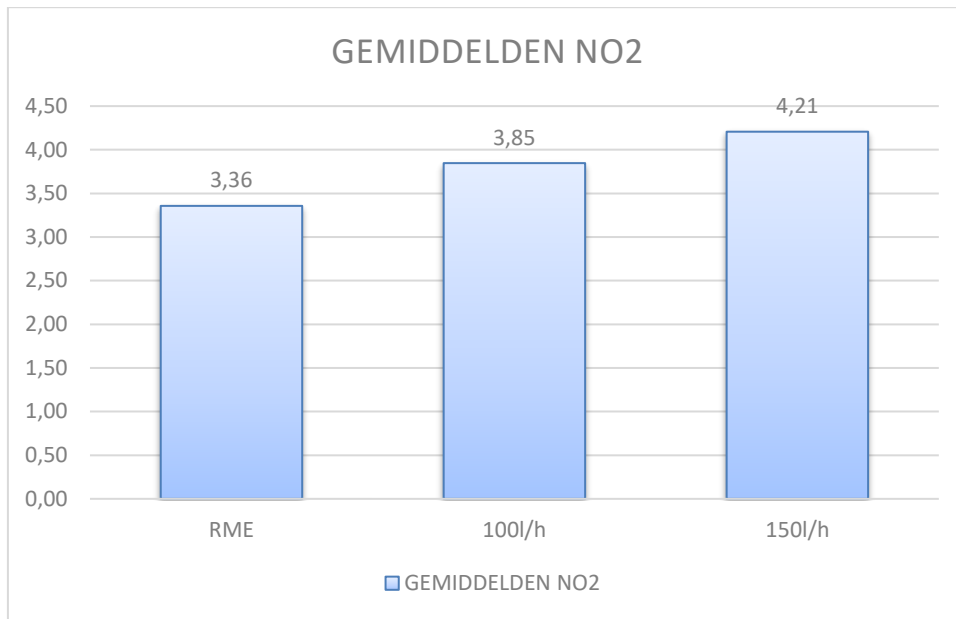
Omdat wij in het onderzoek HHO gebruiken, is de aanwezige hoeveelheid zuurstof ook hoger. Dit zal zich ook vertalen in de resultaten.



grafiek 6 Testresultaten NO<sub>2</sub>

Bron: Eigen werk

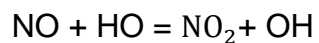
In grafiek 6 gaat men alle gemeten waarden afhankelijk van de belasting vergelijken met de NO<sub>2</sub> uitstoot. Vanaf een belasting van 1,4kW dalen alle waarden aanzienlijk zowel met of zonder het toevoegen van waterstof. De piek bij 1,4kW kan een gevolg zijn van de onverbrande deeltjes H<sub>2</sub>, afhankelijk van de belasting op de motor.



grafiek 7: Gemiddelden NO<sub>2</sub>

Bron: Eigen werk

Vanuit grafiek 7 kan men stellen dat NO<sub>2</sub> zal stijgen wanneer men waterstof zal toevoegen. De oorzaak hiervan is de waterstof zelf, wanneer men waterstof in de cilinder brengt, zal de hoeveelheid HO<sub>2</sub> ook stijgen. Vanuit de chemie zien we dat HO<sub>2</sub> de conversie van NO en NO<sub>2</sub> zal beïnvloeden. Daarom zien we een daling van NO maar ook een stijging van NO<sub>2</sub>.



<b>NO<sub>2</sub></b>	<b>RME</b>	<b>100IH2</b>	<b>150IH2</b>
	$\mu_0$	$\mu_1$	$\mu_2$
<b>GEM</b>	3,36	3,85	4,21
<b>DEV</b>	1,37	1,58	1,72
			5% t-verdeling
<b>t-toets 100I/h</b>	0,69345795		<=> 2,13
<b>t-toets 150I/h</b>	1,10373581		
<b>H0:</b>	$\mu_0 < \mu_1$ $\mu_0 < \mu_2$	=	WAAR
<b>H1:</b>	H0	=	ONWAAR

Tabel 7 T-toest NO<sub>2</sub>

Bron: Eigen werk

Uit deze berekening kunnen we besluiten dat de waarden van NO<sub>2</sub> niet significant zijn. De nulhypothese wordt verworpen. Dus er wordt geen verbetering vastgesteld ten gevolge van het toevoegen van H<sub>2</sub>.

### 2.3.3.3 Testproef PM

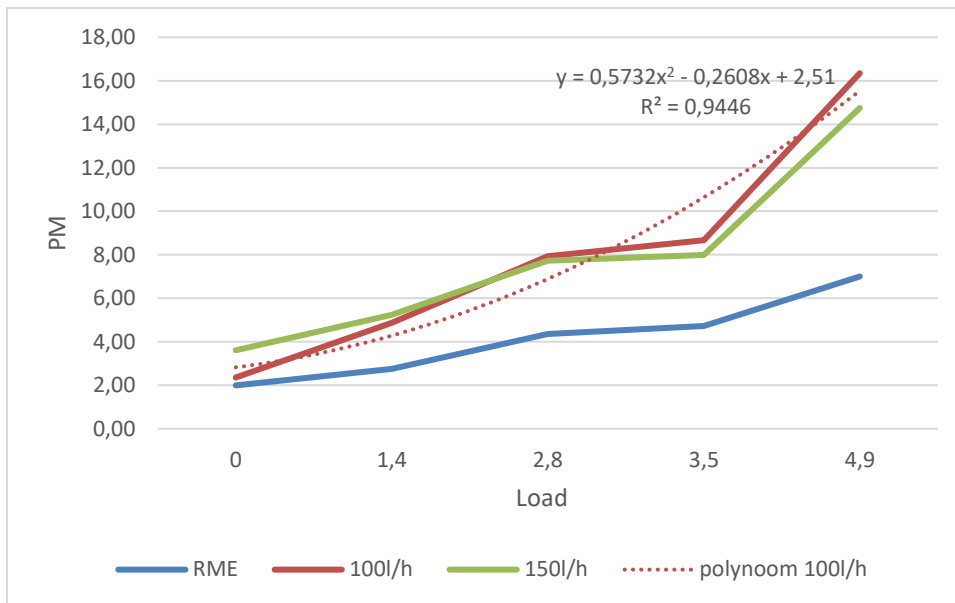
Volgende testresultaten geven de waarden van PM weer met of zonder de toevoeging van waterstof en bij verschillende belastingen.

<b>PM</b>	<b>RME</b>	<b>100IH2</b>	<b>150IH2</b>
<b>0</b>	1,99	2,36	3,61
<b>1,4</b>	2,75	4,87	5,24
<b>2,8</b>	4,35	7,93	7,72
<b>3,5</b>	4,72	8,67	8,00
<b>4,9</b>	7,00	16,35	14,75

Tabel 8 Testresultaten PM

Bron: Eigen werk

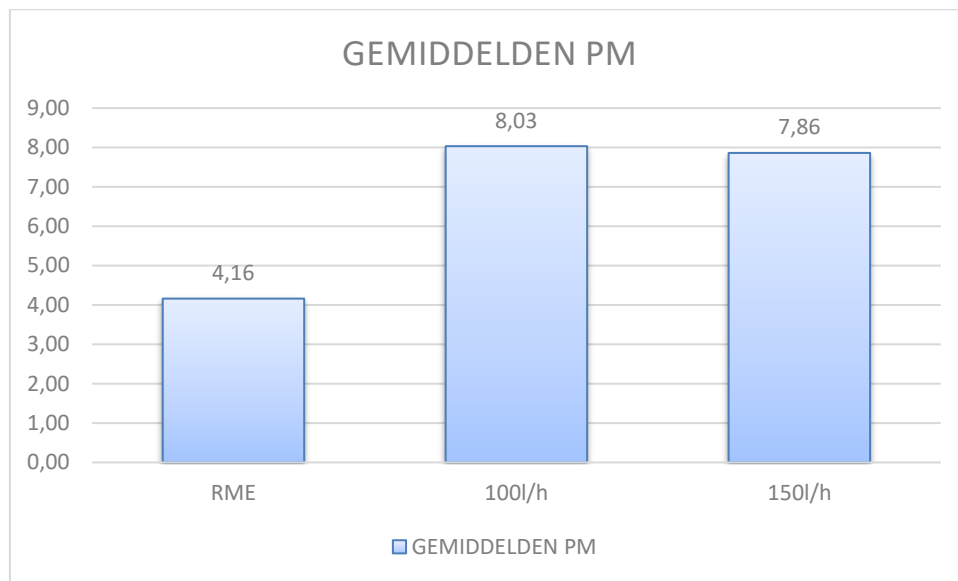




grafiek 8 Testresultaten PM

Bron: Eigen werk

Vanuit de grafiek kan men zeggen dat wanneer de motor zonder belasting draait de invloed van HHO geen tot weinig effect heeft. Wanneer een motor zonder belasting draait zal de brandstof toevoer laag zijn waardoor men sowieso minder PM's zal generen in vergelijking met volle belasting. Bij een hogere belasting zien we duidelijk het effect van HHO. Het oxiderend effect op eventuele vervuilende afzettingen in de motor kunnen hier een invloed op hebben. PM's kunnen ook een gevolg zijn van een slechte verbranding maar aangezien waterstof de eigenschap heeft om deze te stimuleren kan men deze hypothese weerleggen.



grafiek 9: Gemiddelden PM

Bron: Eigen werk

PM	RME	100IH2	150IH2
	$\mu_0$	$\mu_1$	$\mu_2$
<b>GEM</b>	4,16	8,03	7,86
<b>DEV</b>	1,94	5,29	4,26
			5% t-verdeling
<b>t-toets 100l/h</b>	1,63747771		<=> 2,13
<b>t-toets 150l/h</b>	1,94326056		
<b>H0:</b>	$\mu_0 < \mu_1$ $\mu_0 < \mu_2$	=	WAAR
<b>H1:</b>	H0	=	ONWAAR

Tabel 9 T-toets PM

Bron: Eigen werk

Uit deze berekening kunnen we besluiten dat de waarden significant zijn. De nulhypothese wordt verworpen. Dus er wordt geen verbetering vastgesteld ten gevolge van het toevoegen van H<sub>2</sub>.

## 2.4 Besluit

De gemeten waardes van NO en NO<sub>2</sub> zijn niet significant bevonden, we kunnen ons besluit dus niet baseren op deze metingen. De betrouwbaarheid van deze testen zijn niet naar behoren ten gevolge van uitschieters of het geringe aantal meetresultaten. Het onderzoek van (S. Liu, R. N. Li, Y. Zhao, X. X. Li, Z. Wang, 2015) toont wat de gevolgen van NO en NO<sub>2</sub> wanneer men waterstof toevoegt.

Het toevoegen van waterstof bij een dieselmotor is volgens hen de oplossing tegen luchtvervuiling. Waterstof heeft als eigenschap de verbranding te katalyseren en te optimaliseren. Emissies zijn gemeten geweest bij verschillende snelheden en belastingen. Bij een lage belasting zijn de effecten van HHO klein. Wanneer men de belasting gaat opdrijven, zal men grotere waardes meten van NO en PM omdat de chemische reactie van HHO en diesel nog niet optimaal zijn. Bij 100% belasting zullen alle soorten emissies aanzienlijk dalen ten gevolge van de betere vermenging van diesel en HHO. De daling van NO zal zich vertalen in een stijging van NO<sub>2</sub> door de chemische reactie in de verbrandingskamer. Omdat waterstof na verbranding geen HC, CO, SO<sub>2</sub>, rook, ozon, ... bevat, kan men deze elimineren bij het meten. Bij de testproef van PM kunnen we concluderen aan de hand van de waarden, dat door de toevoeging van waterstof de vervuilende componenten in de motor zullen oxideren en dat deze naar buiten worden gebracht met de uitlaatgassen. Waterstof heeft dus een decarboniserend effect in de motor. Verscheidene fabrikanten hebben daarom reeds installaties ontworpen die de motor gaan reinigen met behulp van waterstof.

Het effect van de RME brandstof is hier ook van groot belang. RME is een biodiesel en zal dus anders reageren dan de klassieke diesel. De brandstofsamenstelling heeft daarom afwijkende eigenschappen die de air- fuel ratio zullen beïnvloeden. Verder beïnvloeden ze ook de verneveling of inspuiting in de motor. Dit geeft als gevolg een slechte verbranding en hoge emissies waardoor de efficiëntie van de motor achteruit gaat.

### 3 Verdieping

Aan de hand van enkele andere onderzoeken inzake waterstof, kan ik een vergelijking opmaken van de effecten op de emissies waarbij waterstof wordt toegevoegd bij diesel, methaan en biogas tegenover het effect zonder de toevoeging van waterstof.

#### 3.1 Emissies van verscheidene brandstoffen vergelijken

##### 3.1.4 Diesel- RME- H<sub>2</sub>

<b>Emissies</b>	<b>DIESEL</b>	<b>RME</b>		<b>RME</b>	<b>RME- H<sub>2</sub></b>
<b>NO</b>				>	↓
<b>NO<sub>x</sub></b>	<	10- 30%	↑	<	↑
<b>CO</b>	>	70%	↓	>	↓
<b>CO<sub>2</sub></b>	>	5%	↓	>	↓
<b>PM</b>	>	60%	↓	>	↓
<b>HC</b>	>	50%	↓	>	↓

Tabel 10 Vergelijking emissies

Bron:

[https://www.researchgate.net/publication/277604993\\_Performance\\_and\\_specific\\_emissions\\_contours\\_through\\_the\\_operating\\_range\\_of\\_hydrogen-fueled\\_compression\\_ignition\\_engine\\_with\\_diesel\\_and\\_RME\\_pilot\\_fuels](https://www.researchgate.net/publication/277604993_Performance_and_specific_emissions_contours_through_the_operating_range_of_hydrogen-fueled_compression_ignition_engine_with_diesel_and_RME_pilot_fuels)

RME zal in vergelijking met de klassieke diesel uiteraard minder uitstoten, Toch zien we bij de uitstoot van NO<sub>x</sub> 'en een maximum van 30% bij de RME. Zoals eerder vermeldt, is dit te danken aan de hoeveelheid zuurstofatomen die er in biodiesels aanwezig zijn. Dit geldt hetzelfde voor RME en RME in combinatie met waterstof.

RME zal de temperatuur in de cilinder aanzienlijk doen stijgen en de ontstekingsperiode verlengen, afhankelijk van de hoeveelheid brandstof die men zal inspuiten. Deze zullen een negatief effect hebben op de emissies. Indien we de motor optimaliseren, kunnen we betere resultaten behalen.

Enkele voorbeelden van optimalisaties zijn een nauwkeurigere injectieregeling of werken met een EGR (*exhaust gas recirculation*).

### 3.1.5 Biogas- H<sub>2</sub>

Emissies	Biogas	
	Biogas- H <sub>2</sub> (dual)	Biogas (single)
HC	>	
NO <sub>x</sub>	<	Low load
NO <sub>x</sub>	>	Medium/ High load

Tabel 11 Vergelijking emissies

Bron: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.070>

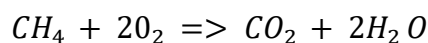
De effecten van biogas-H<sub>2</sub> op de motor zijn hogere temperaturen ten gevolge van een grotere aanwezigheid van CO<sub>2</sub> in het mengsel. De aanwezigheid van CO<sub>2</sub> is te danken aan het productieproces van het biogas. Langere ontstekingsperioden en een hogere NO<sub>x</sub> waarde zijn ook een gevolg van de aanwezigheid van CO<sub>2</sub>. De stijging van CO, HC en PM zijn een effect op de reductie van thermische oxidatie.

De koolwaterstoffen zullen dalen bij hogere temperaturen, dus wanneer men de motor zwaarder belast, oxideert de brandstof gemakkelijker. De belangrijkste reden van de aanwezigheid van de NO<sub>x</sub> 'en is dat men met hoge temperaturen te maken heeft in de cilinders en een groot aantal zuurstofatomen. (I.T. Yilmaz, M. Gumus, Midhat Talibi, Paul Hellier, & Nicos Ladommatos, 2016).

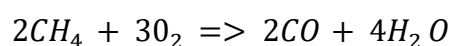
### 3.1.6 Methaan- H<sub>2</sub>

Methaan is een brandstof met vier waterstofatomen en één koolstofatoom en bestaat voornamelijk uit aardgas.

Methaan verbranden geeft vanuit de chemie de volgende resultaten.



Wanneer er niet voldoende zuurstof aanwezig is, zal er CO ontwikkelen.



Methaan in combinatie met waterstof zal de motor doen kloppen. Het kloppen van de motor is het vroegtijdig of ongecontroleerd zelf ontbranden van de brandstof. Door deze vervroegde drukontwikkeling zal de zuiger de neiging hebben om de krukas in tegengestelde richting te doen draaien. Een ander nadelig effect is back-fire, dit is wanneer de verbranding of explosie in de inlaat- of uitlaatcollector plaatsvindt in plaats van in de verbrandingskamer. De volgende effecten zijn te wijten aan een slechte fuel-air ratio. Enkele andere effecten zijn dat de ontstekingsperioden korter worden en de temperaturen gaan stijgen. De waarde van NO<sub>x</sub> zal variëren afhankelijk van de inspuitingsperioden. Wanneer men inspuit, gaat men hogere temperaturen genereren die de NO<sub>x</sub>'en zullen beïnvloeden. (Midhat Talibi, Ramanarayanan Balachandran, & Nicos Ladommatos, 2016)

### 3.2 Optimaliseren van het gebruik van waterstof

Uit het vorige hoofdstuk kan men besluiten dat waterstof algemeen een verhoging van de efficiëntie van de motor zal teweegbrengen. Wanneer we de motor zouden optimaliseren voor het gebruik van brandstof in combinatie met waterstof is het vanzelfsprekend dat we ook betere resultaten zouden behalen met een poging tot het reduceren van de emissies.

Aangezien we met hogere temperaturen te maken hebben is het belangrijk om zicht te krijgen op deze verandering in de motor. Dit kan aan de hand van sensoren. Sommige zijn ervan overtuigd dat de temperatuurstijging één gevolg is van de drukverhoging in de cilinder. Druksensoren zijn dus aangewezen in één of elke cilinder van de motor, deze dienen gekoppeld te zijn aan de brandstofpompen zodat men de verbranding kan regelen. Wanneer we de configuratie zo kunnen optimaliseren, is het theoretisch mogelijk om *zero* emissies uit te stoten.

### 3.3 Andere methodes voor het elimineren van emissies

Er worden tot op de dag van vandaag nog andere methodes onderzocht om de emissies na een verbranding te verbeteren. Er zijn twee verschillende methodes: de *in-cylinder improvements* en de *exhaust gas treatments*.

Onder de *in-cylinder improvements* hebben we de LTC (*low temperature combustion*). Hierbij gaat men de verbrandingstemperatuur verlagen zodat ook roet en NO<sub>x</sub> 'enworden gereduceerd. Maar ook door een *low pressure injection system*,

kunnen we de fuel- air ratio regelen voor elke cilinder apart waardoor de power output ook zal stijgen. Het nadeel aan dit systeem is dat wanneer men met gas van een lage dichtheid werkt, in combinatie met kleine motoren die hoge snelheden halen, de injectoren hoge volumes op korte tijd moeten vervoeren. De duurzaamheid van de injectoren zal dalen met grote gevolgen zoals lekken. Met behulp van *timed injection* kan men dit risico op *back- fire* reduceren. Door gebruik te maken van een EGR -klep (*exhaust gas recirculation valve*) of door de injectie te optimaliseren, gaat men erop toe zien dat alle brandstof aanwezig is vooraleer men zou gaan ontbranden.

Temperatuur en NO<sub>x</sub> 'en dalen, maar HC en CO stijgen. LTC-modificaties worden daarom vaak als *after treatment* gebruikt in combinatie met NO<sub>x</sub> traps, DOC (*diesel oxidation catalysts*) en DPF (*diesel performance filter*). NO<sub>x</sub> traps gaan de NO en NO<sub>2</sub> emissies reduceren door deze te absorberen tijdens arme perioden of lage belastingen. De NO<sub>x</sub> traps zijn een verbetering op de EGR en SCR. De EGR heeft een beperkte efficiëntie en de SCR een continue toevoer van uitlaatgassen nodig heeft. De diesel oxidation catalyst is een installatie op de uitlaat die de CO en HC emissies gaat reduceren door deze te oxideren. De chemische reactie heeft als resultaat enkel de uitstoot van CO<sub>2</sub> en water. De diesel performance filter zal roet en PM's verwijderen van de uitlaatgassen.

Een andere methode voor het reduceren van emissies kan men ook behalen door waterstof pas toe te voegen in de uitlaatcollector. De waterstof moet maar in kleine concentraties aanwezig zijn voor enig effect zal ontstaan. De temperatuur en de NO<sub>x</sub> 'en zullen aanzienlijk dalen. Volgens een andere studie kan dit ook bereikt worden door de geometrische vorm van de cilinder aan te passen.

## 4 Conclusie

Allereerst wil men benadrukken dat het gebruik van alternatieve brandstoffen vooral te wijten is aan de strengere regels inzake emissies. Al is soms de productie ervan niet zo milieuvriendelijk, wat dan tot tegenstrijdigheden leidt.

Volgens ons onderzoek kan men de verscheidene brandstoffen in combinatie met waterstof vergelijken. Bij de vergelijking van emissies komen we opmerkelijke resultaten tegen.

RME, een alternatieve brandstof, zal 30% meer NO<sub>x</sub> 'en uitstoten dan diesel. Wanneer men waterstof zal toevoegen bij de RME zal dit getal alleen maar stijgen, dit ten gevolge van het grote aantal zuurstofatomen aanwezig in het mengsel en de chemische reactie van HO<sub>2</sub>, die de conversie van NO naar NO<sub>2</sub> beïnvloedt. Bij 100% vermogen kan men wel zeggen dat de emissies (NO, CO, HC, PM) zullen dalen door het optimale verbruik. Vanuit dit onderzoek kan men dus ook stellen dat alternatieve brandstoffen geheel andere effecten op de motor hebben dan de klassieke brandstoffen. We meten hogere temperaturen in de cilinders en de ontstekingsperioden verschillen naargelang de soort brandstof.

Aan de hand van de belasting meet men bij biogas in combinatie met waterstof uiteenlopende waarden. Een lage belasting gaat gepaard met lage waarden. Maar bij een hoge belasting, meet men zeer hoge waarden. Dit kan men verklaren door de aanwezigheid van CO<sub>2</sub> in het biogas. Wanneer men hogere temperaturen hanteert, vindt men lage waarden van HC maar hoge waarden van NO<sub>x</sub> 'en.

Methaan heeft enkele slechte eigenschappen wanneer men deze zal combineren met waterstof. De motor zal niet efficiënt draaien en enkele problemen ondervinden. Ontstekingsperioden worden korter, temperaturen hoger en een hogere waarde aan NO<sub>x</sub> 'en kan men meten.

Het is moeilijk om de beste brandstof aan te duiden vermits men nog de mogelijkheid heeft om de motor te optimaliseren bij de verschillende brandstoffen.



# Bibliografie

- Ahmed Hassaneen, Jurgen Krahl, Axel Munack, Yvonne Ruschel, & Olaf Schroeder. (2010). Fuel economy and emission characteristics of Gas-to-Liquid (GTL) and Rapeseed Methyl Ester (RME) as alternative fuels for diesel engines, *fuel*.  
<https://doi.org/doi:10.1016/j.fuel.2012.01.077>
- Charles Ware. (2014). model for optimizing performance of HHO gas injection on Diesel engines. Retrieved from <http://www.hho-research.org/wp13.pdf>
- CMB. (n.d.). Hydroville. Retrieved January 27, 2018, from <http://www.hydroville.be/waterstof/7-roy/>
- College of the desert. (2001). hydrogen use in internal combustion engines, 29.
- Crowncon. (n.d.). *Crowcon gas-pro*. Retrieved from <https://www.crowcon.com/uk/products/portables/gas-pro.html>
- FathomShipping. (2013, July 29). the dawn of hydrogen as a marine fuel. Retrieved March 27, 2018, from <http://gcaptain.com/dawn-hydrogen-marine-fuel/>
- First liquid hydrogen carrier. (2014). Retrieved March 27, 2018, from <http://www.motorship.com/news101/ships-and-shipyards/first-liquid-hydrogen-carrier>
- How to assemble a HHO generator and why it works. (2011, June 5). Retrieved March 27, 2018, from <http://www.instructables.com/id/How-to-assemble-a-HHO-Generator-and-why-it-works/>
- I.T. Yilmaz, M. Gumus. (2016). Investigation of the effect of biogas on combustion and emissions of TBC diesel engine. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.034>
- I.T. Yimaz, M. Gumus, & A. Demir. (2016). effects of hydrogen enrichment of combustion characteristics of a CI engine. 28-11-2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.214>
- Javac. (n.d.). *Javac Nanomag*. Retrieved from <https://javac.eu/product/nanomag-3000-tpm-generatoren/>

- L.K. Sing. (n.d.). design and development of hydrogen fueled engine. Retrieved from [researchgate.com](https://www.researchgate.com)
- Midhat Talibi, Paul Hellier, & Nicos Ladommatos. (2016). Combustion and exhaust emission characteristics, and in-cylinder gas composition, of hydrogen enriched biogas mixtures in a diesel engine. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.070>
- Midhat Talibi, Ramanarayanan Balachandran, & Nicos Ladommatos. (2016). Influence of combusting methane-hydrogen mixtures on compression ignition engine exhaust emissions and in-cylinder gas composition. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.049>
- Office of energy efficiency & renewable energy. (n.d.). fuel cells. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>
- Okay energy. (n.d.). *OH200 oxy hydrogen generator*. Retrieved from [http://www.okayenergy.com/d/files/download/okay-catalogue-2016\\_1.pdf](http://www.okayenergy.com/d/files/download/okay-catalogue-2016_1.pdf)
- Raf Maes. (n.d.). foutentheorie. Retrieved from <http://www.optiloading.be/raf/cursus%20foutentheorie/foutentheorie.pdf>
- S. Imram, D. R. Emberson, Hassan Ali, Amjad Hussain, Balazs Ihracska, T. Korakianitis. (2015). Performance and specific emissions contours throughout the operating range of hydrogen-fueled compression ignition. [https://doi.org/DOI: 10.1016/j.aej.2015.05.007](https://doi.org/DOI:10.1016/j.aej.2015.05.007)
- S. Liu, R. N. Li, Y. Zhao, X. X. Li, & Z. Wang. (2015). effects on emissions of a diesel engine with premixed HHO. *RSC Advances*. <https://doi.org/10.1039/C5RA27761B>
- Shahid Imran, D.R. Emberson, AMjad Hussain, Hassan Ali, Balazs Ihracska, T. Korakianitis. (2015). Performance and specific emissions contours throughout the operating range of hydrogen-fueled compression ignition engine with diesel and RME pilot fuels. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/277604993\\_Performance\\_and\\_specific\\_emissions\\_c  
ontours\\_throughout\\_the\\_operating\\_range\\_of\\_hydrogen-  
fueled\\_compression\\_ignition\\_engine\\_with\\_diesel\\_and\\_RME\\_pilot\\_fuels](https://www.researchgate.net/publication/277604993_Performance_and_specific_emissions_contours_throughout_the_operating_range_of_hydrogen-fueled_compression_ignition_engine_with_diesel_and_RME_pilot_fuels)

Shipbusiness.com. (n.d.). what is low sulphur fuel oil? Retrieved from

<http://www.shipsbusiness.com/low-sulphur-fuel-oil.html>

TSI. (n.d.). *Dusttrack DRX aerosol monitor 8533*. Retrieved from

<http://www.tsi.com/DUSTTRAK-DRX-Aerosol-Monitor-8533/>

William F. Northrop, Lucas M. Vanderpool, Praveen V. Madathil, Dennis N. Assanis, & Stanislav

V. Bohac. (2010). Investigation of Hydrogen Emissions in Partially Premixed Diesel

Combustion. <https://doi.org/10.1115/1.4001069>

Yasin Karag oz a, Ahmet Selim Dalkılıc, c,\*, Levent Yu ksek a, & Tarkan Sandalcı a. (2015).

Effect of hydrogen enrichment on combustion characteristics, emissions and performance of a

diesel engine. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.064>

# Bijlage

## T- tabel

$1 - \alpha$	0.90	0.95	0.975	0.99	0.995	0.9975	0.999	0.9995
$n=1$	3.08	6.31	12.71	31.82	63.66	127.32	318.33	636.67
$n=2$	1.89	2.92	4.30	6.96	9.92	14.09	22.33	31.60
$n=3$	1.64	2.35	3.18	4.54	5.84	7.45	10.21	12.92
$n=4$	1.53	2.13	2.78	3.75	4.60	5.60	7.17	8.61
$n=5$	1.48	2.02	2.57	3.37	4.03	4.77	5.89	6.87
$n=6$	1.44	1.94	2.45	3.14	3.71	4.32	5.21	5.96
$n=7$	1.41	1.89	2.36	3.00	3.50	4.03	4.79	5.41
$n=8$	1.40	1.86	2.31	2.90	3.36	3.83	4.50	5.04
$n=9$	1.38	1.83	2.26	2.82	3.25	3.69	4.30	4.78
$n=10$	1.37	1.81	2.23	2.76	3.17	3.58	4.14	4.59
$n=11$	1.36	1.80	2.20	2.72	3.11	3.50	4.02	4.44
$n=12$	1.36	1.78	2.18	2.68	3.05	3.43	3.93	4.32
$n=13$	1.35	1.77	2.16	2.65	3.01	3.37	3.85	4.22
$n=14$	1.35	1.76	2.14	2.62	2.98	3.33	3.79	4.14
$n=15$	1.34	1.75	2.13	2.60	2.95	3.29	3.73	4.07
$n=16$	1.34	1.75	2.12	2.58	2.92	3.25	3.69	4.02
$n=17$	1.33	1.74	2.11	2.57	2.90	3.22	3.65	3.97
$n=18$	1.33	1.73	2.10	2.55	2.88	3.20	3.61	3.92
$n=19$	1.33	1.73	2.09	2.54	2.86	3.17	3.58	3.88
$n=20$	1.33	1.72	2.09	2.53	2.85	3.15	3.55	3.85
$n=21$	1.32	1.72	2.08	2.52	2.83	3.14	3.53	3.82
$n=22$	1.32	1.72	2.07	2.51	2.82	3.12	3.51	3.79
$n=23$	1.32	1.71	2.07	2.50	2.81	3.10	3.48	3.77
$n=24$	1.32	1.71	2.06	2.49	2.80	3.09	3.47	3.75
$n=25$	1.32	1.71	2.06	2.49	2.79	3.08	3.45	3.73
$n=26$	1.31	1.71	2.06	2.48	2.78	3.07	3.44	3.71
$n=27$	1.31	1.70	2.05	2.47	2.77	3.06	3.42	3.69
$n=28$	1.31	1.70	2.05	2.47	2.76	3.05	3.41	3.67
$n=29$	1.31	1.70	2.05	2.46	2.76	3.04	3.40	3.66
$n=30$	1.31	1.70	2.04	2.46	2.75	3.03	3.39	3.65
$n=40$	1.30	1.68	2.02	2.42	2.70	2.97	3.31	3.55
$n=50$	1.30	1.68	2.01	2.40	2.68	2.94	3.26	3.50
$n=100$	1.29	1.66	1.98	2.36	2.63	2.87	3.17	3.39
$n=200$	1.29	1.65	1.97	2.35	2.60	2.84	3.13	3.34
$n=\infty$	1.28	1.64	1.96	2.33	2.58	2.81	3.09	3.29