



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

FACULTEIT SCHEEPSWERKTUIGKUNDE

**CONSTRUCTIE VAN EEN SYSTEEM OM
UITLAATGASSEN TE KOELEN**

Meyers Ilan

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

Promotor: Dhr. Tim Janssens
academiejaar: 2019 – 2020

Voorwoord

Eerst en vooral zou ik graag mijn promotor T. Janssens willen bedanken. Voor het geduld en de hulp tijdens het uitwerken van het onderwerp. Het was niet altijd even gemakkelijk om met mij samen te werken. Wat laat uit de startblokken geschoten en dan de sluiting van de Hogere Zeevaartschool door COVID-19. Mede hierdoor is deze scriptie theoretisch van aard.

Ik koos voor dit onderwerp omdat het me interessant leek om het praktische deel, namelijk het ontwerpen van een koelsysteem, aan iets actueel te koppelen. Metingen van uitstoot en deze proberen reduceren is erg belangrijk in tijden van klimaatopwarming en veranderende wetgeving binnen de maritieme industrie hieromtrent.

Het praktisch deel is dus niet uitgewerkt. In de plaats hiervan ben ik dieper onderzoek gaan voeren naar de theoretische achtergrond van het onderwerp en dit proberen koppelen aan het doel van deze proef. Namelijk het effect van koelen en nabehandeling van uitlaatgassen aan boord van schepen en de regelgeving hieromtrent. Er wordt dus af en toe kort iets aangehaald wat in het praktisch deel zou gebruikt kunnen worden, maar hier is niet dieper op ingegaan door het ontbreken van de mogelijkheid tot uitwerken.

In deze scriptie probeer ik dus theoretisch te onderzoeken waarom de nabehandeling van uitlaatgassen aan boord van schepen zo belangrijk is en hoe dit praktisch zou uitgewerkt kunnen worden.

Samenvatting

In deze scriptie wordt kort de werking van verbrandingsmotoren aangehaald waarna onderzoek wordt gevoerd naar het effect van nabehandeling op de uitlaatgassen. Met als hoofdfocus de koeling van deze gassen.

Het effect op de uitlaatgassen is een belangrijk onderdeel naar steeds strenger wordende uitstootnormen opgelegd door de internationale gemeenschap. Ook deze worden aan bod gebracht met de focus op luchtvervuiling.

De werking van de GENANO 310 luchtreiniger werd reeds aangetoond aan wal maar zou een functie kunnen hebben op de uitstoot aan boord van schepen. Door een koelsysteem te ontwerpen die tussen de motor en de GENANO wordt geplaatst kunnen de effecten op de uitstoot onderzocht worden van enerzijds koeling alleen en anderzijds van de GENANO, door op verschillende punten metingen uit te voeren.

Er wordt ook bekeken hoe zeer de maritieme industrie verantwoordelijk is voor luchtvervuiling wereldwijd en welke inspanningen reeds werden geleverd om deze te verminderen.

Abstract

This paper first gives a small introduction to diesel combustion engines.

Research is done to see what the effect is on exhaust gasses when they are cooled down and when forced through an air filtering GENANO.

It discusses the regulations and laws to which the maritime industry has to comply regarding air pollution and in what way it is responsible to the worldwide air quality.

By measuring the levels of different toxins in the exhaust gasses at different points, it is determined whether cooling has a positive effect on the pollution of diesel engines and to what effect the GENANO is a useful attribution to this.

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting.....	ii
Abstract.....	iii
Lijst van figuren	vi
Lijst van grafieken	vii
Lijst van afkortingen.....	viii
Inleiding	1
1 Werking verbrandingsmotoren.....	2
1.1 <i>Dieselmotoren</i>	2
2 Samenstelling brandstof	9
2.1 <i>Aardolieraffinage</i>	9
2.2 <i>Dieselolie</i>	10
2.3 <i>Samenstelling uitlaatgassen</i>	12
3 Het effect van koeling	16
4 Het koelsysteem	21
4.1 <i>Opbouw</i>	21
4.2 <i>De meetopstelling</i>	29
5 Regelgeving	30
5.1 <i>Cruiseschepen</i>	30
5.2 <i>IMO</i>	32
6 Metingen ‘Proof of Concept’	34
6.1 <i>Motor nul last</i>	35
6.2 <i>Motor deellast</i>	37
6.3 <i>Motor vollast</i>	38
6.4 <i>Koeling nul last</i>	39
6.5 <i>Koeling deellast</i>	40
6.6 <i>Koeling vollast</i>	42

6.7	<i>GENANO nul last</i>	44
6.8	<i>GENANO deellast</i>	45
6.9	<i>GENANO vollast</i>	46
6.10	<i>Analyse van de metingen</i>	47
7	Andere uitlaatgas-nabehandelingssystemen	48
7.1	<i>Scrubbers</i>	48
7.2	<i>ShoreKat</i>	52
7.3	<i>Dual Fuel</i>	53
8	Conclusie	55
9	Bibliografie	56

Lijst van figuren

Figuur 1: tweeslag dieselmotor	3
Figuur 2: PV-diagram tweeslag dieselmotor	3
Figuur 3: werkelijk PV-diagram tweetakt diesel.....	5
Figuur 4: 4-takt cyclus.....	6
Figuur 5: PV-diagram viertakt diesel.....	7
Figuur 6: pV-diagram atmosferische 4-takt diesel.....	7
Figuur 7: GENANO 310.....	18
Figuur 8: GENANO 310.....	19
Figuur 9: Toggle flipflop	22
Figuur 10: Flipflop.....	22
Figuur 11: comparator	23
Figuur 12: schets systeem.....	26
Figuur 13: drieweg solenoïde valve	27
Figuur 14: Stuurkring	28
Figuur 15: de opstelling.	29
Figuur 16: MARPOL Annex VI NOx emission limits.....	33
Figuur 17: Open loop scrubber	49
Figuur 18: closed loop scrubber	50
Figuur 19: hybride scrubber systeem	51

Lijst van grafieken

Tabel 1: uitlaattemperatuur t.o.v. percentage uitgestoten CO2	35
Tabel 2: uitlaattemperatuur t.o.v. uitgestoten NOx deeltjes	35
Tabel 3: uitlaattemperatuur t.o.v. SO2 uitstoot.....	36
Tabel 4: uitlaattemperatuur t.o.v. percentage uitgestoten CO2	37
Tabel 5: uitlaattemperatuur t.o.v. uitgestoten NOx deeltjes	37
Tabel 6: uitlaattemperatuur t.o.v. SO2 uitstoot.....	38
Tabel 7: uitlaattemperatuur t.o.v. percentage uitgestoten CO2	39
Tabel 8: uitlaattemperatuur t.o.v. uitgestoten NOx deeltjes	39
Tabel 9: uitlaattemperatuur t.o.v. SO2 uitstoot.....	39
Tabel 10: uitlaattemperatuur t.o.v. percentage uitgestoten CO2	40
Tabel 11: uitlaattemperatuur t.o.v. uitgestoten NOx deeltjes	40
Tabel 12: uitlaattemperatuur t.o.v. SO2 uitstoot.....	41
Tabel 13: uitlaattemperatuur t.o.v. percentage uitgestoten CO2	42
Tabel 14: uitlaattemperatuur t.o.v. uitgestoten NOx deeltjes	42
Tabel 15: uitlaattemperatuur t.o.v. SO2 uitstoot.....	43
Tabel 16: uitlaattemperatuur t.o.v. percentage uitgestoten CO2	44
Tabel 17: uitlaattemperatuur t.o.v. uitgestoten NOx deeltjes	44
Tabel 18: uitlaattemperatuur t.o.v. SO2 uitstoot.....	44
Tabel 19: uitlaattemperatuur t.o.v. percentage uitgestoten CO2	45
Tabel 20: uitlaattemperatuur t.o.v. uitgestoten NOx deeltjes	45
Tabel 21: uitlaattemperatuur t.o.v. SO2 uitstoot.....	45
Tabel 22: uitlaattemperatuur t.o.v. percentage uitgestoten CO2	46
Tabel 23: uitlaattemperatuur t.o.v. uitgestoten NOx deeltjes	46
Tabel 24: uitlaattemperatuur t.o.v. SO2 uitstoot.....	46

Lijst van afkortingen

BDP	Bovenste dode punt
CO	Koolstofoxide
EGR	Exhaust gas recirculation
EU	Europese Unie
HFO	Heavy fuel oil
HC	Hydrocarbons
IMO	International Maritime Organisation
LPG	Liquefied petroleum gas
MDO	Marine diesel oil
MARPOL	International convention for the prevention of pollution from ships
NO _x	stikstofoxide
NTC	Negative temperature coefficient
ODP	Onderste dode punt
PM	Particulate matter
ppm	Parts per million
SO _x	Zwavelstofoxide
SO ₂	Zwavedioxide
VOC	Volatile organic compounds

Inleiding

Na drie jaar op de Hogere Zeevaartschool in Antwerpen gestudeerd te hebben dient er een scriptie geschreven te worden, gekoppeld aan een project.

Na lang zoeken viel de keuze op het ontwerpen van een koelsysteem en de bijhorende metingen uitvoeren met betrekking tot uitstoot van schadelijke stoffen. Het effect van deze koeling bekijken en als hoofddoel de koeling geregeld krijgen zodat een nabehandeling door middel van een GENANO luchtfilter mogelijk wordt.

Deze opdracht werd door Covid-19 onmogelijk gemaakt en het werd dan ook theoretischer van aard. Er werden reeds testmetingen uitgevoerd op een proefopstelling van de uiteindelijke versie waardoor de waardes in deze paper weldegelijk representatief kunnen zijn voor de toekomst van dit project.

Persoonlijk heb ik dan ook wat meer achtergrondinformatie toegevoegd aan de tekst om een duidelijker beeld te krijgen van waarom dit project nu net nuttig kan blijken in de toekomst.

1 Werking verbrandingsmotoren

Vooraleer we het effect van koeling op de uitlaatgassen kunnen bekijken, moeten we eerst weten hoe een verbrandingsmotor werkt en hoe de uitlaatgassen ontstaan. Aangezien er in dit eindwerk op een dieselmotor gewerkt zal worden, laten we de werking van benzinemotoren achterwege en focussen op de dieselmotor.

1.1 Dieselmotoren

De dieselmotor werd in 1897 uitgevonden door Rudolf Diesel.

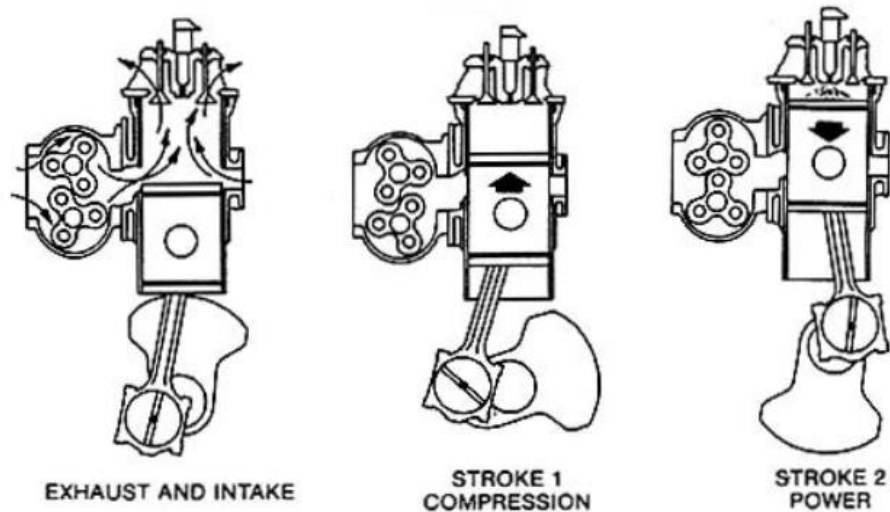
Door het principe van zelfontbranding komt de chemische energie uit de brandstof vrij en wordt deze gebruikt voor de aandrijving van auto's, schepen, etc.

Bij dieselmotoren is er 2-takt en 4-takt. De ontsteking vindt plaats door de compressie van de lucht. Deze wordt warm genoeg om de diesel te doen ontbranden.

Verder kunnen ze worden onderverdeeld in traag-, medium- of snel-draaiend. Traag wordt gezien tot 300rpm, medium varieert tussen 300 en 900rpm en snel is vanaf 900rpm.

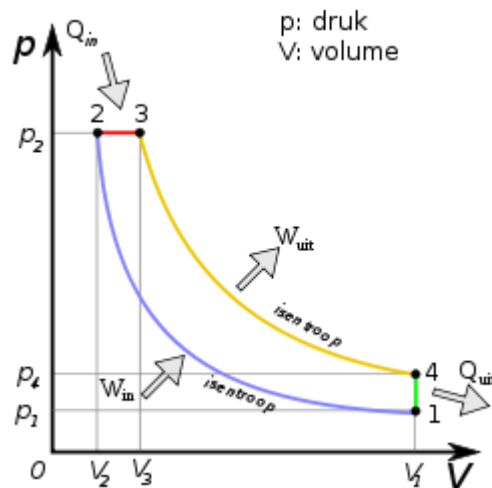
- Werking van een tweeslag dieselmotor

De naam tweeslagmotor komt door de mechanische bewegingen die gemaakt worden in de motor om een volledige cyclus te voltooien. De beweging van de zuiger om precies te zijn. Hierdoor wordt de Carnot cyclus bereikt, te zien in het PV-diagram op volgende bladzijde.



Figuur 1: tweeslag dieselmotor

Bron: ('The marine diesel prime mover. - The two stroke plant', z.d.)



Figuur 2: PV-diagram tweeslag dieselmotor

Bron: ('Dieselproces', 2017)

Zoals de naam doet vermoeden zijn er twee slagen nodig om een volledige cyclus te voltooien. De neergaande slag is de 'power stroke' en de opgaande slag is de 'compression stroke'.

Bovenaan de cilinder zitten de uitlaatkleppen. De zuiger zelf fungeert als afsluiting van de inlaatpoorten en deze zullen dus vrijkomen op het juiste moment in de cyclus zonder bediend te moeten worden. De Inlaat is steeds met poorten, uitlaat kan met poorten of kleppen werken. De twee slagen blijven compressie en arbeid.

Werking tweeslag dieselmotor:

We beginnen met de zuiger in zijn onderste dode punt (ODP). De zuiger gaat in opgaande beweging en neemt zo inlaatlucht uit de poorten om te comprimeren. Deze inlaatlucht werd door een turbo naar de poorten geblazen. Tijdens deze inlaatslag, staat de uitlaat ook open. Hierdoor zullen de warme uitlaatgassen hun weg naar buiten zoeken. Deze evacuatie van warme gassen zal tevens een aanzuigeffect creëren op de koude inlaatlucht. Door de opgaande beweging worden de inlaatpoorten afgesloten wanneer de compressie begint. Door de compressie van de lucht ontstaat warmte.

Enkele graden voor de zuiger zijn bovenste dode punt bereikt (BDP), wordt diesel ingespoten via de injector.

Door de hoge temperatuur van de gecomprimeerde lucht zal deze ontbranden en voor een gecontroleerde explosie zorgen. Door de druk wordt de zuiger naar beneden geduwd en wordt arbeid geleverd op de krukas.

De uitlaatkleppen worden geopend en de verbrandde gassen kunnen de cilinder verlaten, de druk valt weg door deze vergroting van volume bij het afgeven van arbeid.

Door de neergaande beweging komen de inlaatpoorten weer vrij, wordt de cilinder gespoeld en kan de cyclus opnieuw beginnen.

De tweeslag motor heeft ook vaak een turbocharger om de inlaatlucht in de cilinder te brengen. Inlaatlucht moet sowieso via een blazer naar binnen. Deze motoren zijn niet natuurlijk geaspireerd aangezien er geen onderdruk voor aanzuiging zorgt van de inlaatlucht. In theorie kan dit wel, in de praktijk komt een natuurlijk aanzuigende 2-takt diesel zelden voor.

PV-diagram:

Het gelijkdrukproces in dit diagram bestaat uit vier stappen.

Van punt 1 naar punt 2 is er een isentrope compressie van de lucht. Dit wil zeggen dat de entropie niet veranderd.

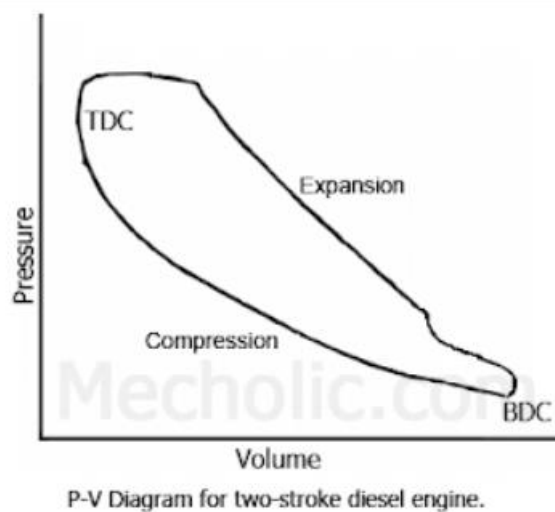
Van punt 2 naar 3 is er een isobare warmtetoevoer, de druk verandert dus niet.

Punt 3 naar 4 is een isentrope expansie, het omgekeerde van 1 naar 2 dus.

De laatste lijn is van 4 terug naar 1, de isochore warmte-afvoer. Het volume blijft dus gelijk. In werkelijkheid is deze stap de uitlaat van de uitlaatgassen en dus verandert het volume wel. Het diagram beschrijft het theoretisch ideale proces.

In werkelijkheid ziet het PV-diagram er eerder als volgt uit.

Figuur 3: werkelijk PV-diagram tweetakt diesel

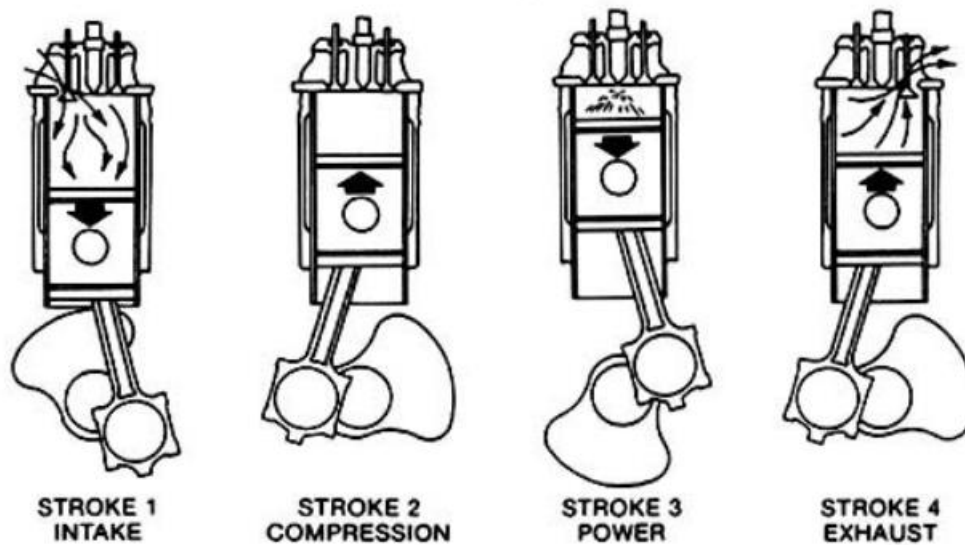


Bron: ('Working of the Two-Stroke Engine with P-V Diagram', z.d.)

Zoals te zien op bovenstaande figuur zijn er geen rechte lijnen of perfecte krommen te vinden. Dit komt omdat we met veel variërende omstandigheden zitten tijdens de cyclus. Volume, druk en temperatuur zijn constant aan het veranderen door openen van poorten, compressie van lucht, ontsteking van de brandstof, etc. waar in ideale omstandigheden geen sprake van is.

- Werking van een vierslag dieselmotor

Figuur 4: 4-takt cyclus



Bron: ('The marine diesel prime mover. - The four stroke plant', z.d.)

Vierslag motoren zijn compacter dan hun tweeslag alternatieven.

Een groot verschil is bijvoorbeeld dat de inlaat geen poorten zijn. Een ander verschil is dat deze motoren wel natuurlijk geaspireerd zijn. Een turbocharger is dus niet nodig maar wordt wel vaak gebruikt.

De cyclus bestaat uit twee krukasrotaties en vier richtingsveranderingen van de zuiger.

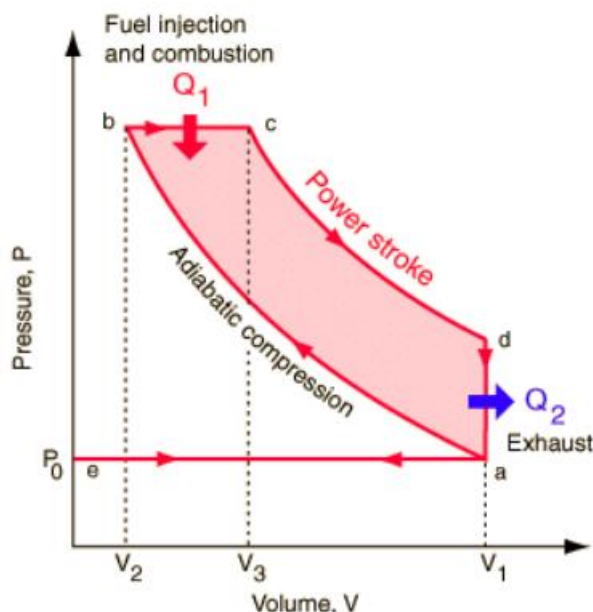
Beginnen doen we in het BDP met de inlaatslag. De inlaatklep is geopend en lucht vloeit naar binnen in de cilinder. Door de neergaande beweging van de zuiger ontstaat een onderdruk in de cilinder en wordt de lucht naar binnen gezogen.

Net voor de zuiger in het ODP komt, worden de inlaatkleppen gesloten. De zuiger zit nu beneden en de tweede slag begint. De compressieslag zorgt voor de opbouw van druk door de opgaande beweging van de zuiger terwijl de lucht gevangen zit en de poorten gesloten zijn.

Net voor de zuiger het BDP bereikt, wordt de diesel ingespoten. Deze ontbrandt door de hoge temperatuur die de drukopbouw veroorzaakt heeft. Door de explosie wordt de zuiger naar onder geduwd en levert arbeid. Eens de zuiger beneden is worden de uitlaatkleppen geopend en begint de laatste slag, die de uitlaatgassen naar buiten duwt. Eens de zuiger weer in het BDP is, kan de cyclus opnieuw beginnen.

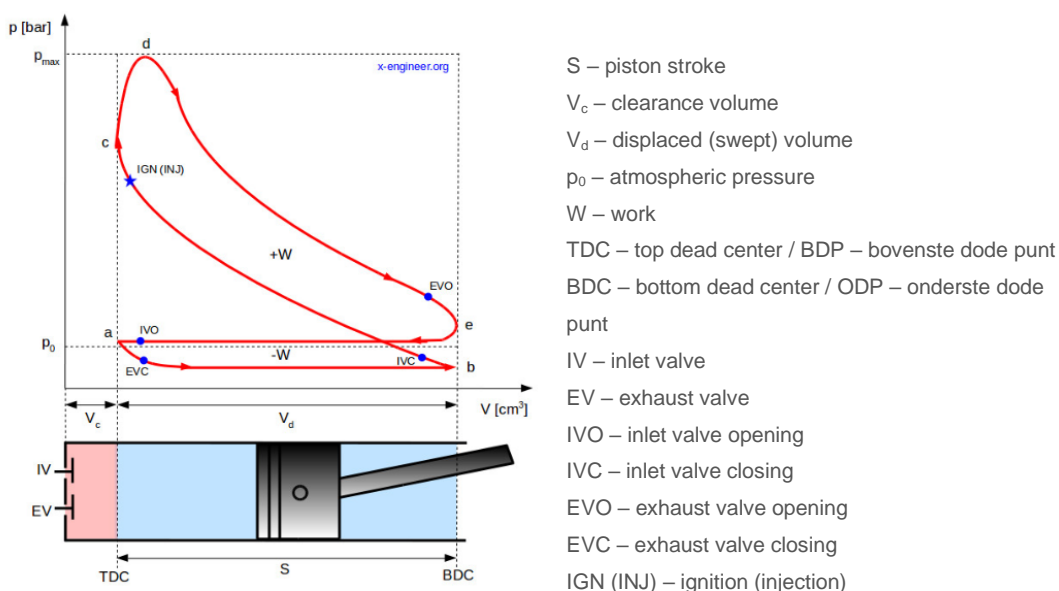
Het PV-diagram voor een viertakt dieselmotor ziet er als volgt uit.

Figuur 5: PV-diagram viertakt diesel



Bron: ('Figure ***.1 -A typical theoretical P-V diagram of a Diesel engine [13]', z.d.)

Deze is erg gelijkaardig aan de 2-takt dieselmotor. Als we gaan kijken naar een werkelijk pV-diagram zoals de figuur hieronder, zien we duidelijker de verschillen. In de opstelling voor de uiteindelijke proef zal tevens een 4-takt dieselmotor gebruikt worden.



Figuur 6: pV-diagram atmosferische 4-takt diesel

Bron: (x-engineer.org, z.d.)

Het werkelijk- en ideaal pV-diagram zien er vrij gelijkaardig uit.

De druk wordt gemeten in de cilinder die voorgesteld wordt onder het pV-diagram.

Deze waarde wordt vergeleken met de positie van de krukas over z'n volledige 720° cyclus.

a – b: inlaat.

We starten in punt a met de cyclus. Inlaatklep(pen) zijn volledig geopend en de zuiger beweegt van z'n bovenste dode punt naar het onderste dode punt. Het volume vergroot dus constant. De druk is onder de atmosferische druk om zo voor aanzuiging te kunnen zorgen via een vacuümeffect. Eens in ODP is het volume maximaal.

b – c: compressie.

Eens de zuiger terug omhoog beweegt na ODP bereikt te hebben, begint de compressie van de aangezogen lucht. Volume verminderd en druk vergroot. Merk op dat de inlaatklep nog even open blijft om de atmosferische druk te overwinnen alvorens te comprimeren. Wanneer de zuiger naar BDP gaat zien we een stijgende druk. iets voor het BDP bereikt wordt, vindt de ontsteking plaats waardoor de druk erg snel maximaal wordt.

c – e: arbeid.

Eens de ingespoten diesel ontstoken is, stijgt de druk sterk (c – d) tot p_{max} . De arbeidsslag begint in BDP en eindigt in ODP. Door de hoge druk in de cilinder wordt de zuiger naar onder gedruwt, stijgt het volume en zakt de druk geleidelijk aan.

e – a: uitlaat.

Na de arbeidsslag is de zuiger terug in het ODP. Het volume is terug maximaal in de zuiger en de zuiger beweegt terug omhoog waar het de verbrande gassen via de uitlaatklep naar buiten duwt. Eenmaal terug in a begint de cyclus opnieuw.

Nu kunnen we de uitlaatgassen die werden uitgestoten gaan bekijken naar samenstelling en hoe we deze kunnen behandelen, met als hoofdzakelijk onderzoek het koelen ervan.

2 Samenstelling brandstof

Vooraleer er tests kunnen gedaan worden op de uitgestoten gassen, moeten we begrijpen hoe de brandstof is samengesteld en wat er dus allemaal uitgestoten wordt bij verbranding. De proefopstelling waar later metingen op zullen uitgevoerd worden is er een met een dieselmotor. De samenstelling van benzine wordt dus niet besproken.

2.1 Aardolieraffinage

Brandstoffen die vandaag de dag gebruikt worden, kunnen worden onderverdeeld in fracties van aardolie. De ruwe aardolie die we uit de grond halen met verschillende technieken wordt in een raffinaderij gescheiden in verschillende fracties. De een zwaarder dan de ander, soms zelfs gas, door het oplopend molecuulgewicht.

Kort samengevat wordt de ruwe aardolie door een oven gebracht, waarna ze in de destillatietoren terecht komt. De fracties met een hoog kookpunt condenseren onderaan de toren. Dit zijn de zware fracties zoals asfalt, teer en stookolie. Hoe hoger in de toren, des te lager het kookpunt van de fractie en hoe lichter de gecondenseerde stof.

Enkele typische waarden:

- 370°C – stookolie
- 300°C – diesel
- 200°C – kerosine
- 150°C – benzine
- 20°C – LPG

Na de destillatietoren kunnen nog allerlei processen toegepast worden, afhankelijk van de vraag naar de verschillende types brandstof. De fracties worden soms gemengd om de juiste samenstelling van een brandstof te bereiken. Ook het kraken met een katalysator is een veelvoorkomend proces bij raffinaderijen. Deze installaties zijn zeer flexibel, afhankelijk van de vraag naar een welbepaalde samenstelling brandstof.

2.2 Dieselolie

Deze brandstof werd vernoemd naar Rudolf Diesel, de uitvinder van de dieselmotor. Dieselolie, gasolie of kortweg diesel is de fractie van de aardolie die wordt gebruikt in dit type motoren.

Diesel is een brandstof en wordt dus gezien als een gevaarlijke stof. Tijdens transport moet er rekening gehouden worden met tal van regels en wetten. Zo wordt aan elke gevaarlijke stof een *UN-nummer* gegeven. Dit getal bestaat uit 4 cijfers en is het stofidentificatienummer. Dit werd bepaald door de Verenigde Naties en voor diesel is dit 1202. Op vrachtwagens die stoffen vervoeren hangen oranje plaatjes met dit nummer erop.

Diesel kan verder onderverdeeld worden in categorieën. Zo is er bijvoorbeeld laag- en hoogzwavelig. Diesel in de volksmond is het laagzwavelige type van de gasolie. Het aantal *ppm* (parts per million) zwavel bepaald dus de categorie.

Zoals eerder vermeld komt deze brandstof in combinatie met zuurstof onder druk tot zelfontbranding. De mate waarin de brandstof zelfontbranding ondergaat duiden we aan door het cetaangetal. Dit is een referentiewaarde waaraan we kunnen zien hoe snel een brandstof zal ontbranden onder druk en aanwezigheid van zuurstof. Het zegt dus iets over de bruikbaarheid van de brandstof in de motor, de kwaliteit. Hoe lager het cetaangetal, des te langer er geen zelfontbranding optreedt. Dit is uiteraard niet de bedoeling.

Verschillende soorten diesel worden vaak onderverdeeld afhankelijk van het cetaangetal, de viscositeit en de afkomst.

Diesel voor in de wagen heeft een cetaangetal van rond de 50. Biodiesel daarentegen heeft een hogere waarde van 70 tot zelfs 100. Bij scheepsdiesels wordt diesel met een lager cetaangetal gebruikt omdat deze grote motoren op lager toerental draaien en met een hogere compressie werken. HFO (Heavy Fuel Oil) of MDO (Marine Diesel Oil) hebben dus een lagere kwaliteit dan diesel aan de wal voor dagelijks gebruik.

Ruwe aardolie bestaat uit verschillende chemische elementen.

- Koolstof (C) 80-87%
- Waterstof (H) 10-14%
- Stikstof (N) 0,2-3%
- Zuurstof (O) 0,05-1,5%
- Zwavel (S) 0,05-6%

Door het raffineren in de verschillende fracties schommelen deze waarden van elementen dus van stof tot stof.

Diesel bestaat uit een mengsel van koolwaterstoffen. De exacte samenstelling is belangrijk voor de klopvastheid. Dit is een term om de mate aan te duiden waarin de brandstof in een luchtmengsel samengeperst kan worden zonder tot zelfontbranding te komen.

Koolwaterstoffen zijn organische verbindingen. Ze bestaan uitsluitend uit waterstof (H) en koolstof (C). Ze zijn opgebouwd uit koolstofketens met telkens de waterstofmoleculen eraan gebonden. Hoe langer de koolstofketen, hoe zwaarder het molecuul. Dit omdat er meer koolstofmoleculen in de keten zitten. Hierdoor zal het kookpunt ook hoger liggen.

Bij de verbranding van 1 liter diesel komt ongeveer 2,7kg CO₂ vrij. Dit komt omdat een liter diesel 835gram weegt. Het bestaat voor 86,2% uit koolstof of 720g koolstof per liter. Deze koolstof wordt CO₂ wanneer 1920g zuurstof aanwezig is. Zo komen we dus aan 2640 gram CO₂ per liter, of afgerond 2,7kg. CO₂ is samen met H₂O het restproduct bij een ideale verbranding. Zoals in volgend hoofdstuk te zien is, kan dit nooit in werkelijkheid het geval zijn.

Is de ontbranding in een vlam arm gebied, zullen veel koolwaterstoffen slecht deels verbranden of onverbrand blijven.

Is er voldoende lucht en een voldoende hoge temperatuur, krijgen we een volledige verbranding met veel NO als gevolg.

Op sommige plaatsen kan een onvolledige verbranding zorgen voor partiële oxidatie, roetvorming of weinig NO-vorming.

2.3 Samenstelling uitlaatgassen

Diesel wordt ingespoten in de kamer waar zuurstof op druk is gebracht door de zuiger. Eens de brandstof verneveld wordt en mengt met de lucht, treed er zelfontbranding op. Wanneer de uitlaatklep opent, wordt dit verbrande mengsel uit de kamer gespoeld. Maar wat zit er nu allemaal in die uitlaatlucht?

• Koolstofmonoxide	CO
• Onverbrande koolwaterstoffen	HC
• Stikstofoxide	NO _x
• Water	H ₂ O
• Koolstofdioxide	CO ₂
• Roetpartikels	PM
• Stikstof	N ₂
• Zwaveldioxide	SO ₂
• Zwaveloxiden	SO _x
• Dioxide (zuurstof)	O ₂
• Roet	

De onderdelen van deze uitlaatgassen die het schadelijkst zijn voor het milieu:

• Koolstofmonoxide	CO
• Onverbrande koolwaterstoffen	HC
• Stikstofoxide	NO _x

Water en koolstofdioxide zijn kenmerkend voor de ideale verbranding. Deze zijn niet super schadelijk want het zijn restproducten die hun nut hebben in de natuur. Zo kunnen bomen en planten enkel aan fotosynthese doen bij voldoende CO₂ en zonlicht. Een teveel aan CO₂ is natuurlijk wel weer schadelijk voor het milieu maar niet in de mate van bovengenoemde stoffen. Teveel CO₂ zorgt voor een slechte luchtkwaliteit in de omgeving.

De bedoeling van de meetopstelling bij het koelsysteem van de uitlaatgassen is dus het bepalen van het verschil in waarde voor- en na de koeling van bepaalde onderdelen van de uitlaatlucht. Om in een later stadium uitlaatgassen te kunnen zuiveren met de Genano machine, dienen deze eerst naar een temperatuur van 70°C gebracht te worden. Dit omdat de Genano anders niet optimaal kan functioneren. De vraag van dit proefschrift is of we door dit te doen, de samenstelling van de uitlaatgassen niet reeds beïnvloeden door de verandering in temperatuur, alvorens ze te zuiveren.

Het verminderen van CO, HC en NO_x in de uitlaatlucht zal dus een positief effect hebben op het milieu. Ook de PM kunnen we meten want deze geeft een indicatie over de roetontwikkeling bij de verbranding en dus over de vervuiling in onze leidingen. Roetneerslag kan het koelend vermogen ook in het gedrang brengen. Dit is dus ook een belangrijke factor om te gaan meten.

Waarom worden deze gevormd en kan goed onderhoud hier een verminderende factor in zijn?

De chemische samenstelling van diesel bestaat uit ongeveer 75% verzadigde koolwaterstoffen zoals paraffine en 25% aromatische koolwaterstoffen zoals benzeen.

Er zit dus enorm veel koolstof in de ketens, namelijk koolstof (C) in de vorm van koolwaterstoffen in fossiele brandstoffen. Deze koolwaterstoffen bestaan enkel uit organische verbindingen van waterstof (H) en koolstof (C).

Koolstof komt in enorm grote hoeveelheden voor op aarde en bindt gemakkelijk met andere elementen door de centrale plaats in de organische chemie. Zo bindt het ook snel aan zuurstof waardoor we CO₂ verkrijgen. De verbranding van fossiele brandstoffen breekt dus de koolwaterstoffen af, waardoor de koolstofdeeltjes andere verbindingen aangaan die, wanneer ze in de atmosfeer komen, een schadelijke werking kunnen hebben.

CO-vorming komt door de onvolledige verbranding van koolstofverbindingen.

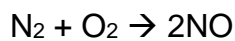
Koolstofmonoxide is giftig, kleur- en geurloos, wat het erg gevaarlijk maakt. Het is lichter dan lucht. Door een volledige verbranding te garanderen kunnen we deze uitstoot sterk beperken. Dit hoort bij het motormanagement en regelmatig onderhoud kan hier een cruciale rol in spelen.

HC- vorming is in principe resten koolwaterstoffen die onverbrand zijn gebleven en zo in de uitlaatlucht zitten. Dit wordt veroorzaakt door te weinig zuurstof, te lage temperatuur of te korte verbranding. Ook dit kan dus verminderd worden door een goede verbranding van de brandstof. Net zoals bij CO kan dit door goed onderhoud beperkt worden.

De chemische reactie bij een verbranding van koolwaterstoffen is in een ideaal scenario de volgende: $\text{HC} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

In een ideaal geval hebben we dus enkel koolstofdioxide en water als restproducten. Deze zijn onschadelijk voor de mens, buiten dat CO₂ een broeikasgas is en dus impact heeft op de opwarming van de aarde. De verbranding is echter zo goed als onmogelijk ideaal te krijgen. Er worden dus nog andere restproducten gevormd.

Stikstofoxiden (NO_x) zijn een restproduct bij de verbranding van fossiele brandstoffen. De lucht die gebruikt wordt bij de verbranding wordt uit de omgeving gehaald en deze is niet zuiver O₂. Deze bevat ook stikstof (N₂). Bij de hoge temperaturen die bereikt worden in de motor reageert dit met de zuurstof en vormt NO_x. Er zijn verschillende stikstofoxiden, de basisreactie is de volgende:



Er zijn echter vele soorten zoals NO, NO₂, N₂O, N₂O₃, N₂O₄, N₂O₅, NO₃. Deze steunen elk op een ietwat verschillende reactie maar telkens door de reactie met zuurstof en stikstof. De benaming NO_x, geldt voor NO en NO₂. Deze NO_x zorgen voor de vorming van ozon en zure regen, het zijn ook broeikasgassen.

In principe zou een minder hoge verbrandingstemperatuur hier een oplossing voor kunnen zijn maar dan is er het probleem dat een onvolledige verbranding zou kunnen plaatsvinden. De uitlaatgassen koelen zou hier dus een positief effect op kunnen hebben. In hoofdstuk 6 zien we bij de metingen het effect van deze voorgestelde methode.

PM-vorming of fijn stof zijn onverbrande of onvolledig verbrande resten uit de brandstof. Deze onzuiverheden zaten in de diesel en zijn dus rechtstreeks afhankelijk van de kwaliteit van de brandstof waarop we de motor laten draaien, de luchtfactor, het toerental, de voorinjectie en de injectiedruk.

Zwaveloxiden (SO_x) zijn vervuilingen door de aanwezigheid van zwavel in de brandstof. Het is de verzamelnaam van SO_2 en SO_3 , respectievelijk zwaveldioxide en zwaveltrioxide.

De kleine hoeveelheden zwavel reageren met zuurstof en vormen SO_2 . Ook dit draagt bij tot de vorming van zure regen. Wederom is dit afhankelijk van de brandstofkwaliteit. Het percentage zwavel in brandstoffen is strikt geregeld en mag niet overschreden worden om de vorming van deze schadelijke stoffen te verminderen. Het reduceren van de uitstoot van deze stoffen is dus te verminderen door zwavelarme brandstoffen te gebruiken.

Emissie verbeteren is dus hoofdzakelijk afhankelijk van het verbrandingsproces en de kwaliteit van brandstof in deze verbranding.

3 Het effect van koeling

De uitlaatgassen gaan we koelen alvorens ze in de GENANO te kunnen introduceren. Deze machine kan enkel optimaal werken als de uitlaatgassen een temperatuur hebben lager dan 70°C. Zo wordt de lucht gezuiverd. Het doel is om met behulp van de Genano, de samenstelling van de uitlaatgassen te verbeteren en de uitstoot van schadelijke stoffen te reduceren.

Het koelen op zich kan ook een effect hebben op de gassen die worden uitgestoten. Dit is niet nieuw en bestaat reeds in de vorm van EGR. Door het koelend effect van uitlaatgasregeneratie tracht men het verbrandingsproces te beïnvloeden en de vorming van NO_x tegen te gaan.

Dit bestaat reeds in automotoren en vindt tegenwoordig zijn intrede in de scheepvaart. EGR staat voor Exhaust Gas Recirculation en zorgt voor een beperking van NO_x emissies. EGR heeft invloed op de verbranding zelf, in tegenstelling tot de bedoeling van deze scriptie waar we achteraf gaan koelen. Toch is het interessant om al eens het effect te bekijken.

Er zijn verschillende types EGR.

- Externe EGR: dit wil zeggen dat de uitlaatgassen bij de aangezogen lucht komen. De uitlaatgassen zijn ten allen tijde kouder dan de verbrandingstemperatuur. Deze gassen te hard koelen heeft een nadelig effect op de vorming van roetafzetting in het inlaatspuitstuk. De hete uitlaatgassen worden hier afgekoeld en naar de EGR-klep gestuurd, waar ze vermengd worden met de toegevoerde lucht. Om de juiste verhouding te verkrijgen wordt deze EGR-klep via een stappenmotor bediend. Dit systeem kan op hoge- of op lage druk werken. Beide systemen hebben hun specifieke voor- en nadelen. Hier gaan we niet verder op in.
- Interne uitlaatgasrecirculatie: de rookgassen recirculeren naar de verbrandingskamer zorgt voor een daling van de aanwezige zuurstof in de kamer en dus een daling van de temperatuur. Dit wordt bereikt door ofwel de uitlaatpoort langer geopend te houden door een grote klep-overlap en zo deels de uitlaatgassen weer aan te zuigen. Of door de uitlaatpoort sneller te sluiten. De vorming van NO_x wordt op die manier verminderd.

Het doel van EGR is om de milieu-vereisten makkelijker te halen.

Door de warmte te spreiden over een grote massa, die zelf niet deelneemt aan de verbranding, zorgt EGR voor een lagere temperatuur. De uitlaatgassen zelf nemen geen deel aan het verbrandingsproces, de warmte ervan wel. Deze wordt opgenomen als massa waardoor de temperatuurstijging ingeperkt wordt.

Door deels de uitlaatlucht in de inlaatlucht te steken, verkrijgen we een minder groot zuurstofgehalte voor de verbranding. Bij lagere temperatuur komen minder stikstofoxiden vrij (NO_x). Wat dus minder schadelijk is voor het milieu.

EGR is echter niet wat in deze scriptie gebruikt wordt. Het wordt kort aan bod gebracht om aan te tonen dat een proces koelen een positief effect kan hebben op de uitstootwaardes.

De uitlaatgassen in deze proef worden gekoeld eenmaal ze uit de motor worden gestoten. Deze motor kan dus reeds met een EGR-systeem werken of niet. De koeling staat op de uitlaat gemonteerd, waarna ze verbonden wordt met de GENANO.

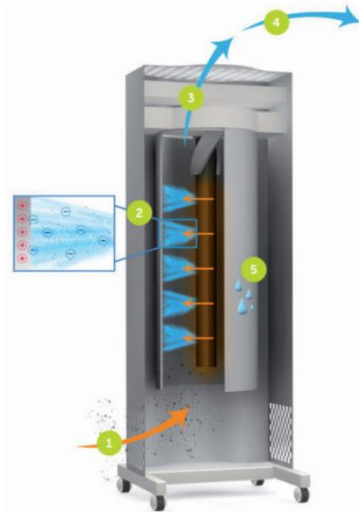
Deze GENANO is een nabehandelingstoestel dat via een katalyserende werking de uitlaatgassen behandelt, hierover later meer. Specifiek via katalyserende oxidatie. De VOC's worden zo geoxideerd en dus verkrijgen we uiteindelijk uitlaatlucht met minder VOC's.

VOC's zijn Volatile Organic Compounds. In het Nederlands noemen we dit vluchtige organische stoffen. Dit wil zeggen dat het een groep koolwaterstoffen is die makkelijk verdampen. Componenten van onze brandstof kunnen dus zeker tot deze groep behoren.

De werking van de GENANO gaat dus als volgt.

De gekoelde uitlaatgassen van minder dan 70°C worden in de machine geïntroduceerd. Hier vindt katalyserende oxidatie plaats. Dit wil zeggen dat oxidatie van de VOC's bereikt wordt door een katalysator.

Figuur 7: GENANO 310



Bron: ('GENANO310', z.d.)

Een katalysator is een stof die de snelheid van een bepaalde chemische reactie beïnvloedt zonder zelf verbruikt te worden.

Dit wil dus zeggen dat de katalyserende stof een invloed zal hebben op een reactie waar ze zelf helemaal geen deel van uitmaakt.

Oxidatie is het chemisch proces waarbij de geoxideerde stof (de reductor) elektronen afstaat aan een andere stof (de oxidator).

Dit wil dus zeggen dat stoffen in een oxidatiereactie elektronen uitwisselen. Hierdoor kunnen de stoffen binden met andere stoffen.

De combinatie van deze twee definities geeft dus katalyserende oxidatie. Zo worden de VOC's in de uitlaatlucht gezuiverd.

De enige voorwaarde om dit toestel te kunnen gebruiken als nabehandeling van de uitlaatgassen is dus dat ze maximaal 70°C mogen hebben. Daarom werd een koelsysteem ontworpen om aan deze voorwaarde te voldoen. De GENANO wordt normaal niet in deze configuratie gebruikt.

Figuur 8: GENANO 310



Bron: Ilan Meyers

GENANO is de merknaam van het bedrijf waar deze luchtreiniger gemaakt wordt. Meer specifiek de GENANO 310 luchtreiniger. Deze machine werd initieel ontworpen voor binnenshuis. Ze is bedoeld om kleine onzuiverheden uit de lucht te filteren zoals virussen, bacteriën, dierlijk stof en roet afkomstig uit het verkeer. Deze zijn vaak de oorzaak van ziektes en deze machine zuivert de lucht die mensen inademen. Binnen deze configuratie werd reeds aangetoond dat ze zeer effectief is om fijn stof te zuiveren.

De manier waarop we in deze scriptie denken de GENANO te gebruiken vraagt echter veel meer van de machine. Ze zou de deeltjes die rechtstreeks uit de uitlaat komen, moeten kunnen zuiveren. Vandaar werd een 'proof of concept' opgesteld en enkele metingen uitgevoerd. Deze komen in een later hoofdstuk aan bod.

De GENANO is een zeer gebruiksvriendelijk apparaat met weinig onderhoud. Enkel het waterbad en detergent af en toe bijvullen. Spoelen doet het vanzelf. De gas absorptie filter moet in normaal gebruik om de 12 tot 24 maanden vervangen worden. In gebruik als uitlaatgasreiniger zal dit uiteraard wat vaker moeten.

Deze machine is niet hetzelfde als een scrubber. Bij scrubbers wordt met het principe van absorptie gewerkt, hierover meer in hoofdstuk 7. De GENANO werkt in op de chemische samenstelling van de te zuiveren gassen in plaats van ze op te slaan in een spoelvoeistof zoals bij scrubbers.

In ruime zin, zijn de machines wel te vergelijken. Ze hebben echter een verschillend toepassingsgebied. Scrubbers zijn tegenwoordig veelvoorkomend in de maritieme industrie terwijl GENANO hier nog geen machines voor heeft ontworpen.

4 Het koelsysteem

4.1 Opbouw

Het idee achter het koelsysteem is om het zelfregelend te maken op 70°C. Na de uitlaat van de motor werd een koelbuis ontworpen die op de afbeelding te zien is.



Met water zou een warmte-uitwisseling tot stand worden gebracht. De flow van het water is ingeperkt door de kleine gaten in de plaatjes die op de buis gelast staan. De uitlaatgassen gaan dus door het smalle deel, waarrond het koelwater loopt.

Dit circuit komt uit op een bassin, waar een pomp voor de circulatie zorgt.

Omdat dit circulerende water opwarmt door de warmte-uitwisseling met de uitlaatgassen, en we niet continue gekoeld water in het bassin zouden moeten brengen, plaatsen we een radiator met

regelkleppen voor en na de radiator. Zo kan een by-pass gecreëerd worden als de radiator in onderhoud moet of er een probleem is. Ook via de regelkleppen kunnen we een constante temperatuur onderhouden van het koelwater bij variërende belasting van de motor en dus variërende uitlaatgastemperaturen.

Dit kunnen manuele driewegvalven zijn of bij voorkeur automatisch gestuurd.

- Flipflop

Een eerste manier waarop dit systeem kan gestuurd worden is via een set-reset. Ofwel staat de drieweg open naar de radiator, of ze is dicht. Hierdoor kan het opgewarmde water van de warmtewisselaar rechtstreeks terug naar het bassin of door de radiator, waar het gekoeld wordt alvorens in het bassin te komen.

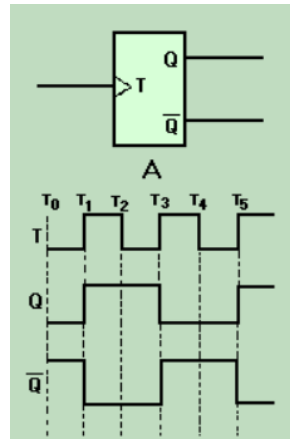
Een set-reset flipflop schakeling is hiervoor een goede oplossing.

Wanneer we over flip-flops spreken, worden bistabiele multi-vibrators bedoeld. Deze componenten hebben een geheugenfunctie waardoor de 'set' wordt behouden, tot deze een andere input ontvangt en dus veranderd, ofwel 'reset'.

De toestand van de uitgang kunnen we dus veranderen door een signaal naar de klokingang te sturen.

Voor een simpele set-reset kan bijvoorbeeld een Toggle-flipflop worden gebruikt. Hier wordt de huidige toestand gewijzigd bij een signaal en dus kan er tussen 2 standen gewisseld worden. Stand 1, over de radiator en stand 2, naar het bassin.

Figuur 9: Toggle flipflop

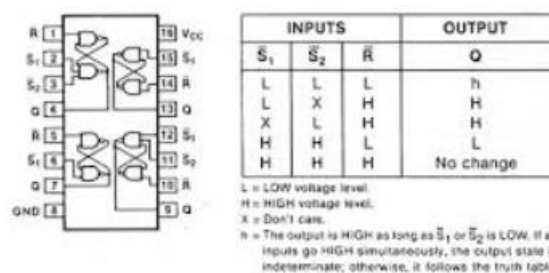


Bron: ('Toggle flip-flops', z.d.)

Dit is niet ideaal aangezien de situatie enkel veranderd bij een puls en als we dit dus via temperatuur willen regelen ze niet zal veranderen eens ze over de grenstemperatuur geweest is.

Een andere manier is een SR-flipflop met data-ingangen S en R. Bij dit type zijn 4 functies. Het niet veranderen van toestand, de reset (R), de set (S) en de wissel. Ook dit type zou gebruikt kunnen worden in het radiatorcircuit.

Figuur 10: Flipflop



Bron: ('Flipflops', z.d.)

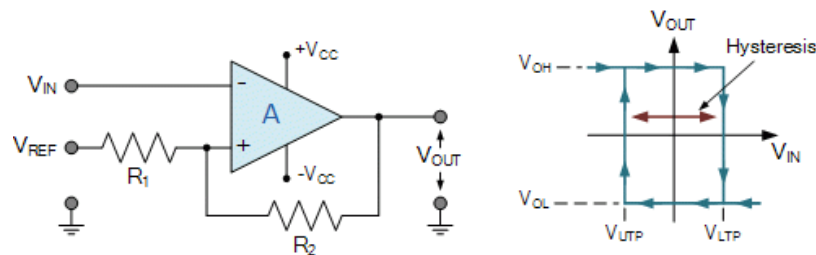
Er zou dus een flipflop kunnen werken via een temperatuursensor. Om zo bij wisselende belasting van de motor en dus variërende temperatuur, de valve te bedienen, waardoor het koelwater ofwel over de radiator gaat (eventueel zelfs een tweede radiator) of rechtstreeks terug naar het bassin. De set- en resetpositie.

- Comparator

In plaats van een flipflop te gebruiken, kan een comparator ook de oplossing bieden. Door een invertende of non-invertende comparator aan te sluiten op een welbepaalde temperatuursensor kunnen waarden vergeleken worden met een reference voltage. Door deze juist af te stellen kan een sturing tot stand worden gebracht van bijvoorbeeld een solenoid valve.

Het is dus belangrijk om de juiste temperatuursensor aan te sluiten.

Figuur 11: comparator



Bron: ('Op-amp Comparator and the Op-amp Comparator Circuit', 2015)

- NTC

Om de temperatuur te kunnen bepalen hebben we sensoren nodig. De afkorting NTC staat voor Negative Temperature Coefficient Thermistor ofwel een weerstand met een negatieve temperatuurcoëfficiënt. De weerstand neemt dus af als de temperatuur stijgt. Met de vergelijking van Arrhenius kunnen we het verband ertussen bepalen: $R = A * e^{B/T}$

R	De weerstand in Ohm
A	Constante in Ohm (Ω)
e	Wiskundige constante (Ω)
B	Temperatuurconstante in Kelvin (K)
T	Temperatuur in Kelvin (K)

NTC of kortweg thermistor is dus een speciaal type weerstand om de temperatuur te bepalen.

De elektrische weerstand neemt af als de temperatuur toeneemt. Wanneer de component meer elektrisch vermogen opneemt, wordt de temperatuur hoger dan zijn omgevingstemperatuur. Willen we de NTC dus als sensor gebruiken, moet dit effect tot een minimum worden beperkt.

Het is dus in principe een weerstandsthermometer met een bereik van -40°C tot 150°C . Voor het bepalen van de koelwatertemperatuur kan dit dus gebruikt worden.

- PTC

De tegenhanger van de NTC is de weerstand met positieve temperatuurcoëfficiënt. De elektrische weerstand neemt dus toe als de temperatuur stijgt. Zowel NTC als PTC zijn thermistors en dus afhankelijk van temperatuur om hun metingen te doen. De PTC wordt meer gebruikt als beveiliging tegen te hoge temperaturen. Ook dit kan dus de wissel maken tussen de set en reset bij een vooraf bepaalde temperatuur.

- PT100

Een ander soort temperatuursensor is de pt100. Deze wordt gebruikt in de meet- en regeltechniek als onderdeel van een weerstandsthermometer. In de industrie worden veelal deze sensoren gebruikt om temperaturen te meten. Ze hebben namelijk een zeer groot meetbereik en nagenoeg lineair gedrag. Ze zijn ook zeer nauwkeurig.

Onderaan de pt100 zit een platinadraad die bij 0°C een elektrische weerstand heeft van 100Ω. Er vloeit slechts een zeer kleine stroom door de draad waardoor deze niet opwarmt en geen invloed heeft op de meting. De temperatuur wordt dus bepaald aan de hand van de verandering van de weerstandswaarde. Door in tabellen te gaan kijken en bepaalde formules toe te passen wordt zo de temperatuur duidelijk.

- Thermokoppels

Dit type sensoren bestaat uit twee draden van verschillende metalen of legeringen. Ze worden aan elkaar gesmolten en als tussen de contactpunten een temperatuurverschil heerst, zal een potentiaalverschil optreden. De grootte hiervan is afhankelijk van het temperatuurverschil en welke metalen gebruikt werden. Door middel van het Seebeck-effect kan de temperatuur bepaald worden. Dit effect is de directe omzetting van een verschil in temperatuur naar een elektrische spanning op het grensvlak van twee verschillende metalen of halfgeleiders.

Door de spanning kan dus de temperatuur bepaald worden met volgende formule:

$$U_{Th} = \alpha \cdot (T_w - T_k).$$

Met α : de Seebeckconstante

T_w : de temperatuur van de warme aansluiting

T_k : de temperatuur van de koude aansluiting

Door de bepaling van het potentiaalverschil kunnen ook thermokoppels als temperatuursensoren gebruikt worden. Het meet een temperatuurverschil tussen twee punten en dus kan dit bijvoorbeeld dienst doen om het verschil over de warmtewisselaar te bepalen. Wordt dit verschil te klein, is er te weinig koelend effect en moet het water over de radiatoren gestuurd worden.

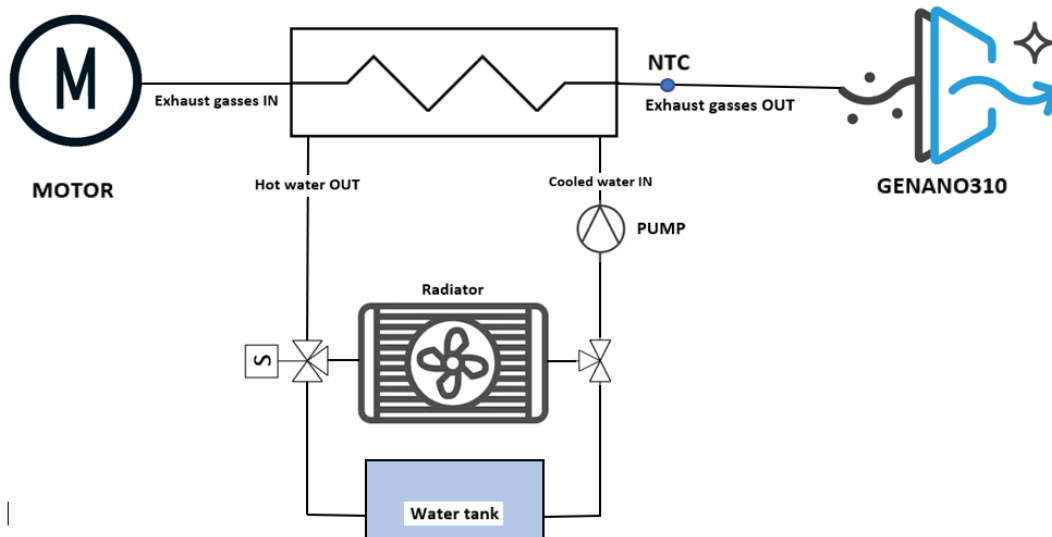
Voorbeelden van thermokoppels:

Pluspool	Minpool	Bereik	Spanning
Chromel (Ni-Cr)	Constantaan (Cu-Ni)	-270°C – 1000°C	-9.8mV – 76.4mV
Ijzer (Fe)	Constantaan (Cu-Ni)	-210°C – 1200°C	-8.1mV – 69.5mV
Etc.			

- Schets van de constructie

Alle bovenstaande informatie kan nuttig zijn in het praktische deel. In volgende schets wordt ruw getoond hoe het systeem er zou kunnen uitzien.

Figuur 12: schets systeem



Bron: Ilan Meyers

Een temperatuursensor plaatsen na de warmtewisselaar meet of de uitlaatgassen niet warmer worden dan 70°C. Dit is van belang om ze te kunnen introduceren bij de GENANO 310.

Indien de temperatuur hieronder blijft kan een driewegkraan het koelwater rechtstreeks terug in het bassin brengen. Als de temperatuur van de uitlaatgassen te dicht bij 70°C komt, kan het koelwater over de radiator geleid worden en zo afkoelen. Hiervoor is de comparator nuttig en kan deze de elektronisch bediende driewegkraan bedienen. Zo kan ze ingesteld worden langs de radiator of rechtstreeks terug naar het bassin bij verschillende temperaturen van de uitlaatgassen of het koelwater.

Het regelen via de temperatuur van de uitlaatgassen is nuttiger dan via de temperatuur van het koelwater aangezien deze niet boven de 70°C mogen komen en het water dus ook nooit een hogere temperatuur zal hebben dan dit.

De extra kraan rechts van de radiator is op zich niet nodig maar kan handig zijn wanneer de radiator moet worden hersteld en we het proces over de water tank willen laten doorgaan.

- Werking systeem

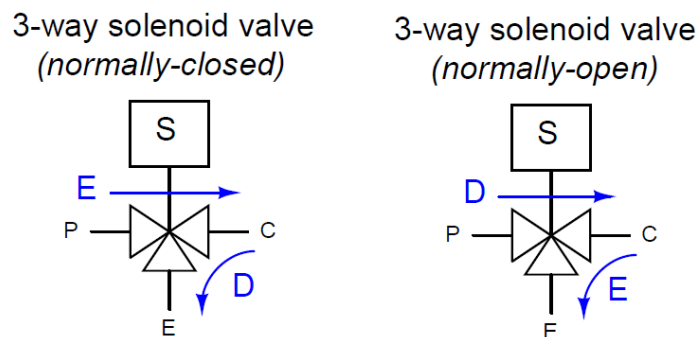
Een comparator gekoppeld aan een NTC of PTC kan door de juiste referentiespanning te bepalen, de solenoïde aansturen. Door deze waarden goed te kiezen zal de driewegkraan wisselen van toestand bij de gewenste temperatuur.

Door een eerste solenoïde bijvoorbeeld af te stellen op 60°C, zal de eerste radiator in gebruik worden genomen. (eventueel kunnen meerdere radiatoren gebruikt worden)

Blijkt een tweede radiator nodig, kunnen we een volgende solenoïde op 65°C uitlaatgastemperatuur afstellen en zo een dubbel koelend vermogen verkrijgen.

De drieweg solenoïde valve kan dus van het normaal gesloten type zijn of van het normaal open type. Dit is afhankelijk van het gebruik van een NTC of PTC. Beide zijn werkbaar in het systeem.

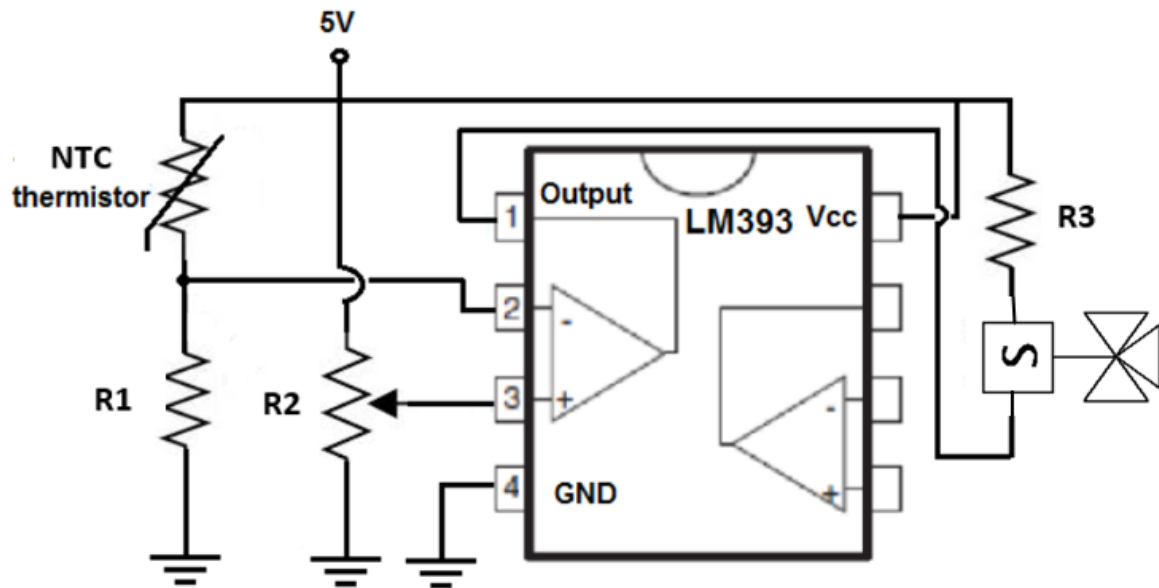
Figuur 13: drieweg solenoïde valve



Bron: ('What is a 3-way Solenoid Valve?', 2017)

Het elektrisch schema van deze soort sturing ziet er als volgt uit. We gebruiken een thermistor (PTC of NTC), een voltage comparator, weerstanden van verschillende waarden om zo de referentiespanning af te stellen, een potentiometer en de solenoïde valve. De thermistor is een weerstand die van waarde verandert, afhankelijk van de hoeveelheid warmte waaraan ze wordt blootgesteld. Door zo veranderingen in temperatuur waar te nemen, kunnen we de solenoïde als volgt aansturen. Hier werd gekozen om een NTC thermistor te gebruiken. Deze komen ook het vaakst voor.

Figuur 14: Stuurkring



Bron: aanpassing van ('How to Build a Simple Thermistor Circuit', z.d.)

De potentiometer R2 wordt ingesteld naargelang de solenoïde 'open' is bij een temperatuur lager dan bijvoorbeeld 60°C. Zo loopt het koelwater gewoon terug naar het bassin. Eens de uitlaatgastemperatuur boven 60°C stijgt moet het koelwater langs de radiator en dus de solenoïde in de 'gesloten' positie zetten.

Men zou kunnen zeggen dat het makkelijker is om te reageren op de temperatuur van het koelwater in plaats van de uitlaatgastemperatuur. Deze is makkelijker te meten en constanter. Hier kan dus voor gekozen worden maar aangezien we de gassen nooit boven 70°C willen hebben, werd in dit systeem geopteerd om met de uitlaatgastemperatuur te werken.

De potentiometer bepaald de referentiespanning, deze stuurt de solenoïde aan. Het is dus van cruciaal belang dat deze waarde correct wordt ingesteld.

Als de spanning over de NTC lager is dan de referentiespanning, staat de solenoïde in de 'open' positie. Wordt de spanning over de NTC groter dan de referentiespanning, zal ze 'gesloten' zijn.

De spanningsdeler die gevormd wordt door de NTC thermistor en R1 bepaald de spanningsval over het component. Door de wet van Ohm weten we namelijk dat de spanning U , gelijk is aan het product van stroom I en weerstand R ($U=I \cdot R$).

Dus kunnen we zeggen dat wanneer R stijgt, er een grotere spanningsval optreedt over het component.

Via deze kring kan dus een solenoïde driewegkraan aangestuurd worden en zo het koelsysteem regelen bij variërende temperatuur van de uitlaatgassen.

4.2 De meetopstelling

Het koelsysteem wordt op een 4-takt dieselmotor aangesloten. Deze motor stond in de loods van de school en door een connectiestuk te plaatsen tussen de uitlaat van de motor en de inlaat van het koelsysteem kunnen we op verschillende punten de samenstelling en temperatuur van de uitlaatgassen meten en vergelijken. Deze waarden komen aan bod in hoofdstuk 6.

Figuur 15: de opstelling.



Bron: Ilan Meyers

Het proof of concept bestaat dus uit een warmtewisselaar die werkt met water om de uitlaatgassen te koelen. Een pomp doet het koelwater circuleren, hier staat nog geen regeling op en werkt dus op constant debiet. Na de warmtewisselaar wordt de GENANO aangesloten die de gekoelde gassen ontvangt en verder zal reinigen. Op drie verschillende punten werden de metingen uitgevoerd. Net na de motor, net na de koeling en net na de GENANO. Zoals op de vorige pagina te zien is werd de koelbuis reeds vergroot om een betere warmtewisseling te verkrijgen bij het zelfregelend systeem. De praktische uitwerking hiervan werd door de gekende redenen niet afgerond.

5 Regelgeving

Maar waarom zou dit alles nu nuttig zijn? In het begin van de scheepvaart werd er niets uitgestoten aangezien schepen zeilden over de wereld. Veel is sindsdien veranderd.

Motoren werden steeds krachtiger, schepen steeds groter en de lucht steeds vervuiler. Sinds enkele jaren probeert de IMO regels op te leggen over vervuiling aan boord van schepen. Onder andere door MARPOL.

5.1 Cruiseschepen

Bij cruiseschepen zien we bijvoorbeeld een enorm grote uitstoot van NO_x, SO_x en PM in de grote havensteden. De cruisesector is een van de grootste vervuilers in de Europese wateren. De lange ligtijden om toeristen de havenstad te doen bewonderen en de grote energienood aan boord van deze schepen zijn hier de logische verklaringen voor. Door de invoer van uitstootbeperkende maatregelen zoals EGR, zwavelarme brandstof en energievoorziening met shore connection is dit echter al sterk verbeterd.

Uit een onderzoek uit 2019 van Transport & Environment (*One Corporation to Pollute Them All, Luxury cruise air emissions in Europe.*) is gebleken dat de cruises van Carnival Corporation & PLC, de grootste cruiseorganisator ter wereld, in 2017 meer dan 10 keer zoveel schadelijke stoffen uitstootten dan alle passagiersvoertuigen in Europa samen. Dit is mede door het rendement en de brandstofkwaliteit van voertuigen aan land tegenover het falen van de maritieme industrie om hier een evenwaardig equivalent in te vinden.

Het feit dat cruiseschepen dicht bij de kust navigeren en vaak veel en vrij lange port calls hebben, draagt mee aan hun grote impact aan de vervuilde lucht in populaire Europese landen. Zo zien we in Spanje, Noorwegen, Italië, Griekenland, etc. een enorme kwetsbaarheid aan dit soort vervuiling.

In de studie is er sprake van zero emission propulsion in de territoriale wateren van de EU te verplichten maar dit is tot op vandaag een erg grote en moeilijk in te voeren stap.

In 2017 stootten 203 cruiseschepen in Europa ongeveer 62 kT SO_x uit, 155 kT NO_x, 10 kT PM en meer dan 10 MT CO₂ uit. Dit vooral in de Middellandse Zee en andere toeristische trekpleisters zoals Noorwegen en Denemarken. Deze uitgestoten waarden zijn groter dan de totale nationale broeikasgasuitstoot van bijvoorbeeld Letland, Luxemburg en Cyprus.

De bevindingen van het onderzoek van Transport & Development concluderen dat zelfs een klein aantal cruiseschepen een enorme hoeveelheid luchtvervuiling veroorzaakt. Deze hoge uitstoot komt door onvoldoende strenge regels rond brandstofkwaliteit en motoruitstoot. De vele passagierswagens in Europa stoten vele malen minder schadelijke gassen uit dan deze grote schepen. De cruise terminals zijn vaak ook gelegen naast dichtbevolkte steden en dus enorm schadelijk voor de bevolking.

Gelukkig zijn er technologieën beschikbaar om de uitstoot van deze schepen te verminderen en zelfs te elimineren. Het beste voorbeeld hiervan is de SSE (Shore-side electricity). Hierdoor hoeven de motoren niet te draaien tijdens port calls en dus geen schadelijke stoffen uit te stoten. Dit is een stap in de goeie richting maar verdere maatregelen zullen in de toekomst zeker nog nodig zijn.

5.2 IMO

Zoals uit punt 5.1. blijkt, is er nood aan duidelijke regels over hoeveel er nu precies mag worden uitgestoten en waar.

MARPOL Annex VI Prevention of Air Pollution from Ships ging van kracht op 19 mei 2005. In deze annex worden limieten geplaatst op zwaveloxiden (SO_x) en stikstofoxiden (NO_x) in de uitlaatgassen van schepen. Het verbiedt de opzettelijke uitstoot van ozon-beschadigende substanties. De conventie mikt op het reduceren van broeikasgasuitstoot door schepen. Ook reguleert het de verbranding van afval aan boord (*incineration*) en de uitstoot van VOC van tankers.

- ECA

Of SECA: (sea) emission control areas zijn gebieden waar een strengere wetgeving van kracht is omtrent het uitstoten van schadelijke stoffen. De limieten voor SO_x- en PM-uitstoot werden in deze gebieden gereduceerd naar 0,10% op 1 januari 2015.

Buiten ECA limieten op SO _x en PM	Binnen ECA limieten op SO _x en PM
4,50% m/m voor 1 januari 2012	1,50% m/m voor 1 juli 2010
3,50% m/m op en na 1 januari 2012	1,00% m/m op en na 1 juli 2010
0,50% m/m op en na 1 januari 2020	0,10% m/m op en na 1 januari 2015

De bestaande ECAs zijn:

1. Baltische zee – Annex I MARPOL (enkel SOX)
2. Noordzee – Annex V MARPOL (enkel SOX)
3. Noord-Amerikaans gebied – Annex VI MARPOL (SOX, NOX en PM)
4. Verenigde Staten en Caraïbische Zee gebied – Annex VI MARPOL (SOX, NOX en PM)

- Global 2020 marine sulphur cap

Een vermindering van de globale zwavel limiet in bunker brandstof van 3,50% naar 0,50%. In effect gekomen op 1 januari 2020.

Deze nieuwe amendementen bannen het gebruik van hoge zwavelhoudende brandstoffen zonder het gebruik van scrubbers.

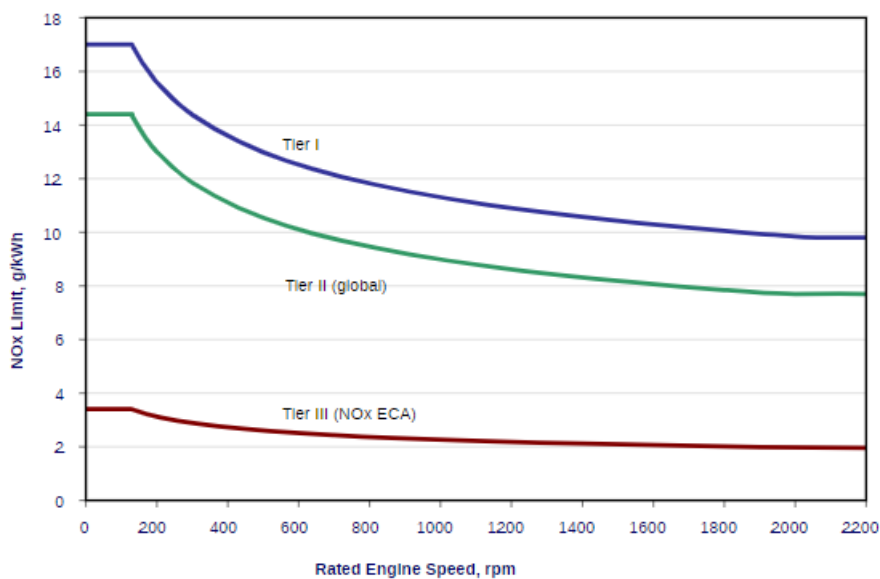
De EU heeft een nog strengere limiet van 0,10% zwavel voor schepen in Europese havens.

- NO_x

Om meer resultaat te halen bij het verminderen van uitstoot werden ook regels omtrent de dieselmotoren zelf opgelegd.

- Tier I: dieselmotoren geïnstalleerd aan boord van schepen geconstrueerd vanaf 1 januari 1990 maar voor 1 januari 2000 moeten aan de Tier I regels voldoen. De Tier-regels gelden voor dieselmotoren met meer dan 130 kW vermogen.
 - ➔ 17,0 g/kWh wanneer motorsnelheid lager is dan 130rpm.
 - 45,0 x n^(-0,2) g/kWh wanneer de snelheid tussen 130 en 2000rpm is.
 - 9.8 g/kWh bij 2000rpm of hoger.
- Tier II: uitstootlimiet voor motoren geïnstalleerd op schepen geconstrueerd vanaf 1 januari 2011.
 - ➔ 14,4 g/kWh bij motorsnelheid lager dan 130rpm.
 - 44 x n^(-0,23) g/kWh bij snelheid tussen 130 en 2000rpm.
 - 7,7 g/kWh bij 2000rpm of hoger.
- Tier III: limiet voor motoren geïnstalleerd op schepen geconstrueerd vanaf 1 januari 2016 die in ECAs opereert (Noord-Amerika ECA en Caraïben SECA). In 2021 worden de Baltische- en Noordzee ook Tier III regio's.
 - ➔ 3,4 g/kWh bij motorsnelheid lager dan 130rpm.
 - 9 x n^(-0,2) g/kWh bij snelheden tussen 130 en 2000rpm
 - 2 g/kWh bij 2000rpm of hoger.

Figuur 16: MARPOL Annex VI NO_x emission limits



Bron: ('IMO Marine Engine Regulations', 2020a)

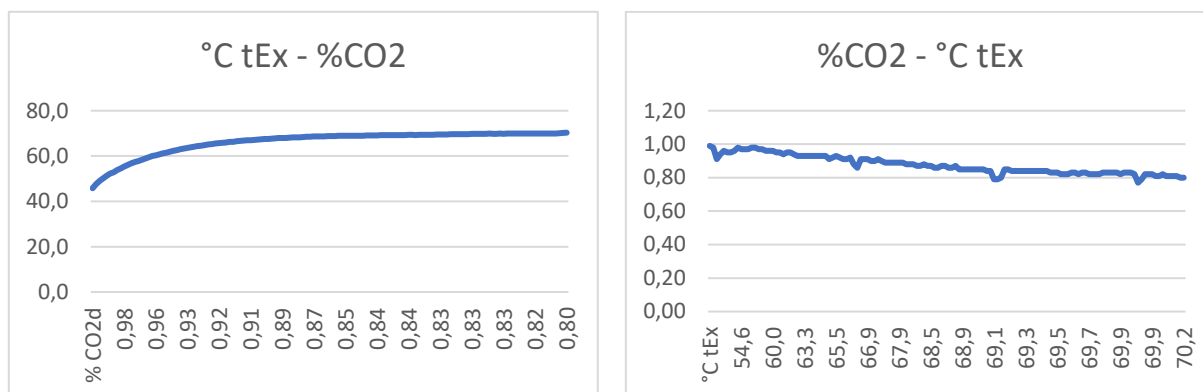
6 Metingen 'Proof of Concept'

Zoals eerder vermeld werd een proefopstelling gemaakt waarop we enkele metingen kunnen doen om het effect te zien van koeling en van de GENANO. Deze waardes staan allemaal in een Excel-document. De belangrijkste ondervindingen komen in dit hoofdstuk aan bod. De volledige metingen staan in de bijlagen.

De metingen werden uitgevoerd bij verschillende belasting op de motor door warmte-elementen aan te sluiten als weerstand. Er werd op drie verschillende punten gemeten. Namelijk net na de uitlaat van de motor, na de koeling en na de GENANO. Telkens bij nul last, deellast en vollast.

De belangrijkste waardes met betrekking tot de uitstoot verminderen die de gebruikte sensor kan waarnemen, zijn de metingen van percentage CO₂, ppm NO_x en ppm SO₂. Deze worden dan ook bij elke belasting besproken. PM-metingen werden nog niet uitgevoerd. Bemerk wel dat de temperatuursveranderingen van de uitlaatgassen een effect kunnen hebben op de sensor en dus op de gemeten waardes.

6.1 Motor nul last

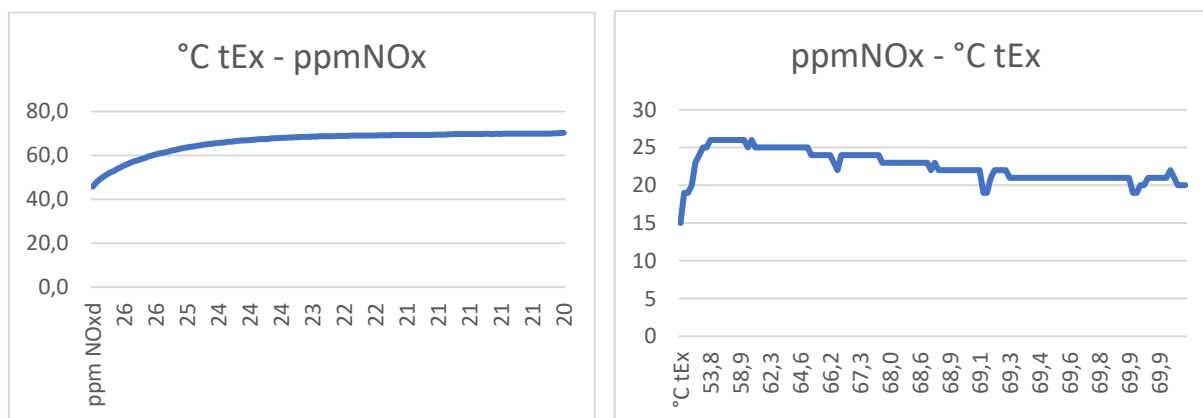


Tabel 1: uitlaatteratuur t.o.v. percentage uitgestoten CO2

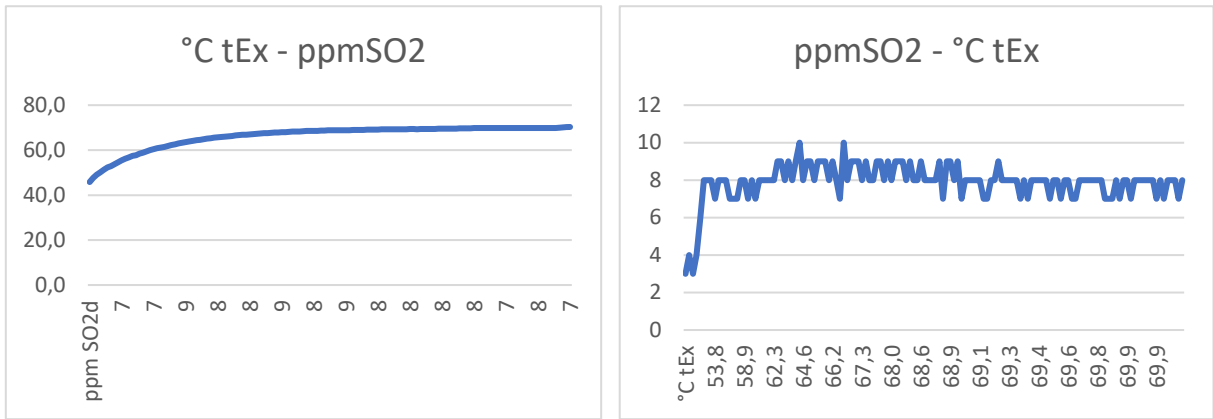
De temperatuur stijgt geleidelijk aan door het opstarten van de motor zonder belasting. Initieel wordt redelijk wat CO₂ uitgestoten maar dit zakt wanneer de motor een tijdje draait. Een minder ideale verbranding kan hier de oorzaak van zijn, bij de perfecte verbranding komt immers enkel CO₂ en H₂O vrij. In het begin is de temperatuur nog vrij laag.

Er is nog geen belasting dus de motor hoeft geen extra vermogen te leveren. Zo zien we ook dat de uitlaatteratuur geleidelijk aan constant wordt rond 70°C.

We zien eenzelfde trend bij de NO_x metingen. Temperatuur stijgt en NO_x uitstoot zakt. Dit is tegen de verwachtingen in, mogelijks door een verbeterde verbranding.



Tabel 2: uitlaatteratuur t.o.v. uitgestoten NOx deeltjes

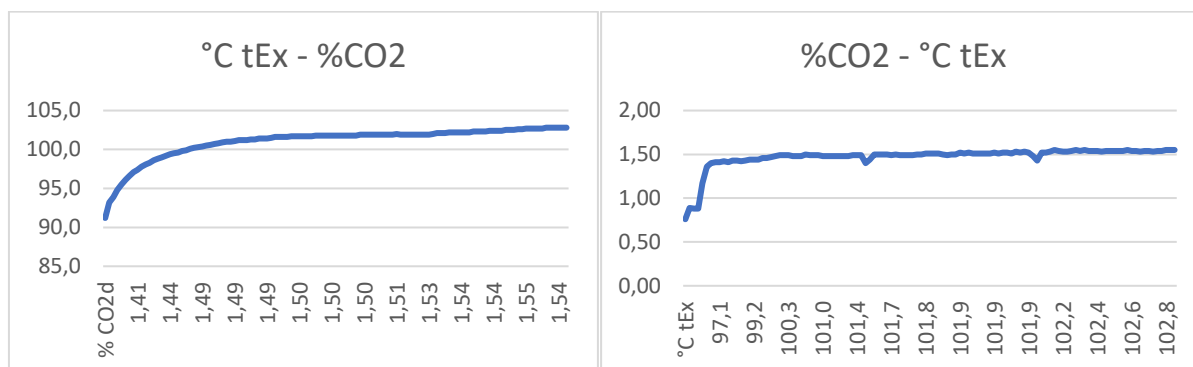


Tabel 3: uitlaattemperatuur t.o.v. SO2 uitstoot.

Ook hier stijgt de temperatuur richting de 70°C en stabiliseert daar. De meting van SO₂ schommelt echter snel rond een stabiele 8ppm. Dit lijkt vrij onafhankelijk van de temperatuur en ligt dus waarschijnlijk eerder aan de samenstelling van de brandstof dan aan de uitlaattemperatuur. SO₂ is namelijk een verbrandingsproduct van zwavel uit de brandstof en lucht en wordt dus steeds gevormd bij de verbranding.

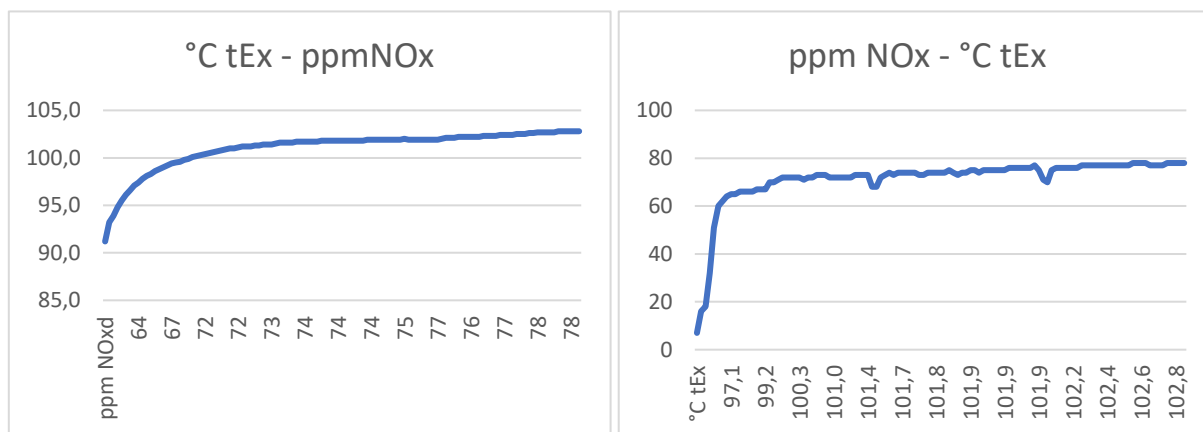
6.2 Motor deellast

Om een deellast te verkrijgen sluiten we een warmte-element aan op de motor. Deze weerstand vraagt een extra vermogen van de motor en zo kunnen we de metingen herdoen aan een hogere belasting.



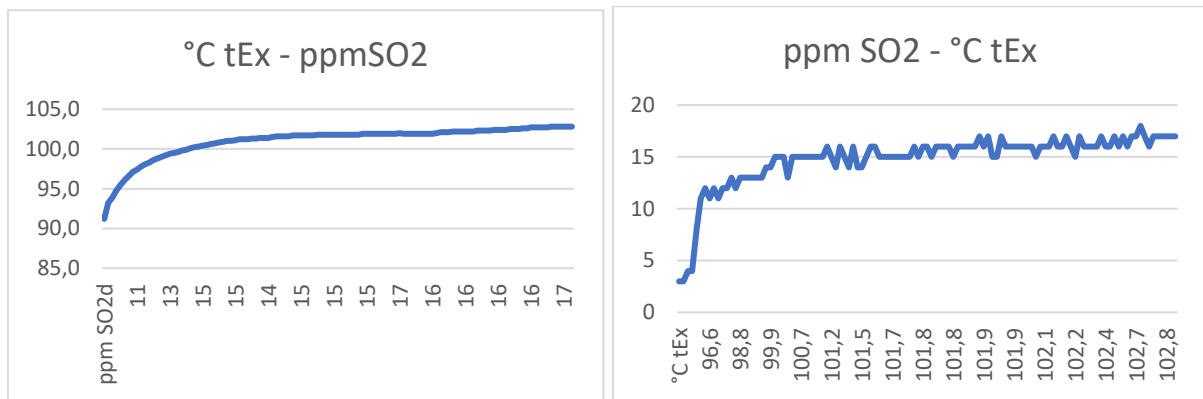
Tabel 4: uitlaattemperatuur t.o.v. percentage uitgestoten CO2

Hier zien we dat de CO₂ niet meer zakt eens we op toeren zijn gekomen. De uitstoot stijgt en stabiliseert een beetje eens de temperatuur dat ook doet. Bemerkt dat de temperaturen hier al veel hoger liggen dan bij onbelaste toestand en dit is nog niet de maximaal belaste toestand. Een goede koeling zal dus zeer belangrijk zijn vooraleer we de gassen in de GENANO kunnen introduceren.



Tabel 5: uitlaattemperatuur t.o.v. uitgestoten NOx deeltjes

Een gelijkaardige grafiek zien we bij de uitgestoten NO_x. Geen dalende lijn, deze blijft zelfs stijgen zonder echt af te vlakken. De uitstoot is erg afhankelijk van de temperatuur en stijgt zo goed als evenredig. Dit is logisch aangezien hogere temperaturen leiden tot meer NO_x-vorming.



Tabel 6: uitlaattemperatuur t.o.v. SO2 uitstoot

Hier zien we een volledig ander verloop dan bij de onbelaste toestand. Waar de waardes toen rond een stabiele waarde varieerden, zien we nu een ongeveer evenredige stijging van de SO₂ uitstoot ten opzichte van de temperatuur. De uitstoot zou dus weldegelijk afhankelijk kunnen zijn van de temperatuur in plaats van enkel de samenstelling van de brandstof. Ze spelen dan beiden een belangrijke rol in de hoeveelheid uitgestoten ppm. De stijging van SO₂ kan ook komen door een grotere hoeveelheid brandstof die ingespoten wordt om de grotere belasting op te vangen.

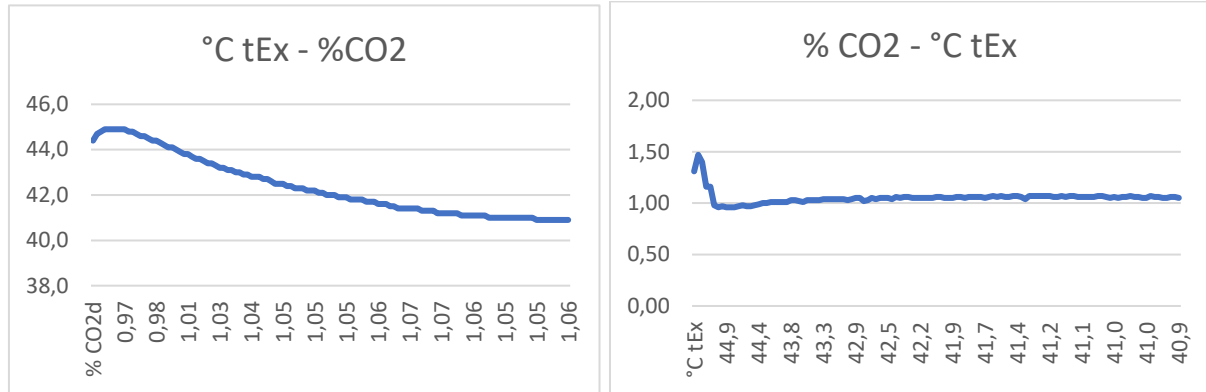
SO₂-vorming in combinatie met NO_x is een verzurende component. Er mag dus zeker niet teveel neerslaan op de uitlaatbuis want dit zou nefast kunnen zijn.

6.3 Motor vollast

Op dit punt werden geen metingen gedaan. Na deellast werd ervoor gekozen om direct te beginnen meten bij het punt aan de koeling. De temperatuur bij deellast werd al vrij hoog en om zeker te zijn dat de koeling voldoende warmtewisseling kan garanderen werd deze meting overgeslagen. Achteraf bleek dit niet nodig want de koeling was voldoende sterk.

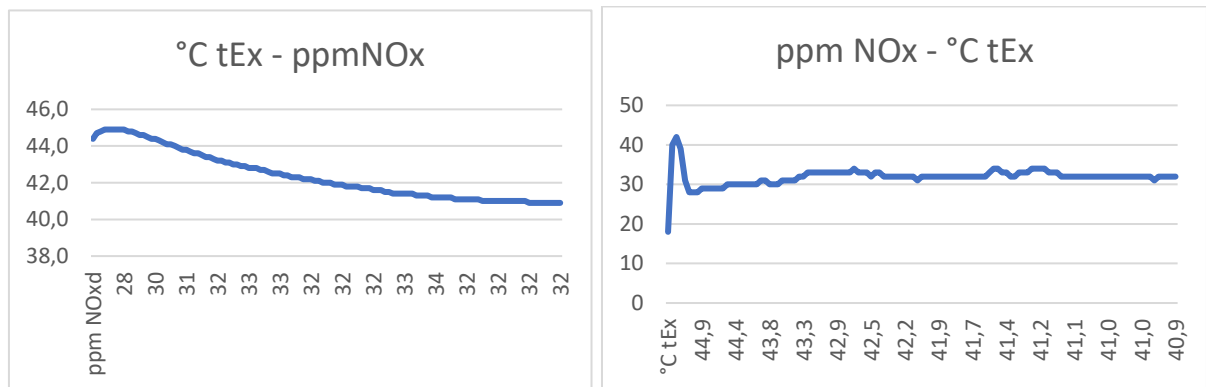
6.4 Koeling nul last

De sensor staat net na de warmtewisselaar. Alle vorige metingen werden herhaald op dit nieuwe meetpunt. Bemerkt wel dat de invloed van de temperatuur een effect kan hebben op de meetsensor.



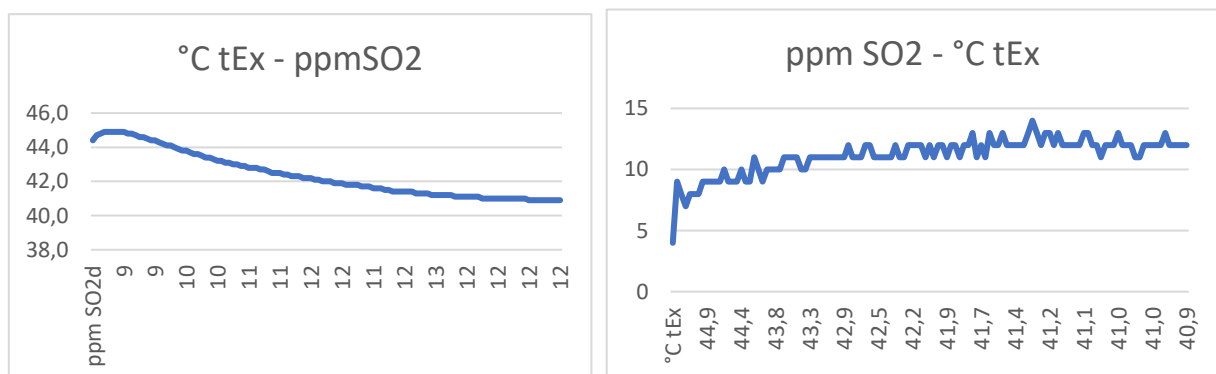
Tabel 7: uitlaattemperatuur t.o.v. percentage uitgestoten CO2

Zoals te verwachten is, zakt de temperatuur geleidelijk aan naarmate de gassen op eenzelfde motorvermogen uitgestoten worden. De CO₂ uitstoot is vrij stabiel na de koeling. Eens de temperatuur zakt, doet de CO₂ uitstoot dit ook.



Tabel 8: uitlaattemperatuur t.o.v. uitgestoten NOx deeltjes

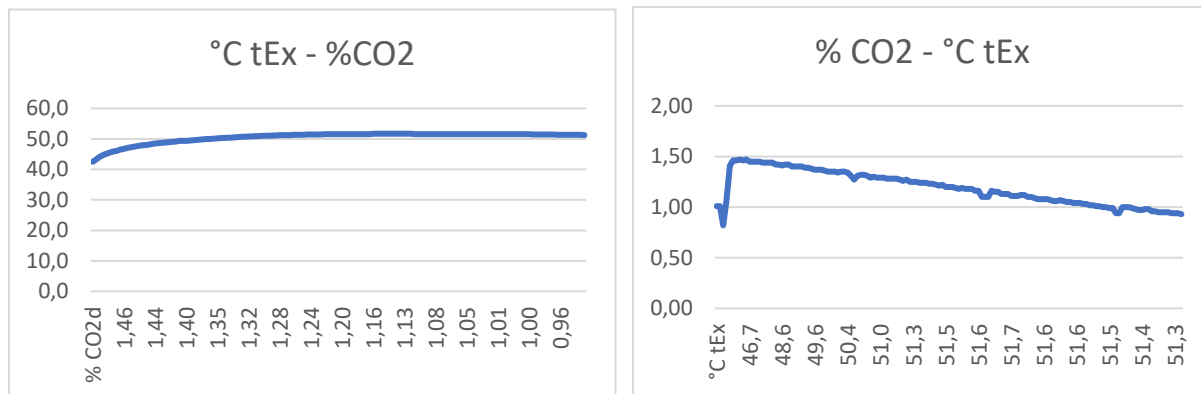
Ook bij deze metingen zien we een daling in temperatuur die zorgt voor een vrij stabiele waarde van NO_x uitstoot.



Tabel 9: uitlaattemperatuur t.o.v. SO2 uitstoot

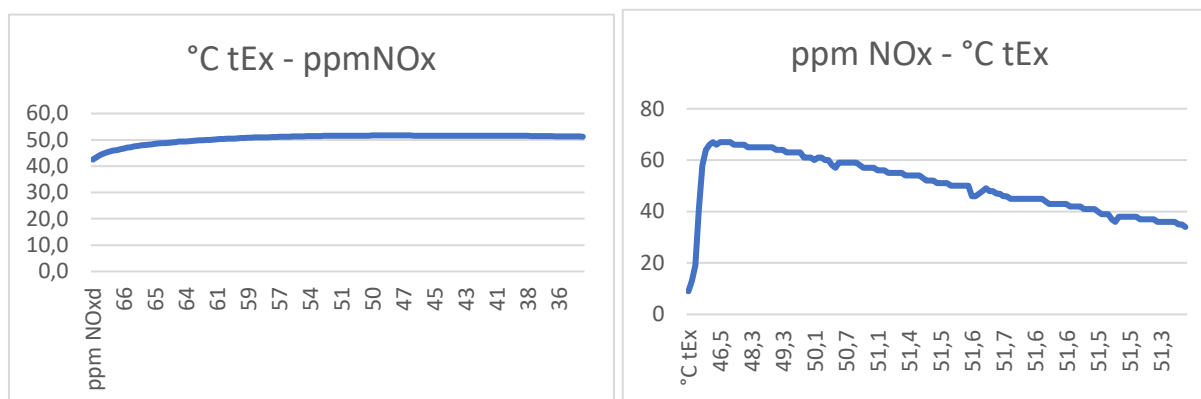
Zoals de vorige keren is de SO₂ afwijkend van de andere metingen door een stijging in plaats van stabilisering of zelfs daling. Dit komt waarschijnlijk door de brandstofkwaliteit en heeft minder met de koeling te maken.

6.5 Koeling deellast



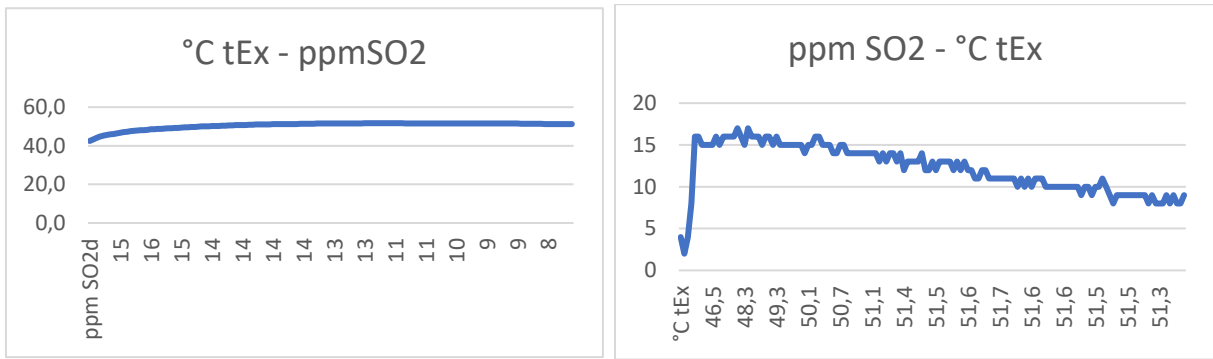
Tabel 10: uitlaattemperatuur t.o.v. percentage uitgestoten CO₂

Hier zien we een sterke daling in het percentage uitgestoten CO₂. De temperatuur stabiliseert na de koeling terwijl de uitstootwaarde sterk daalt. Dit laat dus uitschijnen dat de koeling een effect heeft op het verminderen van de uitstoot van schadelijke stoffen. Als dit bij vollast ook zo is, zouden we kunnen aannemen dat koeling en CO₂ uitstoot verbonden zijn aan elkaar.



Tabel 11: uitlaattemperatuur t.o.v. uitgestoten NO_x deeltjes

Ook hier zien we weer een stabiele temperatuur die een sterke daling in uitstoot met zich meebrengt. Dit is de eerste situatie waarin we ook echt de NO_x uitstoot zien dalen. Aangezien NO_x en temperatuur nauw verbonden zijn in de verbranding, is deze sowieso aanwezig. We zien een daling, die aan de externe koeling te wijten is. We kunnen dus stellen dat deze door de koeling neerslaan op de buis of misschien zelfs afbreken door de temperatuurverlaging. Dit laatste al wat minder waarschijnlijk dan het eerste. De neerslag bekijken op de koelbuis zal dus belangrijk zijn.



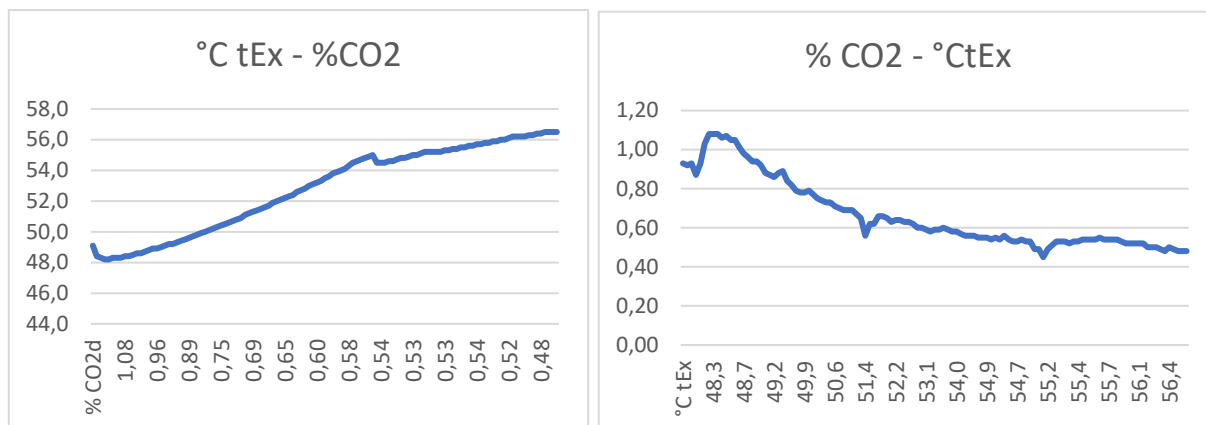
Tabel 12: uitlaattemperatuur t.o.v. SO2 uitstoot

Wederom een meetresultaat met een stabiele temperatuur en sterke daling van uitstoot. Net zoals bij de NO_x, is het de eerste waargenomen daling van SO₂. Dit zou enerzijds te wijten kunnen zijn aan een betere verbranding in de motor zelf of anderzijds door het effect van de extra koeling waardoor ze neerslaan tegen de wand van de warmtewisselaar. Hier moeten verdere metingen bevestiging geven.

Door de plotse daling in temperatuur slaan de gevormde stoffen waarschijnlijk neer tegen de wand, dit is niet de bedoeling en moet dus bekeken worden. Als dit niet het geval is en de koeling effectief voor een reductie in uitstoot van SO₂ en NO_x zorgt, is dit zeer positief te noemen.

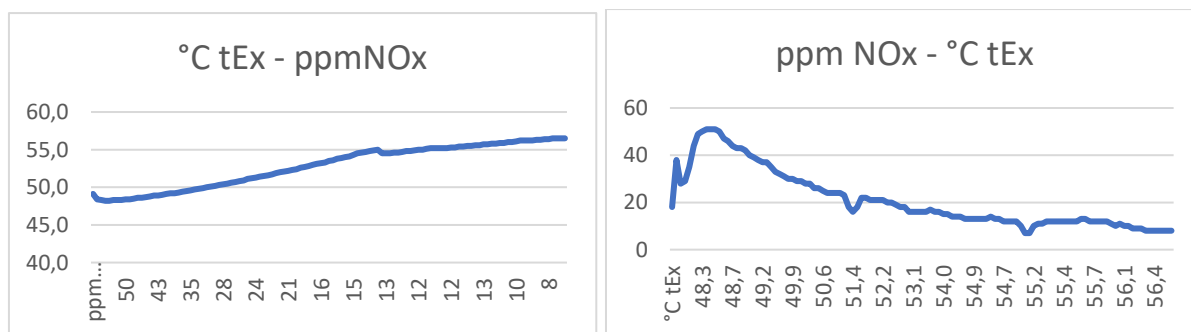
6.6 Koeling vollast

Met vollast wordt bedoeld, twee warmte-weerstanden aangesloten op de motor. Dit is niet letterlijk de maximale belasting die de motor aankan maar voor deze metingen is dit de volledig gebruikte belasting.



Tabel 13: uitlaatteratuur t.o.v. percentage uitgestoten CO2

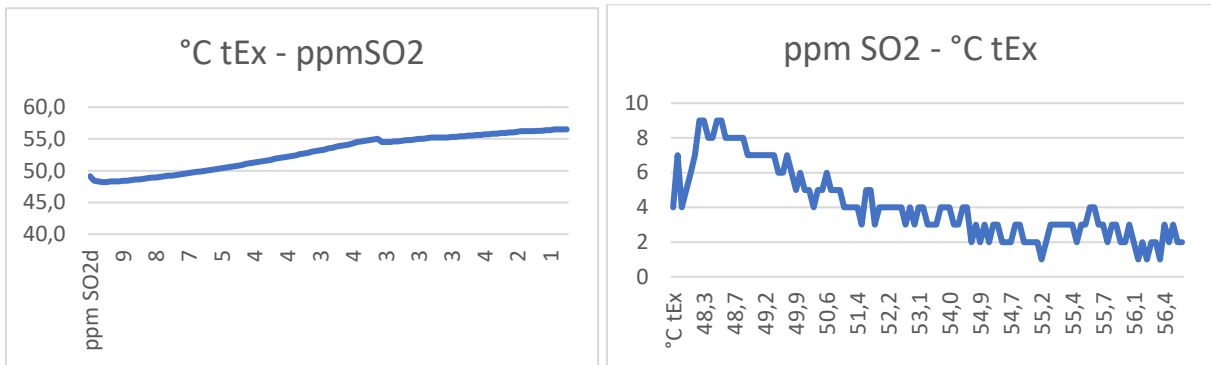
Zoals verwacht zien we een sterke stijging in de temperatuur wanneer we de motor extra gaan belasten. De uitstoot van CO₂ blijft echter verder dalen door het extern koelen van de uitlaatgassen. Dit is een veelbelovende meting voor het positieve effect van koeling op uitstoot. CO₂ verminderd dus door de warmtewisseling in deze meetopstelling en doet het koolstof waarschijnlijk neerslaan tegen de buiswand.



Tabel 14: uitlaatteratuur t.o.v. uitgestoten NOx deeltjes

Ook de uitstoot van ppm NO_x blijft in dalende lijn na de koeling.

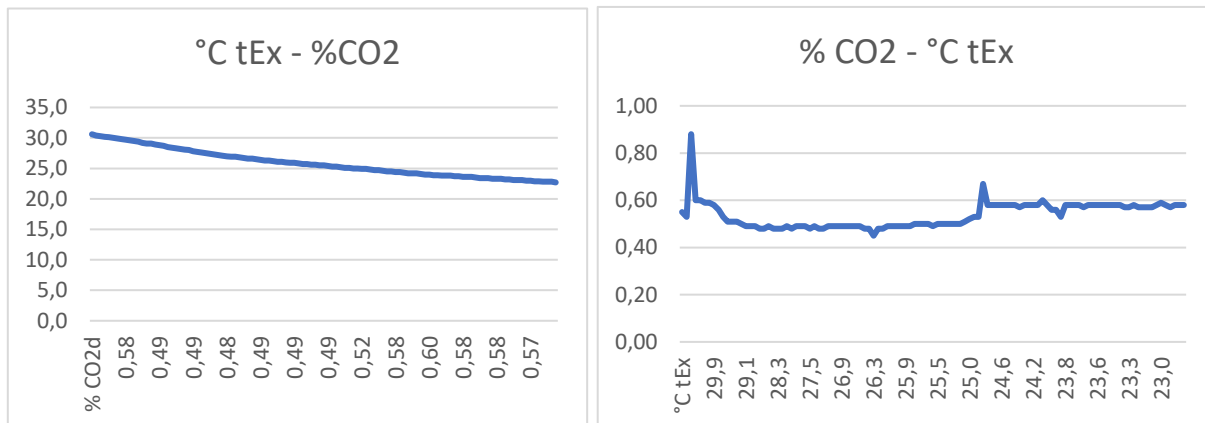
Snelle afkoeling van de verbrandingsgassen zorgt in sommige toepassingen voor een stijging van NO_x, bijvoorbeeld bij gasturbines. Hier is dit zo te zien niet het geval. Het blijft wel belangrijk om de neerslag tegen de wand te bekijken.



Tabel 15: uitlaattemperatuur t.o.v. SO2 uitstoot

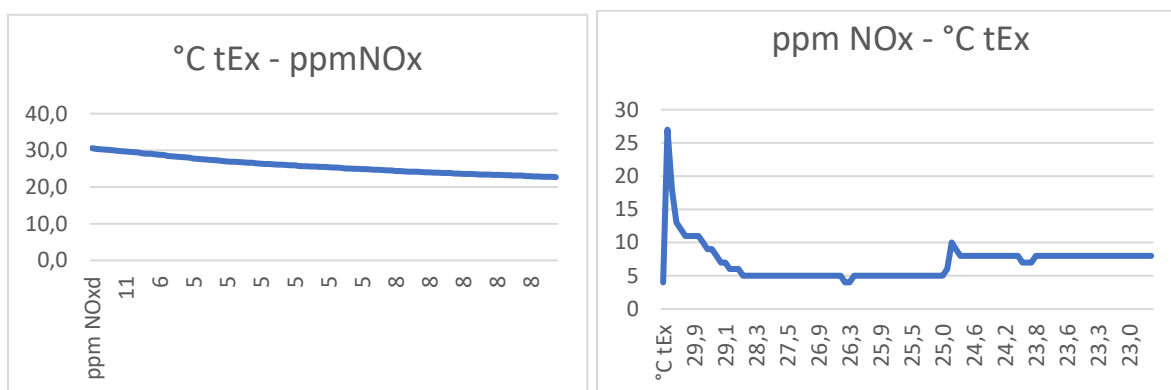
Na een mooie daling stabiliseert de SO₂ uitstoot. De koeling heeft voor een daling gezorgd en dus het beoogde effect bereikt. De kans dat ze neerslaat tegen de wand is wederom zeer groot. Er moet dus bekeken worden of dit het geval is en om dit periodiek schoon te maken. Verzuring door de neergeslagen zwavel- en stikstofoxiden kan de buis kapot maken.

6.7 GENANO nul last



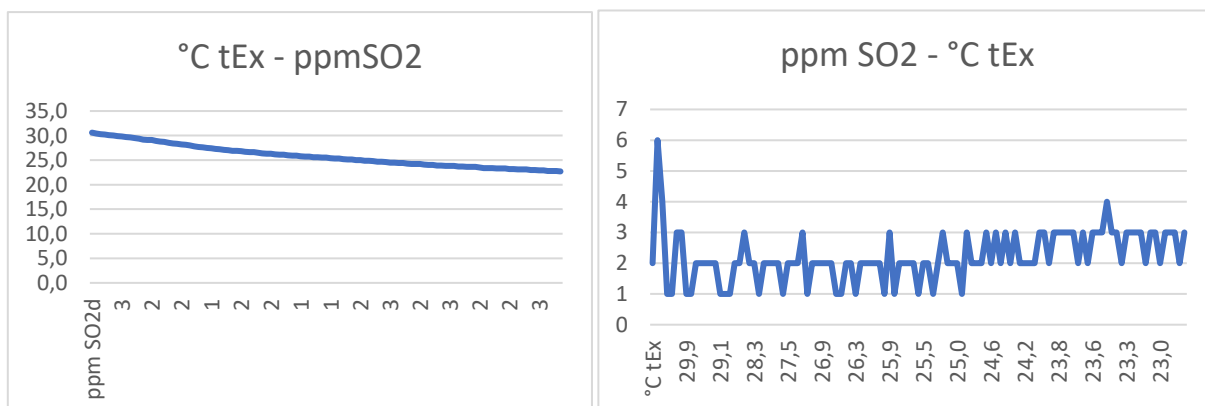
Tabel 16: uitlaattemperatuur t.o.v. percentage uitgestoten CO2

De temperatuur zakt aangezien de meetsensor nu deels in de buitenlucht zit. De metingen die we nu waarnemen zijn dus de waarden die in de atmosfeer terecht komen. We zien een vrij stabiele CO₂ uitstoot bij geen belasting van de motor.



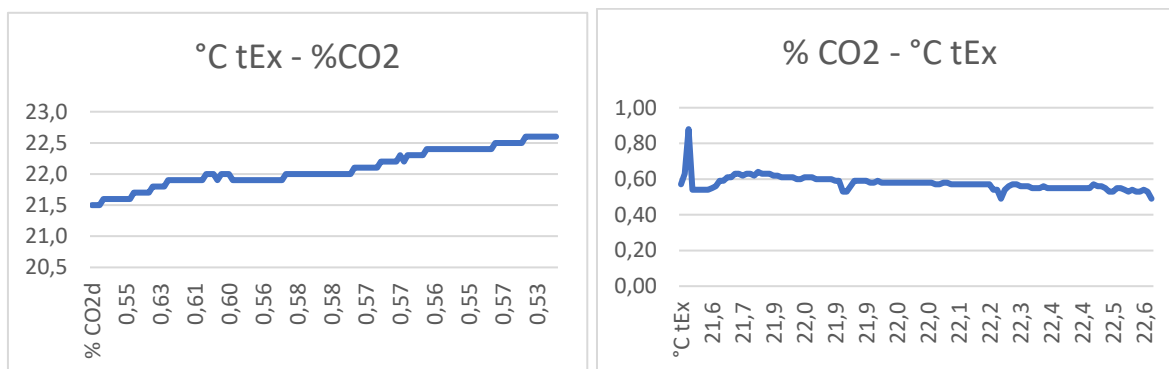
Tabel 17: uitlaattemperatuur t.o.v. uitgestoten NOx deeltjes

Ook bij de NO_x zien we een vrij stabiele uitstoot naar de atmosfeer. Net zoals bij de SO₂.



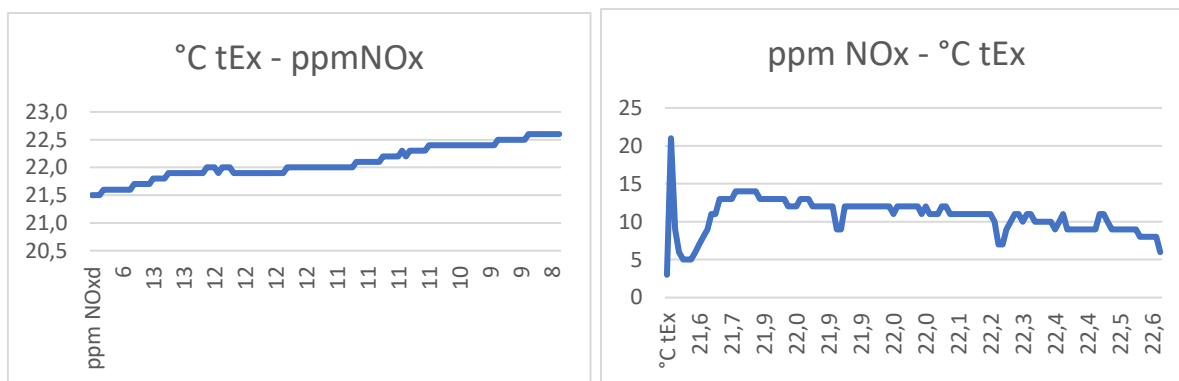
Tabel 18: uitlaattemperatuur t.o.v. SO2 uitstoot

6.8 GENANO deellast

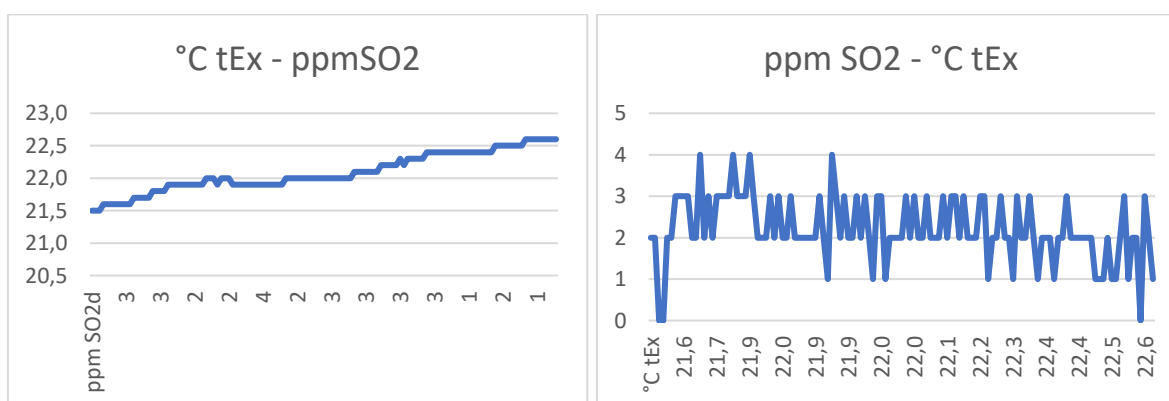


Tabel 19: uitlaattemperatuur t.o.v. percentage uitgestoten CO2

Zoals steeds zien we een kleine stijging in temperatuur door de motor te gaan belasten. De uitstoot daalt nog steeds net zoals de meting die we na de koeling hebben uitgevoerd.



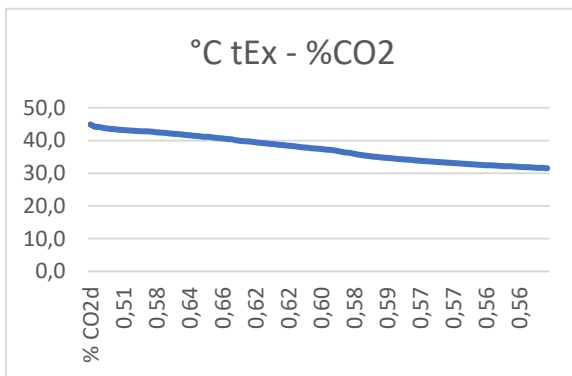
Tabel 20: uitlaattemperatuur t.o.v. uitgestoten NOx deeltjes



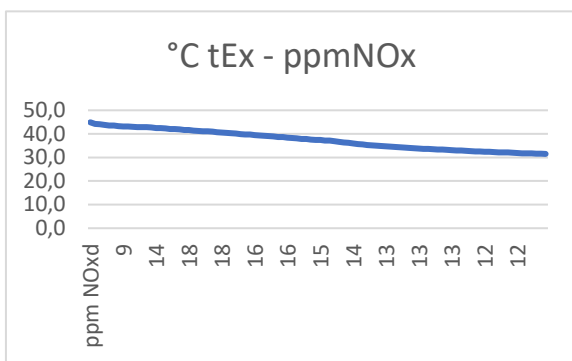
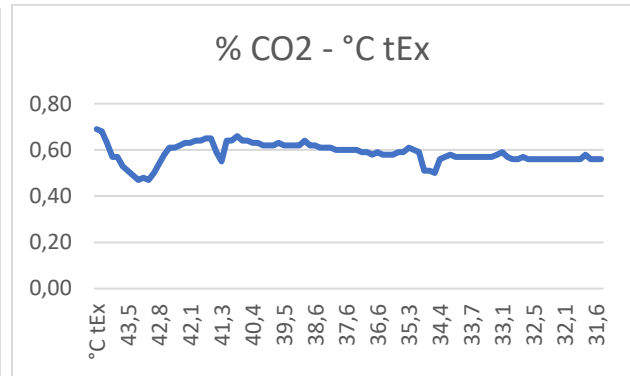
Tabel 21: uitlaattemperatuur t.o.v. SO2 uitstoot

Ook bij NOX en SO2 zien we weer eenzelfde trend. Een lichte daling en stabilisering rond eenzelfde waarde. Deze metingen zijn zoals vermeld deels in de buitenlucht genomen en hebben dus een serieuze afwijking.

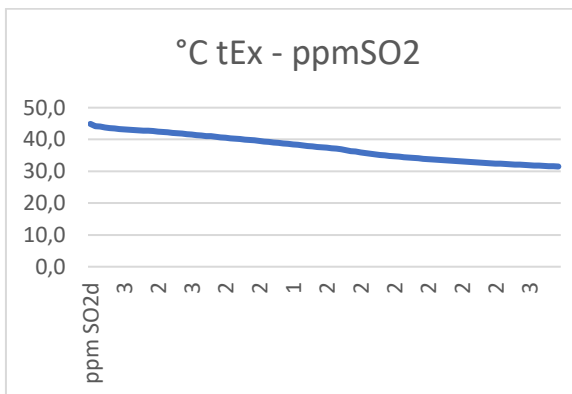
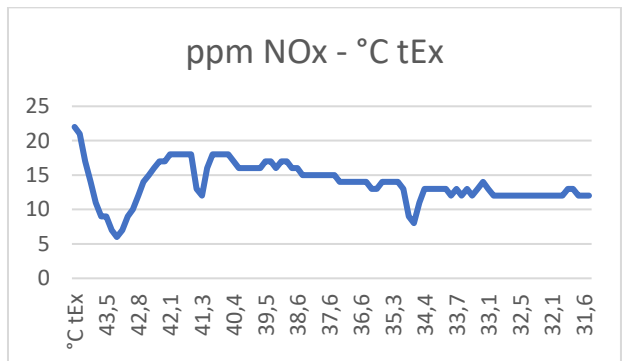
6.9 GENANO vollast



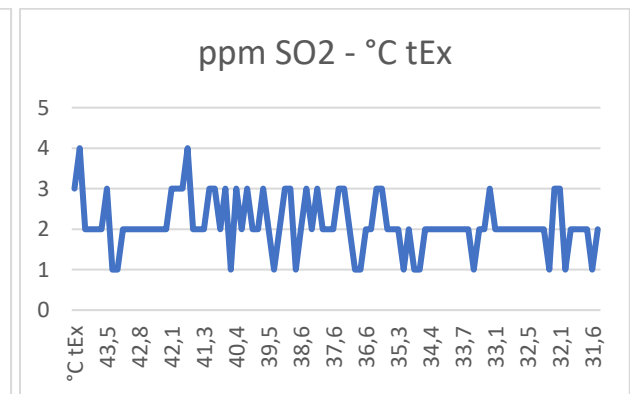
Tabel 22: uitlaatteratuur t.o.v. percentage uitgestoten CO2



Tabel 23: uitlaatteratuur t.o.v. uitgestoten NOx deeltjes



Tabel 24: uitlaatteratuur t.o.v. SO2 uitstoot



Bij vollast meten we na de GENANO nogmaals een daling die stabiliseert bij de uitstoot. De temperatuur zakt verder omdat de meetsensor deels in de buitenlucht zit en heeft dus weinig met de GENANO zelf te maken. Het zuiverende effect kunnen we wel aan de filter toeschrijven.

6.10 Analyse van de metingen.

De metingen werden uitgevoerd op een zachte dag met opklaringen en af en toe miezerneerslag en bewolking. 11°C buitentemperatuur en zuidwesten wind met oplopende windstoten. De opstelling staat in een loods met geopende garagepoort. De metingen zijn allemaal direct na elkaar uitgevoerd en niet telkens vanuit opstart van de motor. De motor had dus steeds langer gedraaid bij verschillende meetpunten. Telkens uit- en inschakelen van de warmte-elementen als extra belasting van de motor heeft tijd nodig om terug te stabiliseren. Er werd telkens een tijd gewacht om de waardes van de metingen te noteren maar hier kan een menselijke fout op zitten.

De waardes kunnen wat afwijkend zijn, maar blijven een goede indicatie over de testopstelling.

We zien dat de koeling weldegelijk een vrij groot effect heeft op de uitgestoten schadelijke stoffen in de uitlaatgassen. Dit is echter een effect op de meetresultaten en of de ware toedracht hiervan effectief de koeling is, zal verder onderzocht moeten worden. Daar het onwaarschijnlijk is dat er plotseling een verbetering optreedt door simpelweg de uitlaatgassen te gaan koelen. De metingen na de uitlaat zijn merkkelijk groter dan deze na de koeling en na de GENANO. De sensor zat bij elke meting in een afgesloten ruimte behalve bij de metingen na de GENANO. Hierdoor zijn de absolute waardes van deze laatste meting wat minder betrouwbaar maar ze geven wel een idee van het effect.

De voornaamste conclusie die we kunnen trekken uit de uitgevoerde metingen is dat een koeling op de uitlaatgassen plaatsen alvorens ze uit te stoten een impact kan hebben op de meetresultaten van de toxiciteit van deze gassen.

In hoeverre de uitlaatgassen neerslaan aan de binnenkant van de koelbuis werd bij deze opstelling geen aandacht aan besteed maar is wel een belangrijk onderdeel voor verder onderzoek. We zien dat door een koeling te plaatsen de CO₂ daalt, de koolstof zal dus waarschijnlijk neerslaan op de buiswand. Net zoals de NO_x en SO₂. Bij deze stoffen is de kans ook reëel dat zwavel en stikstof neerslaan op de buis. Dit kan echter voor de vorming van zuren zorgen en moet dus bekeken worden.

Het effect van de GENANO is zeker positief te noemen maar uit de metingen blijkt dat vooral de koeling van de uitlaatgassen een grote impact heeft op een verminderde uitstoot van CO₂, NO_x en SO₂.

7 Andere uitlaatgas-nabehandelingssystemen

7.1 Scrubbers

Scrubbers, ook wel gaswassers genoemd, zijn zoals eerder vermeld nodig om brandstof met een hoog zwavelgehalte te kunnen gebruiken. Door de nieuwe regelgeving worden deze brandstoffen namelijk verboden zonder het gebruik van deze installaties.

Gaswassers of exhaust gas cleaning systems (EGCS) worden gebruikt om gassen te ontdoen van bepaalde stoffen, hier vooral SO_x . Dit wordt gedaan door middel van absorptie. De uitlaatgassen worden in contact gebracht met een scrubbervloeistof. Deze vloeistof neemt een deel van de stoffen op uit het gas waardoor ze niet meer in de uitlaatlucht zit. In de scrubbervloeistof zitten chemische stoffen die de schadelijke stof uit het gas kan neutraliseren. Zo is dit een basisch reagens voor zwaveldioxide, bijvoorbeeld zoutzuur of natriumhydroxide. Er ontstaat een basische waskolom. Het omgekeerde kan ook en dan spreekt men van een zure waskolom. Ammoniak neutraliseren kan door een zuur aan de scrubbervloeistof toe te voegen.

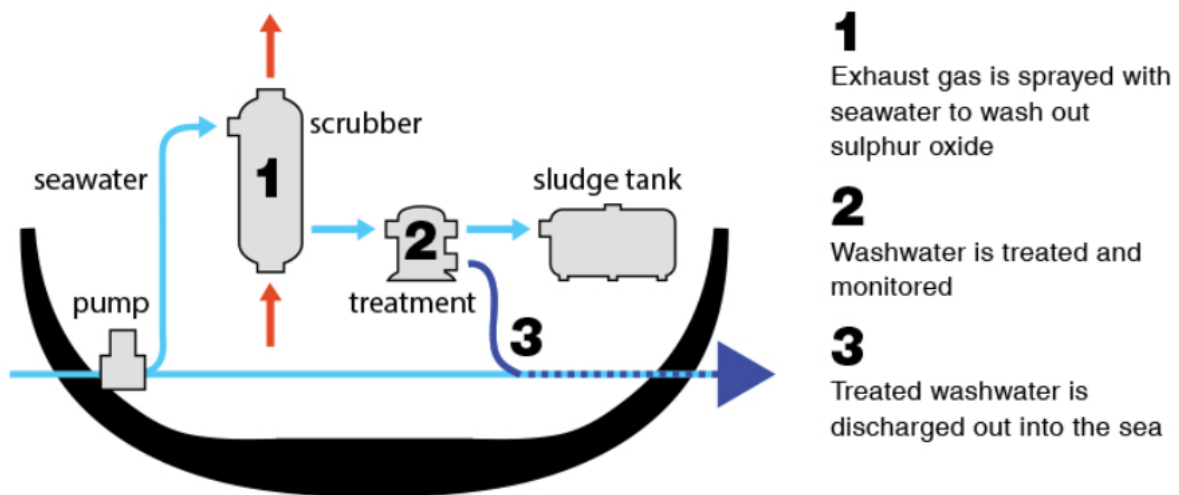
Aan boord van schepen vinden we de scrubbers terug in de funnel of scheepsschoorsteen. Door zeewater of zoet water te vernevelen in de funnel, wordt het zwavelgehalte van de uitlaatgassen sterk vermindert. De zwavel is dus in de scrubbervloeistof gedrongen waardoor ze niet in de buitenlucht wordt gestoten. De kritiek op dit systeem is dat de zwavel nu niet in de lucht terecht komt maar wel vast zit in het gebruikte water. Het kan dus nog steeds de omgeving vervuilen. Er zijn dan ook verschillende soorten scrubbers, elk met hun eigen voor- en nadelen.

- Open loop scrubber.

Maakt vaak gebruik van zeewater om de zwavelconcentratie van de uitlaatgassen naar een 0,1% equivalent te brengen. Het scrubberwater wordt terug overboord geloodst maar is conform met de IMO regelgeving door een waswater nabehandeling.

De uitlaatgassen komen onderaan de scrubber binnen, waarna zeewater langs de bovenkant wordt toegevoegd via spraykoppen. De zwaveldeeltjes in de uitlaatgassen binden zich aan de waterdruppels bij de juiste temperatuur. De gefilterde gassen verlaten de scrubber langs de bovenkant en het zeewater gaat langs onder weg en wordt uiteindelijk terug in zee gebracht.

Figuur 17: Open loop scrubber

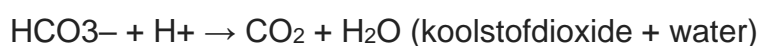
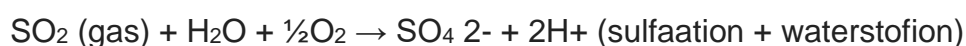


Bron: ('Open-loop scrubber system', z.d.)

Dit systeem gebruikt zeewater zonder extra chemicaliën. Het is erg effectief maar heeft wel een zeer groot pompvermogen nodig om het benodigde zeewater in de scrubber te krijgen.

Zeewater met een hoge omgevingstemperatuur is minder geschikt en fresh water kan zelfs niet gebruikt worden in een open loop. Er moet een groot genoeg zoutgehalte in het water zitten voor het goed werkt en dus kan dit systeem niet in elk gebied tot een goede gaswassing komen.

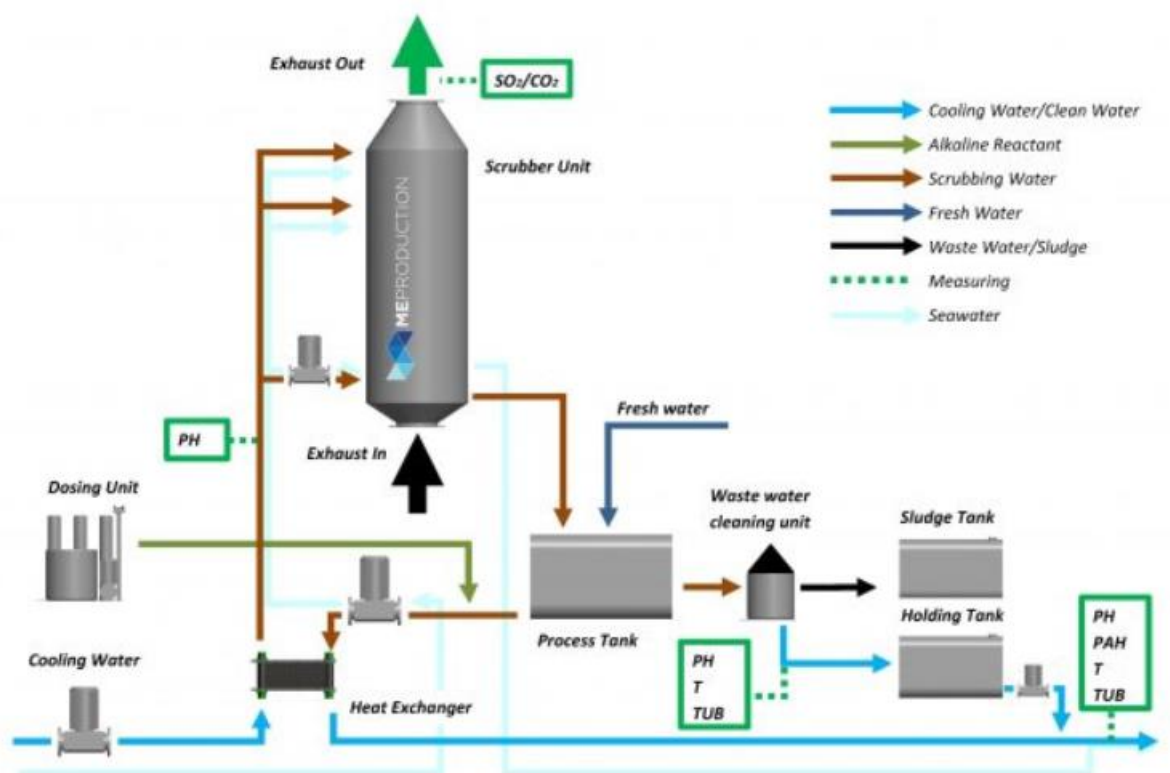
De chemische reacties die hier optreden zijn de volgende:



- Closed loop scrubber.

Maakt gebruik van zoet water en chemicaliën voor het uitspoelen van de zwavel. De SO_x van de uitlaatgassen zal uiteindelijk omgezet zijn in natriumsulfaat, wat schadeloos is. Alvorens het waswater wordt gerecirculeerd in het systeem, wordt het gekuist in een tank. Kleine hoeveelheden waswater worden telkens verwijderd naar opslagtanks. Een gesloten systeem heeft slechts de helft zoveel water nodig als een open systeem maar heeft wel meer tanks nodig. Het waswater wordt proper terug in zee gedumpt in plaats van met het zwavel erin zoals bij de open loop scrubber.

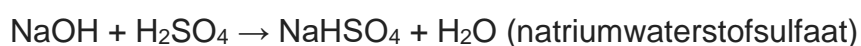
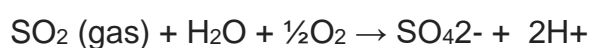
Figuur 18: closed loop scrubber



Bron: ('Closed loop scrubber', z.d.)

In dit systeem wordt fresh water gebruikt, behandeld met chemicaliën. Vaak is dit zwavelhydroxide. Hierdoor wordt de SO_x uit de uitlaatgassen dus omgezet in schadeloze tabletten.

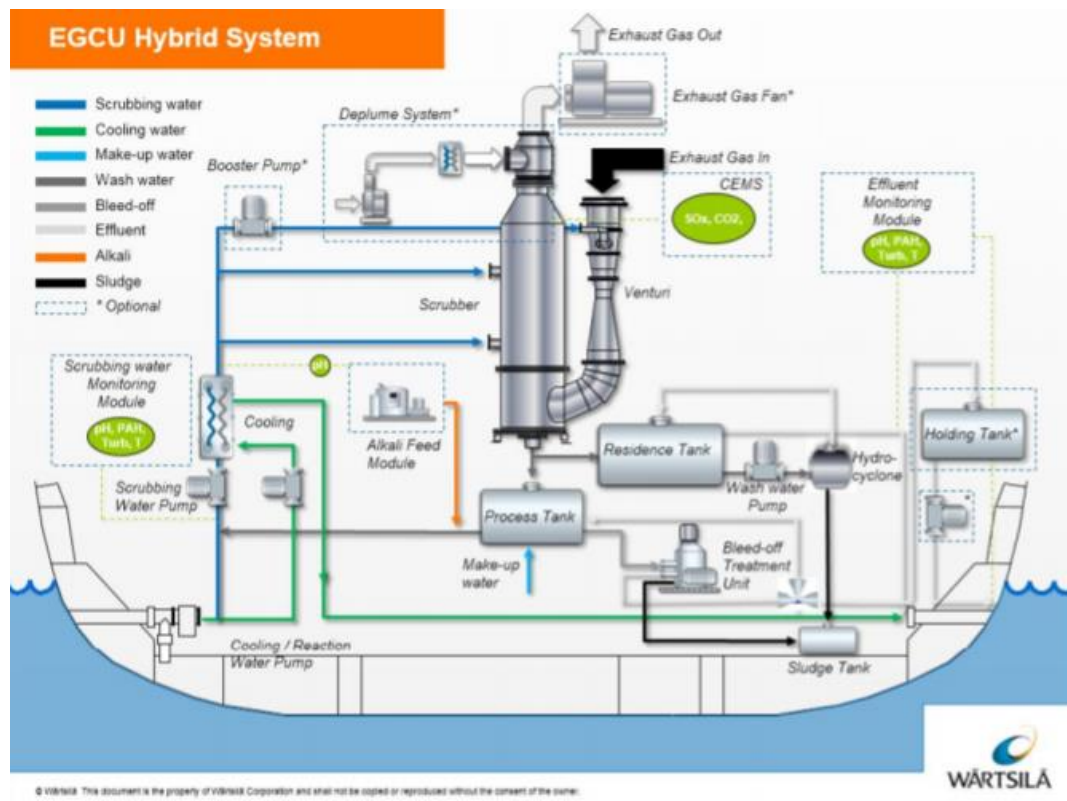
De chemische reacties die hier optreden zijn de volgende:



- Hybride scrubber.

De combinatie van open- en gesloten scrubber systemen. In zee kan ervoor gekozen worden om de open loop te gebruiken maar wanneer men in een ECA komt, kan overgeschakeld worden naar een closed loop. Het neemt meer plaats in maar zo moeten minder kosten gemaakt worden om zoet water te genereren als men in open zee zit.

Figuur 19: hybride scrubber systeem



Bron: ('Low energy and near to zero emissions Ships', z.d.)

Deze systemen bieden de mogelijkheid om zowel in open- als closed loop te werken. Zo kan bij een goede zeewaterkwaliteit gekozen worden voor het open circuit en bij warmere of minder zoute gebieden, de closed loop. Door beide systemen te combineren neemt deze hybride oplossing meer ruimte in beslag en een grotere installatiekost. Dit wordt echter overwonnen door de lagere operatiekost. Het grote voordeel is dat dit systeem overal ter wereld kan gebruikt worden. Ook kunnen deze schepen langer in ECA zones opereren dan schepen met open loop systemen. Aangezien dit systeem op goedkopere HFO kan draaien, is de operatiekost ook vrij laag. Het grote nadeel is de installatie en de ruimte die het systeem inneemt.

- Droge scrubber.

Er wordt geen gebruik gemaakt van water om te scrubben. In deze systemen worden calciumhydroxide pellets gebruikt. Het werkt op zeer hoge temperaturen waardoor soot- en olieresiduen verbrandt worden. Het calcium van de pellets reageert met de zwaveldioxide in de uitlaatgassen en vormt calciumsulfiet. Dit restproduct van de reactie wordt opgeslagen aan boord en aan de wal afgeleverd waar het gebruikt kan worden als meststof of bouw materiaal. Het droge systeem verbruikt minder energie als de natte varianten maar wegen veel meer.

De chemische reacties die hier optreden zijn de volgende:



Het grote voordeel van de droge variant is de efficiënte verwijdering van stikstof- en zwaveloxides. De restproducten komen ook niet in het water terecht. Dit is dan ook meteen het grote nadeel aangezien er meer opslagplaats nodig is aan boord om de restproducten op te slaan.

7.2 ShoreKat

Dit systeem, gemaakt door Clean Air Engineering, is gebaseerd op filters met katalysatoren die tegelijkertijd PM en NO_x kunnen verwijderen. Het is voortgevloeid uit een ouder systeem genaamd Marine exhaust treatment system-1.

Bij dit systeem werd dus de inspiratie gehaald om de GENANO luchtfilters in deze tak van de industrie te introduceren. Voorlopig wordt het ShoreKat project op vrijwillige basis getest en positief bevonden in de haven van Los Angeles.

ShoreKat is een 'dockside vessel emissions capture and treatment system' wat dus wil zeggen dat vaartuigen die aangemeerd liggen, hun emissie opgevangen wordt door dit systeem. Het werkt via walstroom om schepen die om de een of andere reden geen walstroom kunnen nemen en dus hun auxiliary engines moeten laten draaien. Het is dus een emissie opslag systeem.

Uit de huidige tests blijkt dat ShoreKat tot een ton NO_x emissie kan elimineren in een periode van 24 uur.

Aangezien het systeem langs de wal staat op een trailer kan het makkelijk verplaatst worden naar waar het nodig is.

Een trailer brengt de ShoreKat naast het schip. Een kraan heft het naar de uitlaatfunnel, waar het vastgemaakt wordt. Ook CO₂ uitstoot wordt door dit systeem verminderd.

Over hoe het precies werkt is weinig te vinden omdat het nog in ontwikkeling is.

7.3 Dual Fuel

Een andere oplossing om aan de milieuvorschriften rond verminderde uitstoot te voldoen is schepen de mogelijkheid bieden om over te schakelen op gasolie. Deze bevatten bijvoorbeeld veel minder zwavel dan HFO. Bij deze motoren moet de gasolie eerst gekoeld worden om een hogere viscositeit te verkrijgen voor de injectie van de brandstof. Dit is het compleet tegenovergestelde van zware stookolie. Daar moet de brandstof verhit worden zodat ze een lagere viscositeit krijgt.

LNG-motoren zijn hier een praktische toepassing van die op tankers erg nuttig kunnen blijken. De lading die men vervoert kan dan ook als brandstof benut worden. Deze systemen bestaan reeds en worden vaak toegepast. Ook in andere maritieme takken wordt aan deze optie gedacht zoals bijvoorbeeld in de baggerindustrie.

Er zijn tegenwoordig echter al onderzoeken die het voordeel van deze dual fuel engines in perspectief plaatsen.

Zo werd origineel gedacht dat LNG de uitstoot van broeikasgassen zou verminderen met 21% ten opzichte van HFO.

Volgens een onderzoek van Dr. Elizabeth Lindstad, hoofdwetenschapper bij het Norwegian research institute SINTEF Ocean, zouden in de originele berekeningen drie valse veronderstellingen zijn gemaakt.

Moderne raffinage technieken zorgen voor een kwalitatievere HFO, onaangetoonde verschillen in de thermische efficiëntie van motoren die HFO en LNG verbranden en onverbrand methaan van een load range die niet representatief is voor hedendaagse ship operations.

Methaanslip is een probleem dat optreedt bij lage druk motoren. Zoals het woord doet vermoeden is dit een efficiëntieprobleem, alle methaan die ontsnapt naar de uitlaat en niet verbrand is een verlies dat vermeden moet worden.

Een mogelijke oplossing is om in de plaats van lagedruk 2-takt motoren op gas te doen draaien, zoals nu het vaakst gedaan wordt, een 4-takt motor met een hogedruk injectie een oplossing te doen bieden. Woodward is bezig met het ontwikkelen van zo'n soort injectiesysteem.

Een andere oplossing die in onderzoek zit, is het oxideren en opvangen van het methaan via een katalysator voor het in de atmosfeer ontsnapt. Hier moet nog verder onderzoek uitwijzen of dit een goede oplossing zal zijn. Het is namelijk nog niet mogelijk om methaanoxidatie te gebruiken met maritieme motoren.

Dual fuel is dus zeker een weg naar lagere emissies maar zit nog in ontwikkeling.

8 Conclusie

De maritieme industrie heeft lange tijd vrij spel gehad wanneer het aankomt op de uitstoot van broeikasgassen en vervuilende stoffen. De laatste jaren is er reeds veel vooruitgang geboekt. De IMO en nationale besturen leggen rederijen voorschriften op met genoeg tijd om deze te implementeren.

We zijn echter nog lang niet waar we zouden moeten zijn. De reductie van SO_x, NO_x, PM, CO₂ en vele andere schadelijke stoffen uit de verbranding van fossiele brandstoffen zou nog sterk moeten kunnen verminderen. Een overschakeling naar een volledig klimaat neutrale aandrijving van schepen is toekomstmuziek maar door gebruik te maken van EGR, scrubbers, filters en dergelijke meer kunnen we de uitstoot al drastisch aan banden leggen.

Uit de proefmetingen die in deze scriptie werden uitgevoerd blijkt dat het koelen van de uitlaatgassen weldegelijk effect heeft op de meetresultaten. De oorzaak hiervoor zal gezocht moeten worden alvorens conclusies kunnen getrokken worden. Enkel zo kan er feilloos onderzoek gedaan worden naar het effect van de Genano of andere aggregaten op de uitstoot van schadelijke stoffen van de motor.

Om dit tot stand te brengen moet het 'proof of concept' een uitgewerkt systeem worden, zoals de bedoeling was voor Covid-19. De warmtewisselaar is gelast, het elektronisch uitwerken en zelfregelend maken van de watertoevoer moet nog getest en uitgevoerd worden. Eens dit uitgewerkt is kunnen de metingen opnieuw uitgevoerd worden en kunnen we concluderen of dit systeem effectief zijn nut kan bewijzen in het reduceren van emissies op dieselmotoren.

Er moet rekening gehouden worden met het meetbereik van de sensor aangezien we deze net na de motor aan vrij hoge temperaturen blootstellen en net na de koeling zijn deze vrij laag.

Ook dient rekening gehouden te worden met neerslag op de warmtewisselaar van koolstof, stikstof en zwavel door de koeling. Ook zou meting van roetdeeltjes een meerwaarde zijn om het nut van de GENANO aan te tonen.

9 Bibliografie

Aardolie. (2020, 11 maart).*Samenstelling aardolie*. Geraadpleegd 11 maart 2020, van

<https://maken.wikiwijs.nl/60572/Aardolie#!page-1191054>

Aardolie. (z.d.).*Samenstelling aardolie*. Geraadpleegd 11 maart 2020, van

<https://maken.wikiwijs.nl/60572/Aardolie#!page-1191054>

Aardolieraffinage. (2020a, 15 februari).*Aardolieraffinage*. Geraadpleegd 4 maart 2020, a van

https://nl.wikipedia.org/wiki/Aardolieraffinage#Verdere_ontwikkelingen

Aardolieraffinage. (2020b, 15 februari).*Aardolieraffinage*. Geraadpleegd 4 maart 2020, b van

https://nl.wikipedia.org/wiki/Aardolieraffinage#Verdere_ontwikkelingen

Chambers, S. (2019a, 20 mei). Singapore rules scrubber residues are toxic. *Splash*.

Geraadpleegd a van <https://splash247.com/singapore-rules-scrubber-residues-are-toxic/>

Chambers, S. (2019b, 20 mei). Singapore rules scrubber residues are toxic. *Splash*.

Geraadpleegd b van <https://splash247.com/singapore-rules-scrubber-residues-are-toxic/>

Closed loop scrubber. (z.d.). Geraadpleegd van <https://meproduction.com/front-page/marine-scrubbers/closed-loop/>

Condenseren van uitlaatgassen. (2011a, 28 april).*Ecologieforum*. forum, . Geraadpleegd 13

maart 2020, a van <http://www.ecologieforum.eu/viewtopic.php?t=1774&start=15>

Condenseren van uitlaatgassen. (2011b, 28 april).*Ecologieforum*. forum, . Geraadpleegd 13

maart 2020, b van <http://www.ecologieforum.eu/viewtopic.php?t=1774&start=15>

De scheepsmotor. (2020, 20 februari).*Vaarbewijzen.nl*. Geraadpleegd 20 februari 2020, van

https://www.vaarbewijzen.nl/nieuwe_examen_onderwerpen/scheepsmotor/

De scheepsmotor. (z.d.).*Vaarbewijzen.nl*. Geraadpleegd 20 februari 2020, van

https://www.vaarbewijzen.nl/nieuwe_examen_onderwerpen/scheepsmotor/

Dieselproces. (2017, 5 maart).*Wikipedia*. Geraadpleegd van

<https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Dieselproces&oldid=48715172>

EGR. (2020, 13 maart). Geraadpleegd 13 maart 2020, van

<https://www.mvwautotechniek.nl/egr/>

EGR. (z.d.). Geraadpleegd 13 maart 2020, van <https://www.mvwautotechniek.nl/egr/>

Egr-warmtewisselaar. (2020, 14 maart). *Valeo service*. Geraadpleegd 14 maart 2020, van

<https://www.valeoservice.be/be-nl/personenwagens/koeling-en-luchtmanagement/egr-warmtewisselaar-0>

Egr-warmtewisselaar. (z.d.). *Valeo service*. Geraadpleegd 14 maart 2020, van

<https://www.valeoservice.be/be-nl/personenwagens/koeling-en-luchtmanagement/egr-warmtewisselaar-0>

Emission Control Areas (ECAs) designated under MARPOL Annex VI. (z.d.-a). *International*

Maritime Organization. Geraadpleegd a van

[http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Emission-Control-Areas-\(ECAs\)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-\(NOx-emission-control\).aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Emission-Control-Areas-(ECAs)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-(NOx-emission-control).aspx)

Emission Control Areas (ECAs) designated under MARPOL Annex VI. (z.d.-b). *International*

Maritime Organization. Geraadpleegd b van

[http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Emission-Control-Areas-\(ECAs\)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-\(NOx-emission-control\).aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Emission-Control-Areas-(ECAs)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-(NOx-emission-control).aspx)

Figure ***.1 -A typical theoretical P-V diagram of a Diesel engine [13]. (z.d.). *ResearchGate*.

Geraadpleegd 11 juli 2020, van https://www.researchgate.net/figure/Figure-1-A-typical-theoretical-P-V-diagram-of-a-Diesel-engine-13_fig1_312613427

Flipflops. (z.d.). Geraadpleegd van

http://users.skynet.be/lievenco/D_EA/semester2/D_EA2.SS/_files/deel1.pdf

Gaswassers. (2017a, 22 september). *Wikipedia.org*. Geraadpleegd a van

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Gaswasser>

Gaswassers. (2017b, 22 september). *Wikipedia.org*. Geraadpleegd b van

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Gaswasser>

GENANO. (z.d.-a). *Pure Air. Nothing Else*. Geraadpleegd a van <https://www.genano.com/>

GENANO. (z.d.-b). *Pure Air. Nothing Else*. Geraadpleegd b van <https://www.genano.com/>

GENANO310. (z.d.). Geraadpleegd van <https://www.medicalexpo.com/prod/genano-oy/product-68565-936767.html>

H, M. (2017a, 16 maart). Techniek: Zo werken tweetaktmotoren! Geraadpleegd 6 februari 2020, a van <https://www.autoblog.nl/nieuws/techniek-zo-werken-tweetaktmotoren-96866>

H, M. (2017b, 16 maart). Techniek: Zo werken tweetaktmotoren! Geraadpleegd 6 februari 2020, b van <https://www.autoblog.nl/nieuws/techniek-zo-werken-tweetaktmotoren-96866>

How to Build a Simple Thermistor Circuit. (z.d.). Geraadpleegd 15 juli 2020, van

<http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/NTC-thermistor-circuit.php>

<https://www.mvwautotechniek.nl/benzinemotor/>. (2020, 6 februari). *Benzinemotor*.

Geraadpleegd 6 februari 2020, van <https://www.mvwautotechniek.nl/benzinemotor/>

<https://www.mvwautotechniek.nl/benzinemotor/>. (z.d.). *Benzinemotor*. Geraadpleegd 6 februari 2020, van <https://www.mvwautotechniek.nl/benzinemotor/>

IMO Marine Engine Regulations. (2020a februari). *Dieselnet*. Geraadpleegd a van

<https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php#nox>

IMO Marine Engine Regulations. (2020b februari). *Dieselnet*. Geraadpleegd b van

<https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php#nox>

International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). (z.d.-

a). *International Maritime Organization*. Geraadpleegd a van

[http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)

International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). (z.d.-

b). *International Maritime Organization*. Geraadpleegd b van

[http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)

Koolwaterstof. (2019a, 9 september). Geraadpleegd 13 maart 2020, a van

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Koolwaterstof>

Koolwaterstof. (2019b, 9 september). Geraadpleegd 13 maart 2020, b van

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Koolwaterstof>

Lafayette Proctor, C., & Van Horn Armstrong, L. (2020a, 6 februari). Diesel engine.

Britannica. Geraadpleegd a van <https://www.britannica.com/technology/diesel-engine>

Lafayette Proctor, C., & Van Horn Armstrong, L. (2020b, 6 februari). Diesel engine.

Britannica. Geraadpleegd b van <https://www.britannica.com/technology/diesel-engine>

Low energy and near to zero emissions Ships. (z.d.). Damen Shipyards. Geraadpleegd van

file:///C:/Users/Ilan/Downloads/Attachment_0.pdf

Marshall, B. (2020, 6 februari). How Diesel Two-Stroke Engines Work. *Howstuffworks*.

Geraadpleegd 6 februari 2020, van <https://auto.howstuffworks.com/diesel-two-stroke1.htm>

Marshall, B. (z.d.). How Diesel Two-Stroke Engines Work. *Howstuffworks*. Geraadpleegd 6

februari 2020, van <https://auto.howstuffworks.com/diesel-two-stroke1.htm>

Neyts, D., Maes, F., Merckx, J.-P., & Pirlet, H. (z.d.-a). Maritiem transport, scheepvaart en

havens. UGent. Geraadpleegd van

<https://biblio.ugent.be/publication/7026214/file/7026215.pdf>

Neyts, D., Maes, F., Merckx, J.-P., & Pirlet, H. (z.d.-b). Maritiem transport, scheepvaart en

havens. UGent. Geraadpleegd van

<https://biblio.ugent.be/publication/7026214/file/7026215.pdf>

Nirendra N., M., Raine, R. R., & Verhelst, S. (2013a juli). Combustion and emissions characteristics of a dual fuel engine operated on alternative gaseous fuels. Elsevier.
Geraadpleegd van
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113001956>

Nirendra N., M., Raine, R. R., & Verhelst, S. (2013b juli). Combustion and emissions characteristics of a dual fuel engine operated on alternative gaseous fuels. Elsevier.
Geraadpleegd van
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113001956>

Nitrogen Oxides (NO_x)—Regulation 13. (z.d.-a). *International Maritime Organization*.
Geraadpleegd a van
[http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)

Nitrogen Oxides (NO_x)—Regulation 13. (z.d.-b). *International Maritime Organization*.
Geraadpleegd b van
[http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)

One Corporation to Pollute Them All. (2019a juni). Geraadpleegd van
https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/One%20Corporation%20to%20Pollute%20Them%20All_English.pdf

One Corporation to Pollute Them All. (2019b juni). Geraadpleegd van
https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/One%20Corporation%20to%20Pollute%20Them%20All_English.pdf

Op-amp Comparator and the Op-amp Comparator Circuit. (2015, 25 mei). *Basic Electronics Tutorials*. Geraadpleegd van <https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/op-amp-comparator.html>

Open loop scrubber system. (z.d.-a). *VDL AEC Maritime*. Geraadpleegd a van

<https://www.vdlaecmaritime.com/scrubbers/open-loop-scrubbers>

Open loop scrubber system. (z.d.-b). *VDL AEC Maritime*. Geraadpleegd b van

<https://www.vdlaecmaritime.com/scrubbers/open-loop-scrubbers>

Open-loop scrubber system. (z.d.). Geraadpleegd van

https://www.dieselmaringroup.com/2020_sulphur_cap/open-loop-scrubber-system/

Pacific Basin Shipping Limited. (z.d.-a). *Linkedin*. Geraadpleegd a van

<https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:6541863477512888321>

Pacific Basin Shipping Limited. (z.d.-b). *Linkedin*. Geraadpleegd b van

<https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:6541863477512888321>

Prevention of Air Pollution from Ships. (z.d.-a). *International Maritime Organization*.

Geraadpleegd a van

<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx>

Prevention of Air Pollution from Ships. (z.d.-b). *International Maritime Organization*.

Geraadpleegd b van

<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx>

Rekkib. (2007a, 8 mei). Uitlaatgasnabehandeling. slideshare, . Geraadpleegd a van

<https://www.slideshare.net/rekkib/uitlaatgas-emissie-diesel-b>

Rekkib. (2007b, 8 mei). Uitlaatgasnabehandeling. slideshare, . Geraadpleegd b van

<https://www.slideshare.net/rekkib/uitlaatgas-emissie-diesel-b>

Scrubber. (z.d.-a). *Berger Maritiem*. Geraadpleegd a van

<http://www.bergermaritiem.nl/scrubber>

Scrubber. (z.d.-b). *Berger Maritiem*. Geraadpleegd b van

<http://www.bergermaritiem.nl/scrubber>

Scrubbers. (z.d.-a). *GEA*. Geraadpleegd a van <https://www.gea.com/nl/products/emission-control/gas-scrubbers/index.jsp>

Scrubbers. (z.d.-b). *GEA*. Geraadpleegd b van <https://www.gea.com/nl/products/emission-control/gas-scrubbers/index.jsp>

Sequential Logic Circuits. (z.d.-a). *ElectronicsTutorials*. Geraadpleegd a van https://www.electronics-tutorials.ws/sequential/seq_1.html

Sequential Logic Circuits. (z.d.-b). *ElectronicsTutorials*. Geraadpleegd b van https://www.electronics-tutorials.ws/sequential/seq_1.html

Sethi, S. (2020a, 17 maart). A Guide To Scrubber System On Ship. *Marineinsight*.
Geraadpleegd a van <https://www.marineinsight.com/tech/scrubber-system-on-ship/>

Sethi, S. (2020b, 17 maart). A Guide To Scrubber System On Ship. *Marineinsight*.
Geraadpleegd b van <https://www.marineinsight.com/tech/scrubber-system-on-ship/>

Shell. (2020, 11 maart). Dieselbrandstof. *Dieselbrandstof*. Geraadpleegd 11 maart 2020, van <https://www.shell.nl/consumenten/shell-fuels/diesel.html>

Shell. (z.d.). Dieselbrandstof. *Dieselbrandstof*. Geraadpleegd 11 maart 2020, van <https://www.shell.nl/consumenten/shell-fuels/diesel.html>

Stofidentificatienummer. (2020a, 10 maart). Geraadpleegd 11 maart 2020, a van <https://nl.wikipedia.org/wiki/Stofidentificatienummer>

Stofidentificatienummer. (2020b, 10 maart). Geraadpleegd 11 maart 2020, b van <https://nl.wikipedia.org/wiki/Stofidentificatienummer>

Sulphur oxides (SOx) and Particulate Matter (PM)—Regulation 14. (z.d.-a). *International Maritime Organization*. Geraadpleegd a van [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx)

Sulphur oxides (SOx) and Particulate Matter (PM)—Regulation 14. (z.d.-b). *International Maritime Organization*. Geraadpleegd b van

[http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93Regulation-14.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93Regulation-14.aspx)

Temperature Sensors. (z.d.-a).*ElectronicsTutorials*. Geraadpleegd a van

https://www.electronics-tutorials.ws/io/io_3.html

Temperature Sensors. (z.d.-b).*ElectronicsTutorials*. Geraadpleegd b van

https://www.electronics-tutorials.ws/io/io_3.html

The marine diesel prime mover. - The four stroke plant. (z.d.). Geraadpleegd 6 juni 2020, van

http://www.dieselduck.info/machine/01%20prime%20movers/diesel_engine/diesel_engine.02.htm

The marine diesel prime mover. - The two stroke plant. (z.d.). Geraadpleegd 6 juni 2020, van

http://www.dieselduck.info/machine/01%20prime%20movers/diesel_engine/diesel_engine.01.htm

Thermistors. (z.d.-a).*ElectronicsTutorials*. Geraadpleegd a van [https://www.electronics-](https://www.electronics-tutorials.ws/io/thermistors.html)

[tutorials.ws/io/thermistors.html](https://www.electronics-tutorials.ws/io/thermistors.html)

Thermistors. (z.d.-b).*ElectronicsTutorials*. Geraadpleegd b van [https://www.electronics-](https://www.electronics-tutorials.ws/io/thermistors.html)

[tutorials.ws/io/thermistors.html](https://www.electronics-tutorials.ws/io/thermistors.html)

Thermokoppel principe. (z.d.-a).*Deltaohm*. Geraadpleegd a van

<https://www.deltaohm.nl/home/thermokoppel-principe>

Thermokoppel principe. (z.d.-b).*Deltaohm*. Geraadpleegd b van

<https://www.deltaohm.nl/home/thermokoppel-principe>

Toggle flip-flops. (z.d.). Geraadpleegd 17 juni 2020, van

<http://www.tpub.com/neets/book13/55d.htm>

Tweetaktmotor. (2020a, 12 mei).*Wikipedia.org*. Geraadpleegd 6 februari 2020, a van

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Tweetaktmotor>

Tweetaktmotor. (2020b, 12 mei).*Wikipedia.org*. Geraadpleegd 6 februari 2020, b van

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Tweetaktmotor>

Vandevorde, J.-L. (2018a, 31 juli). Steeds meer scrubbers in strijd tegen zwaveluitstoot.

Flows. Geraadpleegd a van <https://www.flows.be/nl/shipping/steeds-meer-scrubbers-strijd-tegen-zwaveluitstoot>

Vandevorde, J.-L. (2018b, 31 juli). Steeds meer scrubbers in strijd tegen zwaveluitstoot.

Flows. Geraadpleegd b van <https://www.flows.be/nl/shipping/steeds-meer-scrubbers-strijd-tegen-zwaveluitstoot>

Warmtewisselaars voor systemen aan boord. (z.d.-a). *Kelvion*. Geraadpleegd a van

<https://www.kelvion.com/nl/industries/market/systemen-aan-boord-van-schepen/>

Warmtewisselaars voor systemen aan boord. (z.d.-b). *Kelvion*. Geraadpleegd b van

<https://www.kelvion.com/nl/industries/market/systemen-aan-boord-van-schepen/>

What is a 3-way Solenoid Valve ? (2017, 29 juli). *Instrumentation Tools*. Geraadpleegd van

<https://instrumentationtools.com/3-way-solenoid-valve/>

Working of the Two-Stroke Engine with P-V Diagram. (z.d.). *Mecholic*. Geraadpleegd 11 juli

2020, van <https://www.mecholic.com/2016/02/working-of-two-stroke-engine-with-pv-diagram.html>