



INDUSTRIËLE WETENSCHAPPEN

Warmte Kracht Koppeling (WKK)

Leerling(en) :
Ward Debruyne
Dieter Sys
Frederik Vandorpe

Mentor:
De Laere Miranda

2003 - 2004
VTI Torhout Sint-Aloysius | Papebrugstraat 8a, 8820 Torhout
Telefoon: 050 23 15 15 | Fax: 050 23 15 25
E-mail: vti@sint-rembert.be | Site: <http://vtiweb.sint-rembert.be/>
Site GIP'S 6IW: www.gip6iw.be

Woord vooraf

Wij bespreken in onze geïntegreerde proef de warmtekrachtkoppeling. We hebben dit onderwerp gekozen, omdat we vooral geïnteresseerd zijn in motoren. Door PIH Kortrijk zijn we bij de warmtekrachtkoppeling beland.

Ons werk is een theoretische verhandeling met een praktische kant. In het eerste semester beperken we ons tot het bekijken van de theoretische kant van een warmtekrachtkoppeling. Hierbij leggen we uit wat een warmtekrachtkoppeling is, haar toepassingen, voordelen, nadelen ...

Een warmtekrachtkoppeling is een gasmotor die via een alternator elektriciteit maakt en waarbij we de warmte ook gebruiken. Bij een warmtekrachtkoppeling kan het rendement oplopen tot 96 %.

In het tweede semester gaan we over tot enkele berekeningen, meer bepaald rendementsberekeningen (bvb. welk rendement haalt de warmtekrachtkoppeling in het PIH in Kortrijk?). We onderzoeken ook de theorie van warmtewisselaars met oefeningen en we berekenen de uitlaatgassen ... Tot slot hebben we geprobeerd om het principe van een WKK-installatie voor te stellen d.m.v. een didactische stand. Hierbij hebben we enkele temperatuurmetingen uitgevoerd en berekeningen op warmtewisselaars gemaakt.

De geïntegreerde proef hebben wij steeds aanzien als een kans die om iets wetenschappelijks te bestuderen zoals men het op de industriële markt zou aanpakken. Maar we hebben natuurlijk geen ervaring genoeg om dit op eigen houtje te doen. Hierbij hebben we zeer veel steun gehad aan bepaalde personen. Daarom maken we in ons werk graag plaats om deze mensen te bedanken. We vermelden mevrouw Miranda De Laere, onze mentor en de lezer van de G.I.P. op technisch vlak. Zij stond altijd paraat toen we vragen hadden en heeft gedurende heel het jaar zich hard ingezet voor ons werk. Daarnaast willen we ook nog de heer Luc Boone bedanken voor zijn medewerking aan de praktische realisatie. Hij heeft namelijk in spoedtempo een motor voor ons op statief gezet. Ook onze medewerkers uit het PIH te Kortrijk verdienen een dankwoord voor hun inzet i.v.m. rendementsberekeningen, uitlaatgassen en geluid. We danken natuurlijk ook mevrouw Sabine Deprez, die geheel onze geïntegreerde proef heeft verbeterd op taalkundig gebied. Tenslotte verdienen ook onze ouders een pluimpje: zij hebben ons achter de schermen bijgestaan in ieder moeilijk moment.

Avant-propos

Nous parlons du couplément de force dans notre essai intégré. Nous avons choisi ce sujet parce que nous sommes surtout intéressés aux moteurs. Par PIH, Courtrai nous avons en contact couplément de force. Notre travail est aussi une dissertation théorique avec un côté pratique.

Dans le premier semestre, nous limitons étude examiner au côté théorique d'un couplément de force. Nous expliquons ce qui est un couplément de force, les applications, les avantages, les inconvénients et l'environnement. Un couplément de force est un moteur de gaz qui fait l'électricité et avec lequel nous utilisons aussi la chaleur. Dans un couplément de force, le rendement peut monter jusqu'à 96 %.

Dans le deuxième semestre, nous allons prendre au sujet quelques calculs, le rendement calculs (par exemple quel rendement obtient le couplément de force dans le PIH à Courtrai.) Nous examinons aussi la théorie des échangeurs avec les exercices éventuels et nous calculons l'échappement du gaz.

Finalement nous essaierons encore de réaliser notre couplément de force pratique. Nous appliquerons un moteur et emploierons un **alternateur** suscitant de l'électricité. Nous laissons couler les gaz d'échappement par un échangeur pour utiliser cette chaleur aussi utile que possible. Cette réalisation pratique est pourtant destinée à montrer le principe et un pas pour faire un véritable spectacle d'un couplément de force.

Preface

In our integrated essay we discuss the thermal energy clutch, because we are very interested in engines. A thermal energy clutch is a gas- engine that supplies electricity on the basis of an alternator. Here we actually use the warmth. With the thermal energy clutch the return can rise up to 96 %.

Courtrai PIH led us to the subject of the thermal energy clutch. This paper is theoretical with a practical side.

In the first term we restrict ourselves to the theoretical side of the thermal energy clutch: we expound the term thermal energy clutch and we explain its applications, advantages, disadvantages and surroundings.

In the second term we pass on to some calculations regarding the return. We explore for example the efficiency of the thermal energy clutch at the PIH in Courtrai. Furthermore we examine the theory of (heath-exchanging), we do exercises, we calculate the exhaust-gases, ...

Finally we will try to practise this thermal energy clutch. In this case we will use a generator to generate electricity and we will make exhaust-gases streams through the heath-exchanging in order to use the warmth in a most useful way. This practical execution is strictly speaking a way to outline the core principle, we do not have the intention to make a perfect representation of a thermal energy clutch.

Inhoudstafel

Woord vooraf	2
Avant-propos	3
Preface ..	4
Inhoudstafel	5
1 Algemeen	7
1.1 Wat is WKK?	7
1.2 Voor- en nadelen van warmtekrachtkoppeling	10
2 Beschikbare technologieën	11
2.1 Motoren	11
2.2 Gasturbines.....	13
2.3 Stoomturbines	14
2.4 STEG-centrales	17
2.5 Stirlingmotor	18
2.5.1 Opbouw van de stirlingmotor	18
2.5.2 De regenerator	19
2.6 Brandstofcellen	23
3 Haalbaarheidsstudie van WKK	26
3.1 De analyse van de energievraag	27
3.1.1 De energievraagpatronen van het totale bedrijf	28
3.1.2 De voor warmte/kracht benodigde energievraagpatronen	28
3.1.3 De jaarbelastingsduurcurve	29
3.2 De technische dimensionering van de WKK	29
3.3 De rendabiliteitsberekening	33
3.3.1 In eigen beheer: het bedrijf financiert en gebruikt de WKK zelf	35
3.3.2 Met medewerking van een derde investeerder.....	35
3.3.2.1 Koppeling met het openbare elektriciteitsnet.....	35
3.3.2.2 Brandstofprijzen	36
3.3.2.3	
3.4 Sensitiviteitsanalyse	36
4 Warmtekrachtkoppeling in Vlaanderen	37
4.1 WKK met motoren en turbines in Vlaanderen.....	38
4.1.1 WKK met motoren	38
4.1.1.1 Evolutie van het opgestelde WKK-vermogen	38
4.1.1.2 Verdeling WKK-vermogen per sector	39
4.1.1.3 Evolutie van de eenheidsgrootte van WKK-installaties	39
4.1.1.4 Verdeling WKK-vermogen per brandstof.....	40
4.1.1.5 Verdeling van het WKK-vermogen per beheersvorm	42
4.1.2 WKK met turbines	43
4.2 Besluit	44

5	Vergunningen en subsidies	45
5.1	Vergunningen	45
5.2	Subsidies	45
6	Rendementsberekeningen	48
6.1	Algemeen	48
6.2	Toepassing op rendement.....	49
6.3	De verbrandingswaarde.....	49
6.4	De algemene gaswet.....	50
6.5	Bepalen van verbrandingswaarde uit factuur leverancier	51
6.6	Bepalen van V_0	51
6.7	Bepalen van de toegevoerde warmte	51
6.8	Bepalen van het elektrische rendement.....	52
6.9	Bepalen van het thermisch rendement	52
6.10	Berekenen van het totale rendement	52
6.11	Rendementsberekening bij een lagere temperatuur in de leidingen	52
7	Uitlaatgassen.....	54
7.1	Schoorsteenverliezen.....	54
7.2	Brandstofsamenstelling	56
7.3	Bepalen van de stochiometrische luchtmassa SLM.....	57
7.4	Bepalen van de rookgassen	59
7.5	Warmteverliezen	62
7.6	Emissiewaarden : volgens waarden VLAREM → TA lucht.....	63
8	Geluid	65
8.1	Wat is geluid?.....	65
8.2	Voortplantingssnelheid van het geluid.....	65
8.2.1	Voortplantingssnelheid in vloeistoffen	65
8.2.2	Voortplantingssnelheid in vaste stoffen.....	66
8.2.3	Voortplantingssnelheid in vaste stoffen.....	66
8.3	Toonsterkte, intensiteit van een toon	66
8.4	Geluidsnormen voor een WKK-installatie.....	67
9	Bijlagen.....	69
10	Bronnen	78
11	Besluit	80
12	Logboek.....	81

1 Algemeen

1.1 Wat is WKK?

Bij een warmtekrachtkoppeling worden warmte en kracht (elektriciteit) tegelijkertijd opgewekt bij de gebruiker en is het de bedoeling dat beide nuttig gebruikt worden. Daarmee worden de verliezen voor transport van warmte en elektriciteit vrijwel tot nul herleid.

De energie-opwekker is een thermische motor. Dit kan zowel een gas- als een dieselmotor zijn. Een voordeel van een gasmotor is dat er rechtstreeks een generator gekoppeld wordt voor het leveren van stroom aan de gebruiker of eventueel voor teruglevering aan het net. De energie aan de uitgaande as van de gasmotor wordt gebruikt om elektriciteit op te wekken. Anderzijds zal de motor ten gevolge van deze mechanische belasting warmte afgeven aan het koelwater, aan de smeerolie, aan de tussenkoeler voor de turbocompressor en aan de atmosfeer via stralingswarmte en via de uitlaatgassen. Deze warmte wordt voor een zo groot mogelijk deel gerecupereerd met warmtewisselaars die aangesloten zijn op het net van de gebruiker.

Men spreekt dus van een warmtekrachtkoppeling, omdat de installatie zowel warmte als kracht levert. De belangrijkste troeven van deze energieopwekking bestaan erin dat het rendement van de installatie zeer hoog wordt door de recuperatie van de warmte die in de verbrandingsmotor vrijkomt. Deze manier van werken is minder belastend voor het milieu.

Een gelijktijdige opwekking van warmte en elektriciteit met dezelfde energie heeft ontegensprekelijk een stap voor op het afzonderlijk produceren van warmte en elektriciteit: hoe lager het energieverbruik, hoe minder het milieu belast wordt. Het rendement van een warmtekrachtkoppeling kan in de betere toepassingen makkelijk oplopen tot meer dan 95 %, het energieverlies wordt tot een absoluut minimum herleid terwijl elektriciteitscentrales een rendement hebben van 45 %. Een groot deel van de energie verdwijnt via het koelwater in rivieren, de zee of door middel van koeltorens in de lucht. Gemiddeld gaat zo zelfs meer dan de helft van de verbruikte energie verloren. In de modernste centrales, die aardgas verstoken in gasturbines, is het verlies nog altijd 45 %.

In kolengestookte centrales zijn de verliezen beduidend hoger en zijn bovendien de emissies van broeikasgassen en verzurende stoffen per opgewekt kWh elektriciteit hoger dan bij aardgas. In een aantal gevallen heeft men dit verlies gedeeltelijk opgevangen door het koelwater via leidingen naar gebouwen of lokalen te brengen, de zogenaamde stadsverwarming. Omdat nu het koelwater een hogere temperatuur moet hebben, daalt het rendement voor elektriciteitsproductie. Bovendien gaat er warmte verloren in de lange leidingen en wordt lang niet alle warmte gebruikt. Daarom is een warmtekrachtkoppeling een zeer goed alternatief. Een WKK is niet

voor iedereen interessant. Op dit moment is warmtekrachtkoppeling voorlopig nog voorbehouden voor grote energieverbruikers.

Indien de elektriciteitsvraag van het bedrijf hoger is dan de elektriciteitsproductie van een warmtekrachtkoppelinginstallatie, dan wordt elektriciteit aangekocht van het openbare net. Als de elektriciteitsproductie van de warmtekrachtkoppelinginstallatie hoger dan de elektriciteitsvraag is, kan elektriciteit aan het openbare net verkocht worden.

Het is technisch mogelijk om een warmtekrachtkoppeling te installeren die niet aan het openbare elektriciteitsnet is gekoppeld, men spreekt dan van een “eilandbedrijf”. Eilandbedrijven komen weinig voor, omdat in dat geval de warmtekrachtkoppelinginstallatie op het te verwachten elektrisch piekvermogen gedimensioneerd geleverde elektriciteit meer variëren dan bij gescheiden opwekking. Bovendien treden er problemen op als de warmtekrachtinstallatie buiten dienst raakt: men zal ofwel moeten accepteren dat men gedurende een aantal uren per jaar zonder elektriciteit valt of men zal een (dure) noodstroomvoorziening moeten voorzien. In de meeste gevallen zal men bij toepassing van warmtekrachtkoppeling dan ook aan het openbare elektriciteitsnet gekoppeld blijven; men spreekt dan van een “parallelbedrijf”.

Er zijn twee grote groepen van warmtekrachtkoppeling: de ene werkt met motoren en de andere met turbines. Wij gaan ons voornamelijk bezighouden met warmtekrachtkoppeling met motoren.

Tot de warmtekrachtkoppeling met motoren behoren de diesel- en gasmotoren. De elektriciteit zal ontstaan door de motorwerking over te dragen op een generator die voor de elektriciteit zorgt. De warmte is voor hoge temperaturen afkomstig van de uitlaatgassen en voor lage temperaturen afkomstig van het koelwater en de smering. Door deze grote verscheidenheid in temperatuur zullen motoren voor verschillende toepassingen gebruikt worden.

Bij warmtekrachtkoppeling met turbines kan deze groep onderverdeeld worden in warmtekrachtkoppeling met gasturbine, stoomturbine of een combinatie van beide: STEG. De werking van de gas- en stoomturbine is analoog. Bij de gasturbine wordt de lucht aangezogen, vervolgens verbrand in de verbrandingskamer om daarna te expanderen in de turbine. Bij een stoomturbine wordt water omgezet in stoom in een ketel en daarna geëxpandeerd in de turbine. Bij zowel de gas- als de stoomturbine zal de mechanische energie van de turbine omgezet worden in elektriciteit via een generator. Bij een stoomturbine is de warmte afkomstig van de stoom eveneens na de turbine.

Op de volgende pagina zien we op Fig. 1.1 wat er gebeurt met de energie, waar er verliezen plaatsvinden en waaruit bruikbare energie ontstaat.

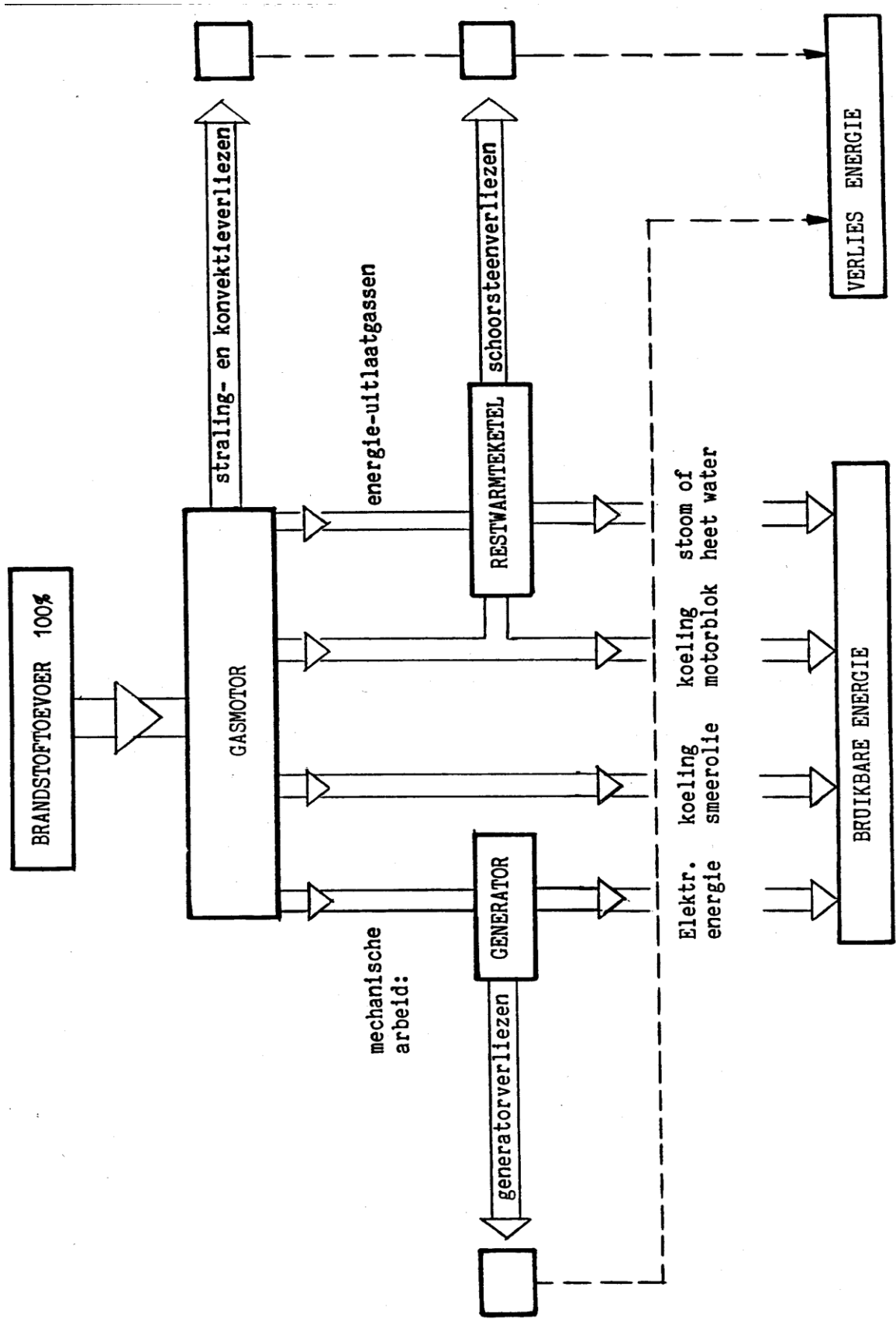


Fig. 1.1: Energieschema

1.2 Voor- en nadelen van warmtekrachtkoppeling

Enkele voordelen van warmtekrachtkoppeling:

- Er gaat weinig warmte verloren omdat, het transport van de warmte beperkt blijft. Daardoor verhoogt het rendement.
- De elektriciteit afkomstig uit een warmtekrachtinstallatie kan men direct zelf gebruiken en die blijft vrijgesteld van de energiebelasting.
- Een WKK is goed voor het milieu en uw imago, want met deze installatie haal je er alle energie uit die erin zit: er is dus bijna geen verlies en daarom ook weinig vervuiling aan het milieu.
- Het is wel een grote investering, maar na verloop van tijd zal er een besparing op uw eigen energiekosten zijn. Voor tuinbouwers is warmte zeer duur, dus is het voor hen een zeer interessant alternatief.
- De WKK-installatie is uit te voeren als noodstroomvoorziening indien er ergens een stroomonderbreking is. Hierdoor beschikt men onmiddellijk over elektriciteit. Dit is vooral een voordeel in een ziekenhuis.
- Er is minder brandstofverbruik voor de opwekking van elektriciteit en warmte. Naast een aanzienlijke energiebesparing is ook het milieu erbij gebaat. Daardoor is er minder zure regen en minder broeikaseffect en daar willen we met zijn allen naar toe.
- Warmtekrachtkoppeling leidt tot een aanzienlijke besparing van onze primaire energiebronnen. Door verbetering van het rendement van de verbranding van aardgas wordt tevens de uitstoot van milieuvervuilende gassen verminderd.
- Het rendement is bijna maximaal (tot meer dan 93 %), dus is er maar zeer weinig verlies bij een warmtekrachtkoppeling.

Nadelen van een warmtekrachtkoppeling:

- Een nadeel van warmtekrachtkoppeling met inwendige verbrandingsmotor is de relatief trage opwarming van de motor. Alhoewel de motor elektrisch vrij snel tot vollast komt, duurt de opwarming vanuit koude start behoorlijk lang (vergelijkbaar met de verwarming van een auto in de winter). Voor sommige toepassingen, zoals sanitair warm water, is dit onaanvaardbaar.
- De directe koppeling van de motor met aan warmtevraag (bijvoorbeeld via een thermostaat voor verwarming) wordt afgeraden. Hierdoor zou de motor immers dikwijls voor kortere perioden aan- en uitschakelen.
- De prijs van warmtekrachtkoppeling met inwendige verbrandingsmotor ligt nog vrij hoog door de beperkte verspreiding. Wellicht zal deze prijs afnemen bij grotere oplagen.
- Een warmtekrachtkoppeling heeft het hoogste rendement bij vollast. Bij eilandbedrijven is dat een groot nadeel. De warmtekrachtkoppeling zal maar enkele uren per dag op vollast moeten werken. Als de warmtekrachtkoppeling niet op vollast werkt, is het rendement veel lager. Daardoor is er een verlies van energie en dat willen we vermijden.

2 Beschikbare technologieën

In principe kan WKK toegepast worden bij elke technologie die zowel kracht (elektriciteit) als warmte produceert. In de praktijk zijn de meest voorkomende technologieën de zuigermotor (vooral gas- en dieselmotoren) en de gasturbine. Stoomturbines worden vandaag minder vaak gebruikt. Andere technologieën zoals brandstofcellen en de stirlingmotor bevinden zich momenteel nog in een aanvangsfase.

Warmtekrachtkoppelingen worden gekenmerkt door het type brandstof die ze gebruiken, het soort verbrandingsproces, hun arbeidsrendement, de hoeveelheid en de temperatuur van de recupereerbare warmte.

2.1 Motoren

In een warmtekrachtkoppeling gebruikt men verschillende soorten van motoren:

- dieselmotoren voor grotere vermogens (gaande van 100 kW tot 60MW).
- gasmotoren (een licht gewijzigde versie van benzinemotoren) voor kleinere vermogens (gaande van 5 kW tot 4MW).

Maar de meeste diesel- en gasmotoren voor WKK-toepassing situeren zich tussen de 200 kW en de 2MW.

Een typisch schema voor motorgedreven WKK wordt weergegeven in fig. 2.1

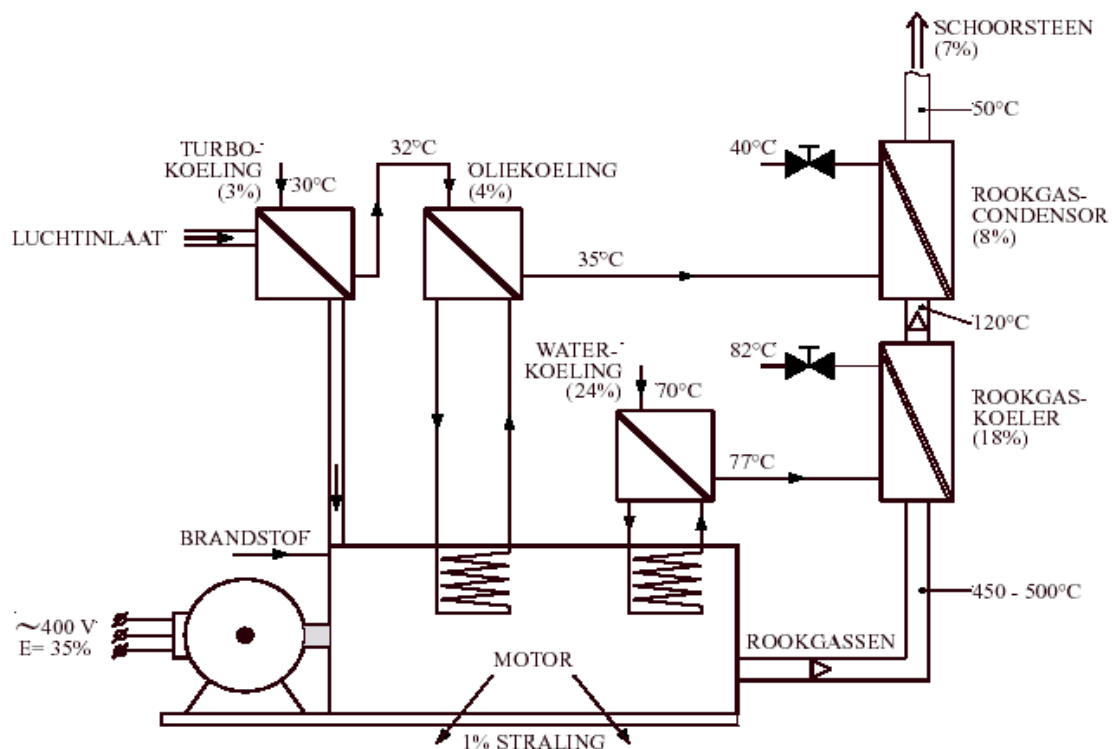


Fig. 2.1: Motortoepassing voor WKK

Na recuperatie van de warmte is de uitgangstemperatuur van de rookgassen veranderd van 450 – 500 °C tot 50 °C. Die is gedaald door middel van lucht- en waterkoeling. De lucht is opgewarmd van buitentemperatuur naar ongeveer 40 °C en het koelwater van 70 °C naar 82 °C. Hieruit kunnen we besluiten dat de hoeveelheid opwarmen van lucht en water sterk afhankelijk is van de temperatuur van de rookgassen. Wanneer de temperatuur aan het doeleinde meer dan 150 °C moet zijn, kan men beter enkel de warmte recupereren uit de rookgassen, want het recupereerbare vermogen van de motor is te beperkt.

Een belangrijke karakteristiek van een WKK-installatie is de zogenaamde warmte/kracht-verhouding voor een gekozen werkingspunt. Dit is de verhouding tussen het beschikbare warmtevermogen en het elektrische vermogen. Bij een retourtemperatuur van 70 °C is de warmte/kracht-verhouding van kleinere gasmotoren (< 1 MW) van de orde van $\pm 1,5 : 1$. Voor de grotere gasmotoren heeft men eerder $1 : 1$ à $3 : 1$. Bij retourtemperaturen van 90 °C is de verhouding voor gasmotoren $0,5 : 1$ à $1 : 1$.

Bij dieselmotoren mag men de uitlaatgassen niet te ver afkoelen om condensatie in de zwavelhoudende rookgassen en dus corrosie te vermijden. De typische warmte/kracht-verhouding voor dieselmotoren is van de orde van $1 : 1$ à $1,2 : 1$.

De deellastkarakteristieken van zuigermotoren zijn heel wat voordeliger dan die van gasturbines. Beide motoren hebben nog een behoorlijk rendement als ze op halve krachten werken. Het rendement voor elektriciteitsproductie in een gasmotor daalt dan niet onder de 80 % van zijn waarde bij vollast, bij een dieselmotor blijft dit zelfs tot boven de 90 % van de vollastwaarde.

We bekijken het gebruik van dit motorensysteem ook eens voor kleinere toepassingen. Het belangrijkste voordeel van het gebruik van inwendige verbrandingsmotoren voor WKK is de grote beschikbaarheid en de grote markt van diverse vermogens. Voor WKK van orde grootte 5 kW tot 10 kW kunnen motoren gebruikt worden die gelijkaardig zijn aan die van grasmaaiers en kleine motorfietsen. Een belangrijk nadeel van WKK met inwendige verbrandingsmotoren is de relatief trage opwarming van de motor. Dit is in sommige toepassingen onaanvaardbaar.

Fig. 2.2 geeft de energiebalans van de klassieke verbrandingsmotor en de WKK-toepassing schematisch weer.

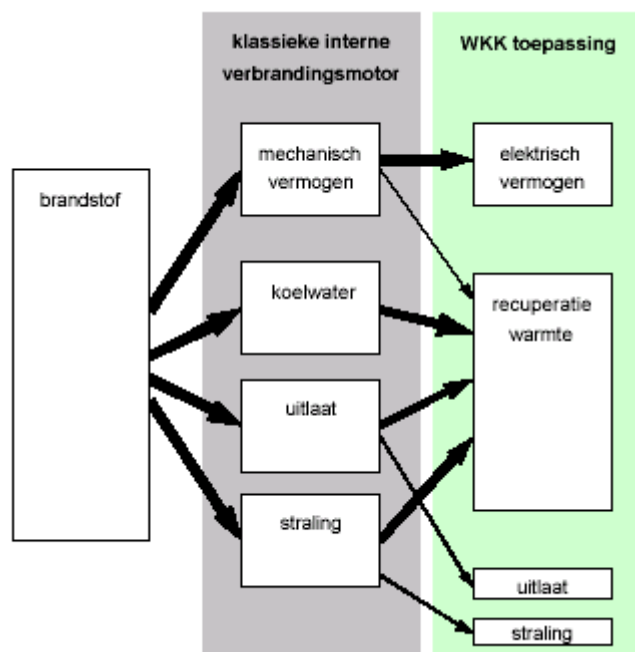


Fig. 2.2: Energiebalans klassieke inwendige verbrandingsmotor en WKK-toepassing

2.2 Gasturbines

De gasturbines die gebruikt worden voor WKK-toepassingen, zijn van het type met eenvoudige cyclus zonder energierecuperatie van de warmte. Dit heeft als voordeel dat de gasturbine minder ingewikkeld is. Bijkomend voordeel voor WKK-toepassing is dat de recupereerbare warmte in de uitlaatgassen van hogere kwaliteit is.

Turbines voor WKK zijn momenteel verkrijgbaar van 100 kW tot ongeveer 250 MW. Het hedendaagse gebruik van gasturbines situeert zich voornamelijk tussen de 1 en 100 MW. Afhankelijk van het specifieke ontwerp van de turbine-recuperatieketel-combinatie heeft men een typische warmte/kracht-verhouding van ongeveer 1 : 1 tot 3 : 1 waarbij een verhouding van 2 : 1 zeer typisch is.

Gasturbines worden meestal verondersteld te functioneren op vollast, hun rendement bij deellast daalt immers drastisch. Als vuistregel stelt men dat een gasturbine niet zou mogen functioneren op een vermogenniveau onder $\frac{3}{4}$ van zijn vollastpunt.

2.3 Stoomturbines

De stoomturbine is een van de oudste en meest verspreide technologieën om generatoren of machines aan te drijven. Ze wordt dan ook veelvuldig toegepast in de industrie. Stoomturbines bestaan in diverse uitvoeringsvormen, zodat ze tegemoet kunnen komen aan een groot aantal specifieke behoeften en toepassingen.

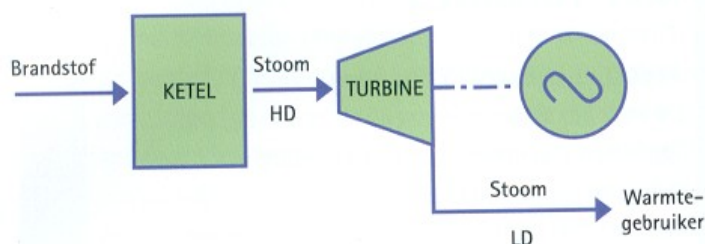


Fig. 2.3: Principeschema WKK met stoomturbine.

De thermodynamische cyclus bij stoomturbines is gebaseerd op de rankinecyclus. De kringloop van de rankinecyclus heeft als kenmerk dat er tweemaal een fase-overgang optreedt, koken en condenseren, schematisch weergegeven in fig. 2.3. Als arbeid leverende machine is de rankinecyclus overbekend. Het p, v -diagram van een vereenvoudigde cyclus wordt weergegeven in fig. 2.4. Men onderscheidt volgende fasen:

- Door een pomp wordt water uit de condensator adiabatisch naar een hoge druk gebracht en naar de boiler gevoerd (van toestand a naar b).
- In de boiler wordt het volgens een isobaar verhit tot een temperatuur die ligt boven het bij die druk horende kookpunt (van toestand b naar c).
- Daarna wordt de oververhitte stoom geëxpandeerd in een cilinder of turbine tot natte stoom onder gelijktijdige levering van arbeid (van toestand c naar d).
- Deze natte stoom wordt volgens een isobaar gecondenseerd in de condensator en zo wordt de uitgangstoestand weer verkregen (van toestand d naar a).

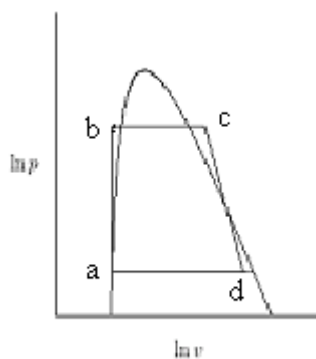


Fig. 2.4: $\ln V$ in functie van $\ln P$

De verbranding gebeurt uitwendig. Er is dus geen rechtstreeks contact tussen de vuurhaard en het procesfluidum (stoom). Dit betekent dat er geen specifieke kwaliteitseisen aan de brandstof opgelegd worden en dat dus nagenoeg elke brandstof verstoekt kan worden. Anderzijds houdt dit natuurlijk ook in dat er verliezen optreden bij de warmteoverdracht.

Stoomturbines voor WKK-toepassingen kunnen onderverdeeld worden in twee grote types:

- de tegendrukstoomturbines
- de condensatieturbine met stoomaftap

In een tegendrukstoomturbine verlaat de stoom de turbine op een bepaalde druk opgelegd door het nageschakelde proces. Op deze manier komt steeds stoom van een bepaalde kwaliteit ter beschikking van de warmtegebruiker. In de turbine wordt de stoom dus slechts ontspannen tot een druk die groter is dan de atmosferische druk (=1,013bar).

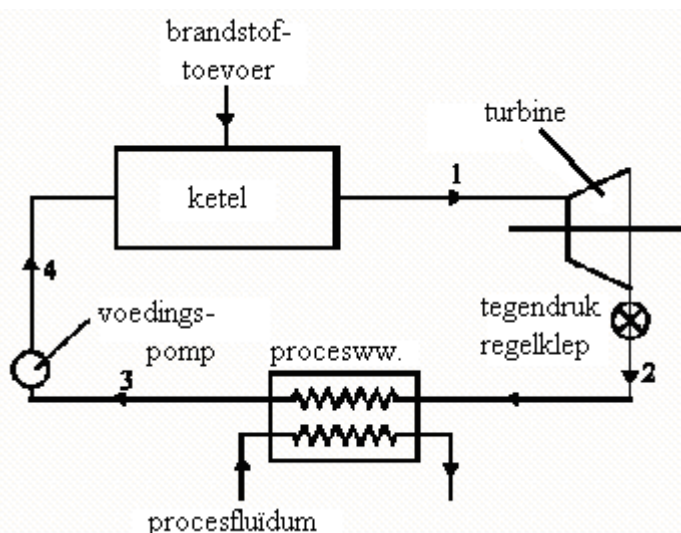


Fig. 2.5: Basisschema voor warmteafname bij stoomturbines door middel van een tegendrukturbine

Bij een condensatieturbine met stoomaftap wordt de benodigde hoeveelheid stoom op de gewenste druk afgetapt tijdens het expansieproces in de turbine. Deze stoom wordt gebruikt om te voldoen aan de warmtebehoefte. In de turbine zelf gaat de expansie door tot een zeer lage druk (lager dan de atmosferische druk) waarbij de stoom condenseert in een condensator. Het aldus gevormde water wordt terug naar de stoomketel gestuurd. Het is tevens mogelijk om meerdere stoomaftappen te voorzien. Indien men de keuze heeft uit verschillende aftapdrukken en/of de aftapdebieten kan variëren, wordt de machine flexibeler en ligt de verhouding tussen geproduceerde warmte en elektriciteit niet vast.

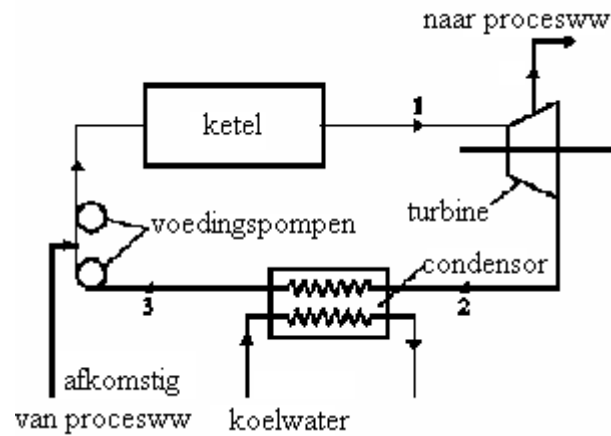


Fig. 2.6: Basisschema voor een warmteafname bij stoomturbines door middel van stoomaftapping

Bij een stoomturbine voor WKK-doeleinden ligt de nadruk op de warmteproductie. Het hoeft dan ook niet te verwonderen dat het thermische rendement bij een dergelijke installatie eerder hoog is en het elektrische rendement eerder laag. De stoomturbine zelf (dus zonder de voorgeschakelde stoomketel) haalt een erg hoge beschikbaarheid van meer dan 99 %. De periodes van stilstand voor onderhouds- en inspectiebeurten kunnen meer dan een jaar uit elkaar liggen.

2.4 STEG-centrales

Een STEG-centrale is een gecombineerd systeem van een gasturbine met een recuperatieketel waarbij de stoom van die ketel door een stoomturbine wordt geleid om ook mechanisch en elektrisch vermogen op te wekken. Als er wordt geoptimaliseerd naar elektriciteitsproductie dan gaat het om een hoogwaardige elektriciteitscentrale met rendementen voor arbeidsproductie van 55-60 %.

Een STEG-centrale recupereert wel de warmte uit de uitlaatgassen van een gasturbine, maar maximaliseert naar de elektriciteitsproductie. Via stoomaftap of door het gebruik van een tegendrukstoomturbine kan men echter ook een hoeveelheid hoge temperatuurswarmte afkomstig van de recuperatieketel ter beschikking stellen. Een WKK-installatie met gasturbine en stoomaftap in een stoomturbine is dus een combinatie tussen een STEG enerzijds en een WKK-installatie met gasturbine of stoomturbine anderzijds.

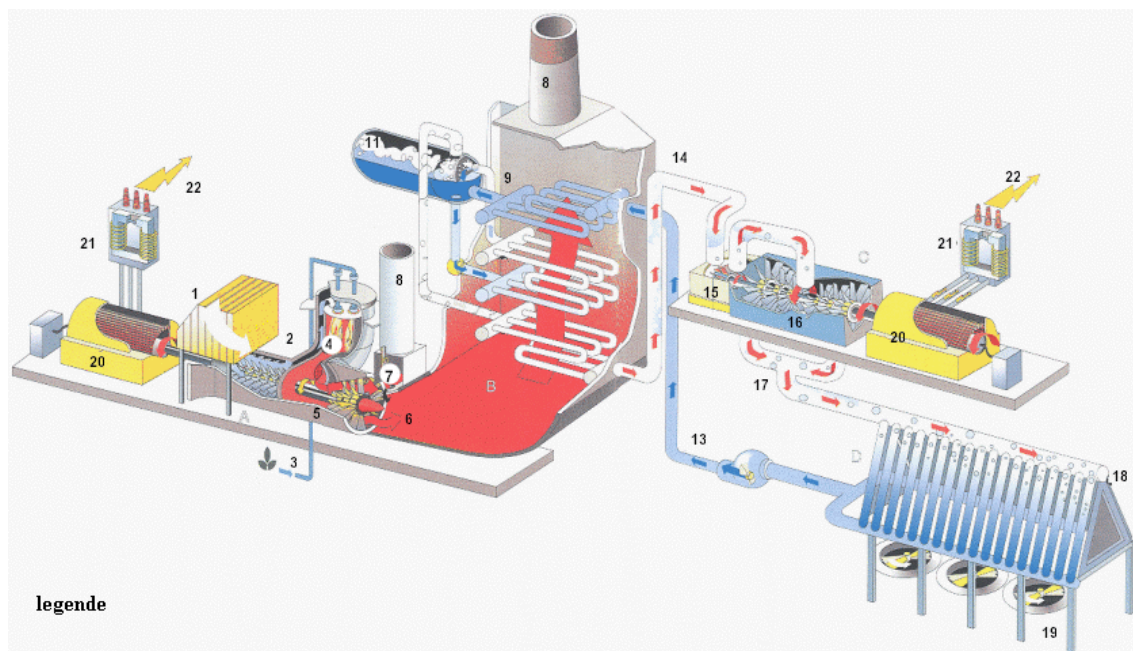


Fig. 2.7: De STEG-centrale

2.5 Stirlingmotor

De stirlingmotor is een heteluchtmotor. Dit wil zeggen dat de verbranding buiten de cilinder(s) gebeurt. Dit is in tegenstelling met de interne verbranding, die vandaag het best gekend is (benzine – en dieselmotoren), waar de verbranding wel in de cilinder(s) gebeurt.

Net als bij een interne verbrandingsmotor bewegen de zuigers van de stirlingmotor door een warmtetoevoer waarbij een drukstijging plaatsvindt die dan op haar beurt de zuigers verplaatst.

Het voordeel van deze externe verbranding is dat je alle mogelijke brandstoffen kunt gebruiken. Alles wat warmte geeft, kan de stirlingmotor aandrijven! Hierdoor is de stirlingmotor ook veel milieuvriendelijker dan de interne verbrandingsmotoren: ten eerste kun je zonder problemen zeer propere brandstoffen gebruiken en ten tweede blijven er geen onverbrande brandstofresten over.

Er is echter ook een nadeel aan deze externe verbranding verbonden, namelijk dat de motor veel trager opstart. Het arbeidsgas moet eerst opgewarmd worden tot het een bepaalde temperatuur bereikt heeft voordat de motor in werking zal treden, wat er dus voor zorgt dat de motor niet direct kan starten. Ook om dezelfde reden versnelt deze motor zeer traag. Het is dan ook hierdoor dat de stirlingmotor zeer moeilijk bruikbaar is als een automotor.

2.5.1 Opbouw van de stirlingmotor

De stirlingmotor is in opbouw uitermate simpel! Hij bestaat uit een warme en een koude kant. Men kan de warme zijde verwarmen of de koude zijde koelen en de warme kant op kamertemperatuur laten. Op beide manieren ontstaat er dus een temperatuurverschil tussen de beide zijden. Alle natuurlijke elementen hebben de eigenschap dat ze in energieniveau willen verlagen, dit is dus ook zo voor warme lucht. Dit kan door warmte af te geven. Warmte kan enkel afgegeven worden aan een volume met lagere temperatuur. In de stirlingmotor wil dit nu concreet zeggen dat de warme lucht aan de warme kant maar al te graag naar de koude kant wil en terwijl dit gebeurt, zal de lucht de zuiger meevoeren. Op volgende figuur zien we een prinsipeschema van een stirlingmotor.

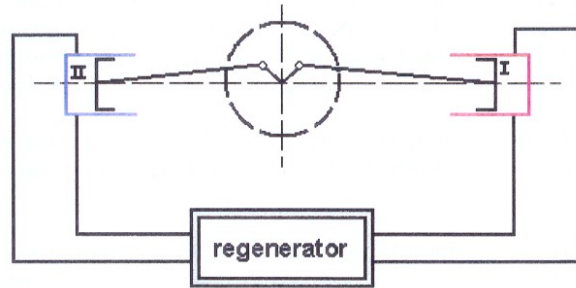


Fig. 2.8: De regenerator

Tussen de warme en de koude kant bevindt zich de regenerator. Deze zal wanneer de warme lucht naar de koude kant vloeit de warmte opnemen en wanneer de koude lucht naar de warme kant wordt gedreven de opgenomen warmte weer aan de lucht afgeven, maar hierover wordt meer verteld in het volgende hoofdstuk.

Het stirlingproces bestaat uit twee zuigers die elk verbonden zijn met het vliegwiel, de ene zuiger loopt steeds 90° voor op de andere. In één motor kunnen uiteraard meerdere zuigerkoppels zitten die op hetzelfde vliegwiel gemonteerd zijn. Op deze manier kun je dus ook meer dan twee zuigers hebben. Het aantal zuigers zal wel steeds even zijn.

2.5.2 De regenerator

De regenerator is zeker en vast het meest interessante onderdeel van de stirlingmotor, want het is immers door dit onderdeel dat de stirlingmotor zo'n hoog rendement kan halen. Beschouwen we fig. 2.9

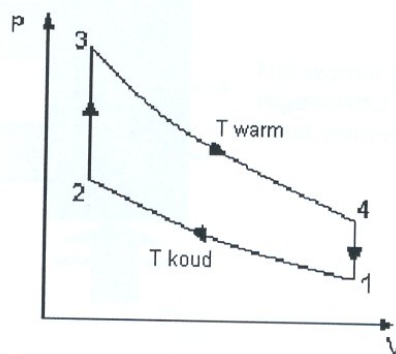


Fig. 2.9 p in functie van V

De isochore toestandsveranderingen $2 \rightarrow 3$ en $4 \rightarrow 1$ zijn mogelijk door de regenerator. Bij de isochore toestandsverandering $4 \rightarrow 1$ wordt de warmte in het systeem opgeslagen in de regenerator, zodat de temperatuur van het gas zal dalen. Bij de isochore toestandverandering $2 \rightarrow 3$ wordt de opgeslagen warmte in de regenerator weer afgegeven aan het gas, zodat de temperatuur zal stijgen.

De regenerator is een soort “warmtespons”, hij moet goed warmte kunnen opslaan. De regenerator kan bijvoorbeeld bestaan uit staalwol, geperforeerde staalplaat, traliën...

De regenerator werd door zijn Schotse uitvinder Robert Stirling (uitvinder van de stirlingmotor) “economiser” genoemd.

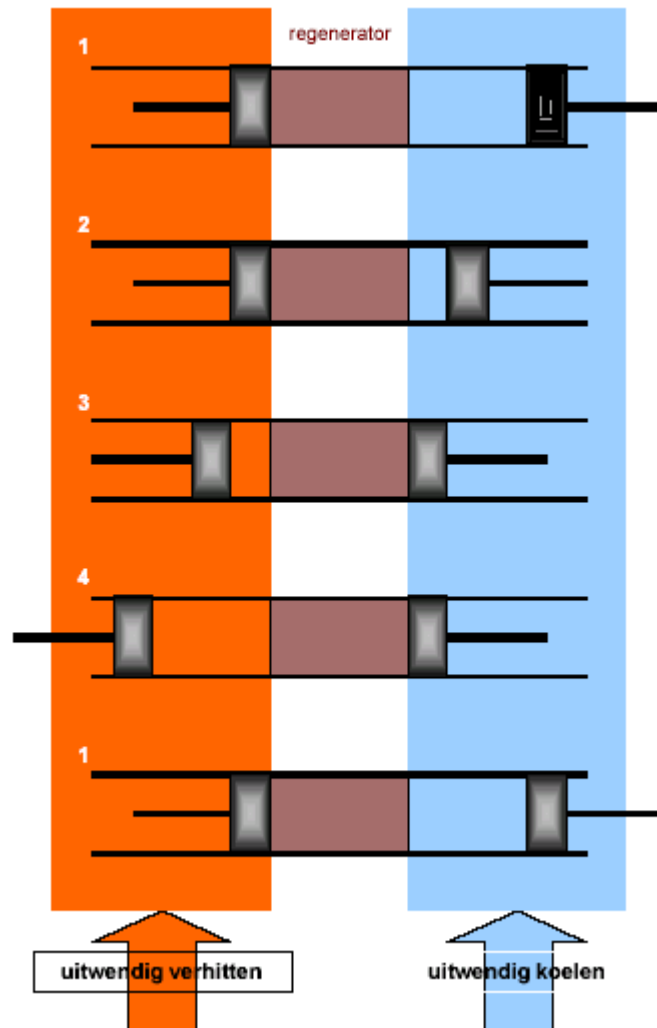


Fig. 2.10: Principeschema van een stirlingmotor

De koude zijde wordt meestal gekoeld met leidingwater, aan de warme kant wordt gestookt. Een dergelijke stirlingmotor is dus een uitwendige verbrandingsmotor. Omwille van materiaaleisen is de temperatuur van de warme zijde meestal beperkt tot 800 °C.

Een eerste mogelijke inpassing van een stirlingmotor in het WKK-concept wordt weergegeven in Fig. 2.11. Deze oplossing is een uitbreiding van het klassieke ontwerp van een ketel. De rookgassen van de brander worden in het ketelhuis gekoeld met water dat in een warmtewisselaar stroomt. Op de plaats in het ketelhuis waar de voorgeschreven temperatuur voor de stirling bereikt wordt, zou deze ingebouwd kunnen worden. Omdat de temperatuur van de rookgassen in een klassieke (stoichiometrische) brander voor de stirling te heet is, zal de warmtewisselaar ontubbeld moeten worden.

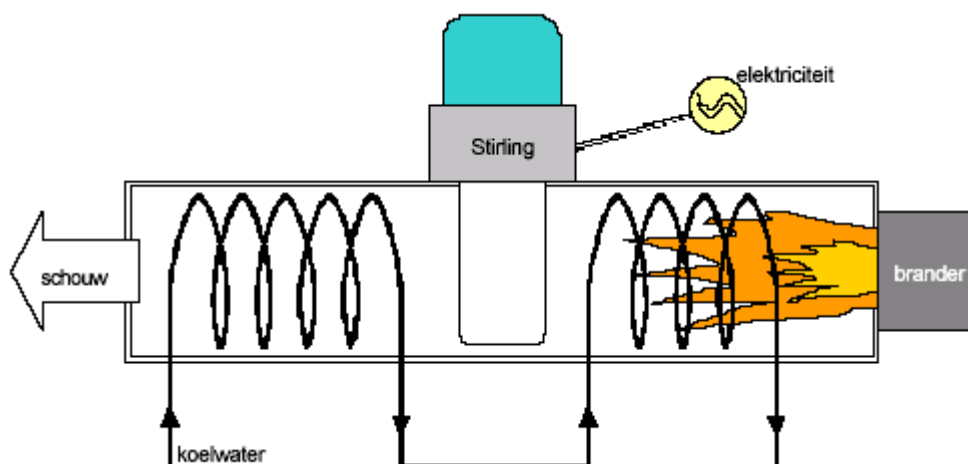


Fig. 2.11: WKK met stirlingmotor en ontubbelde warmtewisselaar

Indien de temperatuur of het debiet van het ingaande koelwater niet constant of gekend is, is de regeling van zo'n systeem niet vanzelfsprekend. Daarom wordt ook een tweede mogelijkheid besproken, zoals weergegeven in fig. 2.12. Hierbij werkt de brander met luchtoverschot, zodat de temperatuur van de rookgassen die de brander verlaten rechtstreeks de warme kant van de stirling kunnen verhitten. Omdat deze luchtvermaat een negatieve werking van de ketel tot gevolg zou hebben, wordt in een secundaire brander ook nog brandstof toegevoerd.

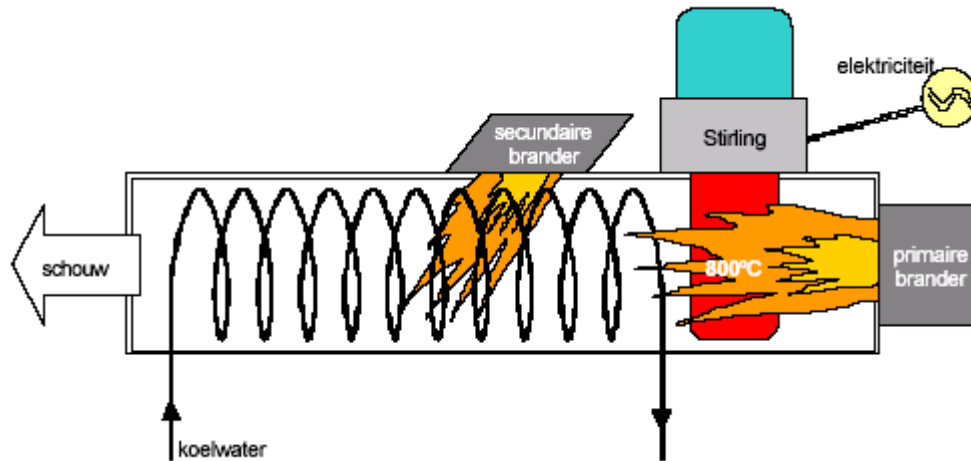


Fig. 2.12: WKK met stirlingmotor en twee branders

In elk van deze toepassingen drijft de stirlingmotor een elektrische generator aan. Indien die ook gekoeld moet worden, kan eveneens deze warmte gerecupereerd worden. Ook de koude zijde van de stirling moet gekoeld worden om de isotherme compressie te verwezenlijken. De warmte die hier aan het koelwater wordt afgegeven, kan eveneens gerecupereerd worden.

Een voordeel van de stirlingmotor ten opzichte van inwendige verbrandingsmotoren is dat de warmtebron vrij te kiezen is. Men is dus niet gebonden aan benzine, stookolie of gas. Hierdoor is het bijvoorbeeld mogelijk een stirlingmotor van warmte te voorzien met biomassa. Er bestaan ook stirlingmotoruitvoeringen waarbij zonne-energie als warmtebron gebruikt wordt. Een ander voordeel van een stirlingmotor is dat hij erg onderhoudsvriendelijk is: dit komt door de grote eenvoud van de machine die eigenlijk slechts bestaat uit twee cilinders die op een vliegwiel worden gemonteerd. Het ketelgedeelte zelf vergt natuurlijk wel hetzelfde onderhoud als een klassieke ketel. Het totale rendement van een stirling-WKK is vergelijkbaar met dat van hoogrendementsketels en is dus ongeveer 90 %. De warmte/kracht-verhouding is nog min of meer vrij te kiezen. De stirlingmotor wordt immers gedreven door temperatuurniveaus. Een stirling van 1 kW die aan de warmtezijde 800 °C nodig heeft, kan net zo goed in een ketel van 20 kW als in een ketel van 1 MW worden ingebouwd op de plaats waar die 800 °C heerst. Uiteraard is er een bepaald thermisch vermogen nodig om het hoge temperatuurniveau te onderhouden. Hierdoor is de warmte/kracht-verhouding naar onderen begrensd, ongeveer 2 : 1 tot 3 : 1, maar niet naar boven.

Het belangrijkste nadeel van de stirling is de kostprijs. Deze is hoog omdat er nauwelijks een markt bestaat en de meeste WKK-installaties met stirlingmotoren prototypes zijn. Omdat stirlingmotoren wel makkelijk verkrijgbaar zijn, zou de kostprijs op termijn zeer sterk kunnen dalen.

2.6 Brandstofcellen

Brandstofcellen zijn elektrochemische toestellen die chemische energie rechtstreeks omzetten in elektriciteit. Omdat er geen thermodynamische (stoom)cyclus doorlopen wordt, is een brandstofcel niet onderhevig aan de rendementslimiet van Carnot. Bij de werking van een brandstofcel wordt er warmte geproduceerd. Die warmte moet afgevoerd worden om het temperatuurniveau van de cel op dezelfde warmte te houden. Omdat men voorzieningen treft om deze beschikbaar gestelde warmte nuttig aan te wenden doet men aan warmtekrachtkoppeling. Voor de bruikbaarheid van deze warmte is vooral het temperatuurniveau van belang. In principe is de brandstofreactie gebaseerd op de oxidatie van H₂ en zuurstof in zuivere vorm of uit de omgevingslucht.

In de brandstofcel wordt aan de anodezijde de brandstof – waterstof dus – gesplitst in ionen en elektronen. Het elektrolyt, dat zich tussen anode- en kathodezijde bevindt, laat enkel de ionen door. De elektronen bewegen langs een externe belasting naar de kathode. Daar reageren de ionen, de elektronen en de zuurstof met elkaar en wordt er water gevormd. Het spanningsverschil tussen anode en kathode bedraagt slecht 0,7 volt. De elektrische energie wordt geproduceerd onder de vorm van gelijkstroom. Gezien vrijwel steeds wisselstroom vereist wordt, is hier een omzetter noodzakelijk. Ook op gebied van brandstof stelt zich een probleem: waterstof is immers niet zomaar voorhanden, maar dient geproduceerd te worden bijvoorbeeld uit methaan via een zogenaamde reformreactie.



Brandstofcellen worden ontwikkeld van minieme vermogensgroottes tot grootschalige installaties van enkele megawatts. Naargelang het gebruikte elektrolyt bestaan er verschillende soorten brandstofcellen. Met deze verschillende types corresponderen ook temperaturen waarbij de brandstofcel aangedreven wordt. De temperatuur speelt een belangrijke rol voor WKK-toepassingen aangezien ze bepaalt op welke temperatuur de warmte beschikbaar is. Tegenwoordig doet men onderzoek op een zestal soorten brandstofcellen. Fig. 2.13 geeft een schematisch overzicht van de verschillende soorten cellen.

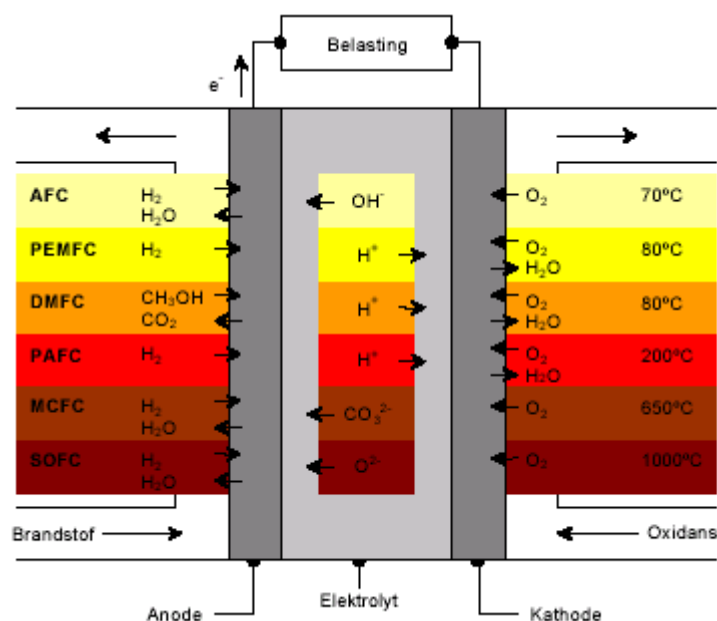


Fig. 2.13: Overzicht verschillende brandstofceltypes

Men onderscheidt:

- AFC : Alkalische brandstofcel
- PEMFC : Protonuitwisselingsmembraan
- DMFC : Methanol brandstofcel
- PAFC : Fosforzuur brandstofcel
- MCFC : Carbonaat brandstofcel
- SOFC : vaste oxide brandstofcel

Een groot voordeel van de brandstofcel is dat ze geruisloos werkt en daardoor gemakkelijk aan de geluidsnormen voldoet. Ze is tevens zeer gebruiks- en onderhoudsvriendelijk: het rendement bedraagt hier dan ook rond de 80 tot 90 %. Afhankelijk van het type varieert de warmte/kracht-verhouding van 1 : 1 tot 2,5 : 1.

Het belangrijkste nadeel is de kostprijs en voorlopig ook nog de commerciële beschikbaarheid, zeker voor de kleinere vermogenklassen. Een ander nadeel is dat de meeste brandstofcellen waterstof als brandstof gebruiken en die moet eerst gemaakt worden. Momenteel zijn er nog heel wat technische problemen met de reformers (= endotherm proces dat warmte vraagt). De noodzakelijke, uitwendige reformer bij de protonuitwisselingsbrandstofcel blijkt een van de grote hinderpalen voor de grote doorbraak te zijn. Zolang men niet over een waterstofnet beschikt moet de kostprijs van deze reformer moet er dan ook nog bijgevoegd worden. Momenteel is het elektrische rendement bij brandstofcellen van de orde van 40 tot 60 % .

Als men geen waterstof als beschikbare brandstof heeft, geeft de reformreactie aanleiding tot CO₂-uitstoot. In dit opzicht verschilt een brandstofcel niet van de andere technologieën. Het is vooral omwille van zijn relatief hoog elektrisch rendement dat de primaire brandstofbesparing in WKK-mode nog groter is dan bij andere technologieën. Omwille van de trage opwarming van de meeste brandstofcellen zijn bepaalde werkingsregimes ook hier uitgesloten zonder bijkomende apparatuur zoals een opslagmedium of een aanvullende ketel.

3 Haalbaarheidsstudie van WKK

Voor we een WKK-installatie aanschaffen moeten we ons eerst afvragen of een WKK-installatie wel rendabel genoeg is. En is de investering niet te groot. Dit kunnen we allemaal te weten komen door een haalbaarheidsstudie uit te voeren. Dit gebeurt in enkele fasen die in de onderstaande fig. 3.1 zijn weergegeven.

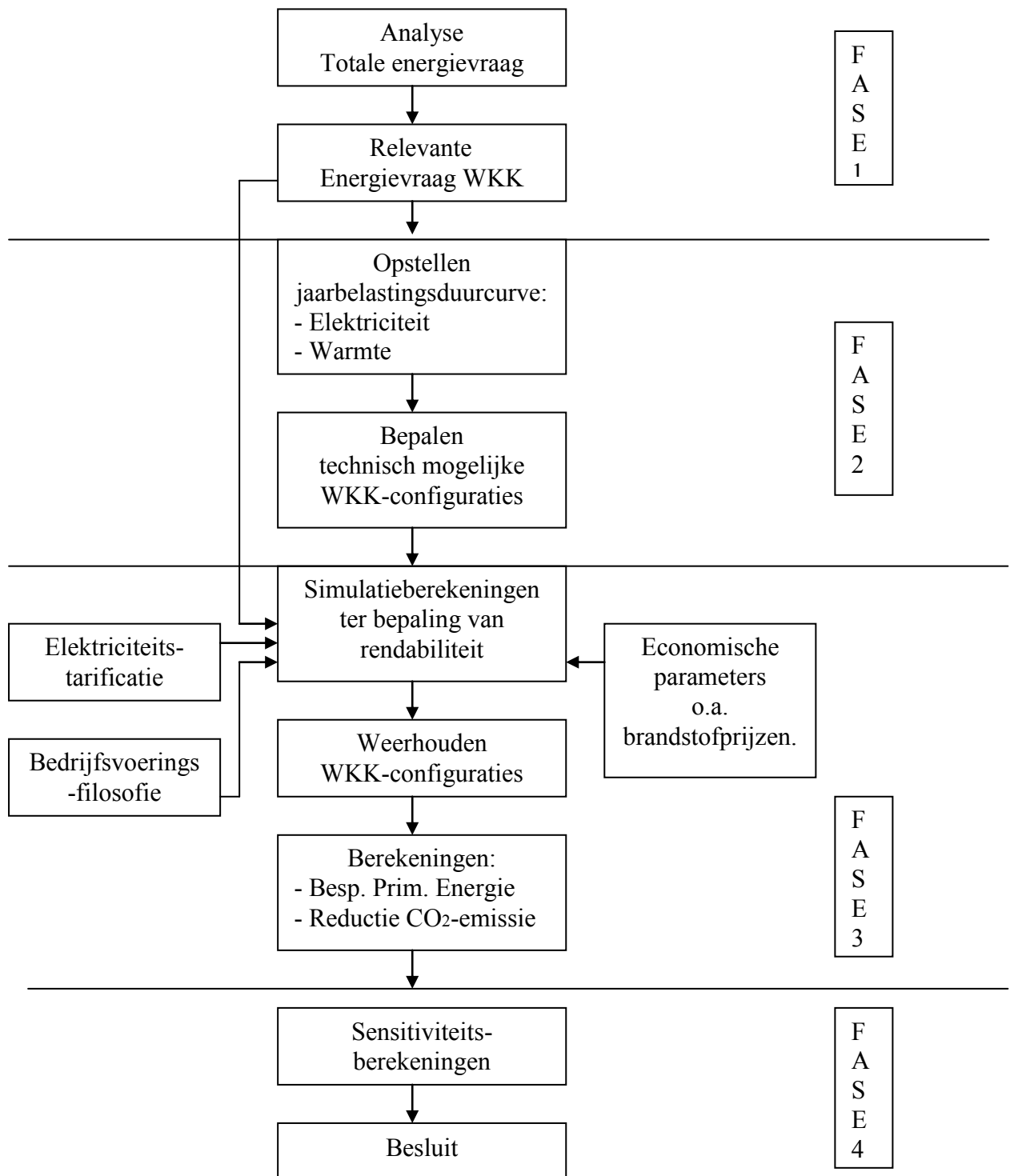


Fig. 3.1: Structuur haalbaarheidsstudie

De haalbaarheidsstudie komt uiteraard als eerste stap binnen de realisatie van het project. Elke studie legt natuurlijk eigen klemtonen afhankelijk van de concrete situatie, maar toch kunnen algemeen een viertal fasen onderscheiden worden:

- 1 de analyse van de energievraag
- 2 de technische dimensionering van de WKK
- 3 de rendabiliteitsberekening
- 4 sensitiviteitsanalyse

3.1 De analyse van de energievraag

Een haalbaarheidsstudie is een kosten-batenanalyse van een investering of project. Elke structuur begint met de analyse van de energievraag. Die is zeer belangrijk, want een verkeerde inschatting kan leiden tot een foutieve dimensionering van de WKK en vandaar tot een negatieve werking met een nadelige invloed op het rendement. De verdere studie over een meer exacte berekening van een terugverdientijd kan toevertrouwd worden aan een gespecialiseerd studiebureau, een installateur of derde investeerder, een energie-trader, ...

In het geval van WKK worden de besparingen van de energie en de ondersteuningsmaatregelen vergeleken met de afschrijvings- en exploitatiekosten van de WKK waaruit een terugverdientijd berekend wordt. Hier gaat een grondige studie van de noden (energieën, vermogens en gebruiksduur of gebruikskromme) aan vooraf. Een meetcampagne kan soms nodig zijn om het werkingsregime te simuleren. De kosten van de voorgestelde en de bestaande installaties worden dan vergeleken en zo wordt het technische voorstel vertaald in een financieel voorstel.

Indien metingen omwille van tijdsgebrek of om budgetredenen niet mogelijk zijn, dient men zich te baseren op facturen van het elektriciteits- en brandstofverbruik.

Op basis van temperatuursmetingen en bedrijfsspecifieke gegevens kunnen metingen uit andere gegevens mechanisch worden afgeleid, zodat men uiteindelijk jaarpatronen verkrijgt.

Bij de analyse van de energievraag worden de volgende drie stappen onderscheiden:

- 1.1 de energievraagpatronen van het totale bedrijf.
- 1.2 de voor warmte/kracht relevante energievraagpatronen
- 1.3 de jaarbelastingsduurcurve.

3.1.1 De energievraagpatronen van het totale bedrijf

Een eerste indruk van de energievraag van het totale bedrijf kan opgemaakt worden aan de hand van (maandelijkse) facturen (elektriciteit, aardgas): uit de maandelijkse elektriciteitsfactuur kan men de maandelijks aangekochte hoeveelheid kWh en de maandelijkse kwartuurspits aflezen.

Indien aardgas als brandstof gebruikt wordt, is het belangrijk op te merken dat het aardgasverbruik op de bovenste verbrandingswaarde wordt gefactureerd terwijl in de meeste gevallen ‘slechts’ de onderste verbrandingswaarde (= ongeveer 0,9 van de bovenste verbrandingswaarde) wordt benut. Als het rendement van de aardgasketel op 80 % gesteld wordt, is de warmtevraag in (GJ) dus gelijk aan $0,9 \times 0,8 = 0,72$ maal het aardgasverbruik in (GJ) op de factuur.

Wanneer andere brandstoffen (olie, kolen) gebruikt worden, is het vaak moeilijk om een maandelijks verbruik op te stellen, omdat deze niet maandelijks gefactureerd worden. Naast de bepaling van de jaar- en maandtotalen dienen ook week- en dagpatronen opgesteld te worden. Deze patronen zijn noodzakelijk, omdat hiermee het verband tussen elektriciteits- en warmtevraag in rekening wordt gebracht. Bij het bepalen van week- en dagpatronen moet men zich baseren op metingen of op mededelingen van medewerkers van het bedrijf.

Ook is het belangrijk een onderscheid te maken tussen de warmtevraag die onafhankelijk is van de buitentemperatuur (bv. sanitair warm water) en de warmtevraag die afhankelijk is van de buitentemperatuur (bv. verwarming)

3.1.2 De voor warmte/kracht benodigde energievraagpatronen

Nadat de energievraag van het totale bedrijf in kaart gebracht is, dient de voor WKK nodige energievraag bepaald te worden. In het eenvoudigste geval is deze gelijk aan de totale energievraag van het bedrijf. In een aantal gevallen echter bestaat de voor de WKK relevante energievraag ‘slechts’ uit een gedeelte van de energievraag van het totale bedrijf. Als we de WKK installatie gebaseerd op motoren die enkel warmte in de vorm van warm water produceert in beschouwing nemen, valt het gedeelte warmte in de vorm van stoom buiten de voor de WKK relevante warmtevraag.

3.1.3 De jaarbelastingsduurcurve

Het resultaat van de berekeningen is een schatting van de voor WKK relevante elektriciteits- en warmtevraag per uur. Hieruit worden de zogenaamde jaarbelastingsduurcurves voor elektriciteit en warmte bepaald. Dit geeft de belastingsduur van een bepaalde belasting over de periode van een jaar aan. Ze geven een eerste inzicht in de grootteorde van warmte/kracht-installaties die in aanmerking komen.

Jaarbelastingsduurcurve hebben echter de zeer belangrijke tekortkoming dat ze helemaal geen rekening houden met het verband tussen elektriciteits- en warmtevraag. Het kan dus mogelijk zijn dat perioden met hoge elektriciteitsvraag samenvallen met perioden van lage warmtebehoefte.

3.2 De technische dimensionering van de WKK

Er moet een keuze gemaakt worden uit de verschillende beschikbare technologieën. Motoren worden gebruikt bij een warmtevraag in de vorm van warm water of een combinatie van warm water en stoom. Turbines daarentegen worden toegepast bij de grotere vermogens en bij een warmtevraag in de vorm van stoom. Belangrijk zijn hierbij het vermogen, de rendementen, de warmtebalans en de temperatuurniveaus van de warmtebronnen.

Als de vraag naar warmte en elektriciteit niet constant is en als de verhouding tussen beide varieert, moet er één van de volgende mogelijkheden gekozen worden inzake dimensionering.

- Dimensioneren en regelen volgens de warmtevraag. Men koopt elektriciteit bij van het net of men levert er terug aan het net.
- Dimensionering en regeling volgens de elektriciteitsvraag. Alle elektriciteit wordt door de installatie geleverd. Een tekort aan warmte moet door een andere bron bijgeleverd worden terwijl een teveel moet afgevoerd worden.
- Dimensionering en regeling volgens een basisvraag naar warmte en elektriciteit. Zowel warmte als elektriciteit moeten bijkomend geproduceerd of gekocht worden. Men plaatst de WKK-installatie in het bedrijf zelf.

Voor de dimensionering wordt ook gebruik gemaakt van de jaarbelastingsduurcurve of monotoondiagram voor warmte en elektriciteit opgesteld met behulp van de analyse van de energievraag. Een jaarbelastingsduurcurve geeft de rangschikking van de belasting voor een volledig jaar (8760 uur). Doet men dit zowel voor elektriciteit als voor warmte, dan bekomt men twee curves. Uitgaande hiervan kan men het vermogen en het aantal draaiuren bepalen van de installatie die het meeste elektriciteit respectievelijk warmte produceert (beide als energie). Dit komt overeen met de grootste rechthoek onder de jaarbelastingsduurcurve (zie onderstaande figuur).

Een jaarbelastingsduurcurve kan eenvoudig afgeleid worden uit een jaarpatroon. Fig. 3.2 geeft een voorbeeld van een jaarbelastingsduurcurve voor de warmte.

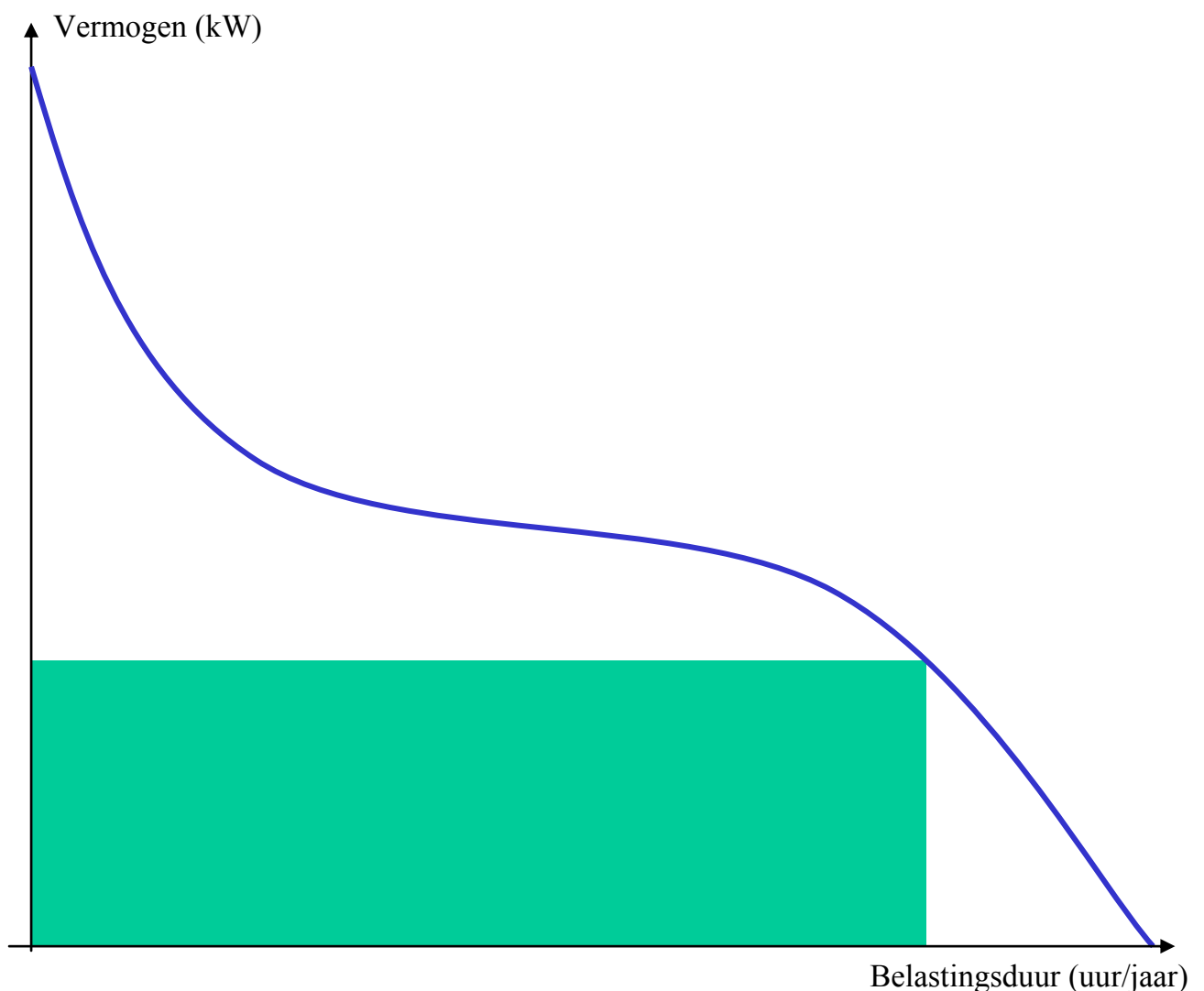


Fig. 3.2: Jaarbelastingsduurcurve

Jaarbelastingsduurcurves hebben de zeer belangrijke tekortkoming dat ze geen rekening houden met de mate van verband tussen de elektriciteits- en warmtevraag. Het kan dus gebeuren dat perioden met hoge elektriciteitsvraag samenvallen met tijden van lage warmtebehoefte en omgekeerd. Hoewel bij de dimensionering een eerste indruk kan verkregen worden op basis van de jaarbelastingsduurcurve dient men bij de berekening van de economische haalbaarheid van WKK-systemen rekening te houden met het verband tussen elektriciteits- en warmtevraag. In de meeste gevallen is er zelfs een dynamische simulatie van de WKK en de warmte- en elektriciteitsvraag nodig om een correct beeld te krijgen van de reële werkingscondities en rendabiliteit van het project.

Een warmtekrachtkoppeling moet gedimensioneerd worden uitgaande van de warmtevraag. Dit houdt in dat enkel de jaarbelastingsduurcurve voor warmte in rekening wordt gebracht. De reden hiervoor is dat in tegenstelling tot warmte elektriciteit goed transporteerbaar is.

Indien een warmtegedimensioneerde WKK teveel elektriciteit produceert voor het bedrijf of het gebouw kan deze elders nuttig aangewend worden, terwijl lokaal een maximale hoeveelheid warmte wordt opgewekt met de WKK. Bij een elektrisch gedimensioneerde WKK daarentegen kan overtollige warmte niet altijd nuttig aangewend worden en dient deze weggekoeld te worden. Dan kan men niet echt meer spreken van een WKK, maar eerder van een machine met gedeeltelijke warmterecuperatie.

Hoewel warmtegedimensioneerde WKK-systemen dus de voorkeur verdienen, wordt er toch vaak gedimensioneerd op de elektriciteitsvraag. Bij een warmtevraag-gedimensioneerde WKK kan het immers voorkomen dat de WKK niet actief is bij een hoge elektriciteitsvraag. Deze elektriciteit dient dan nog aangekocht te worden bij het openbare net.

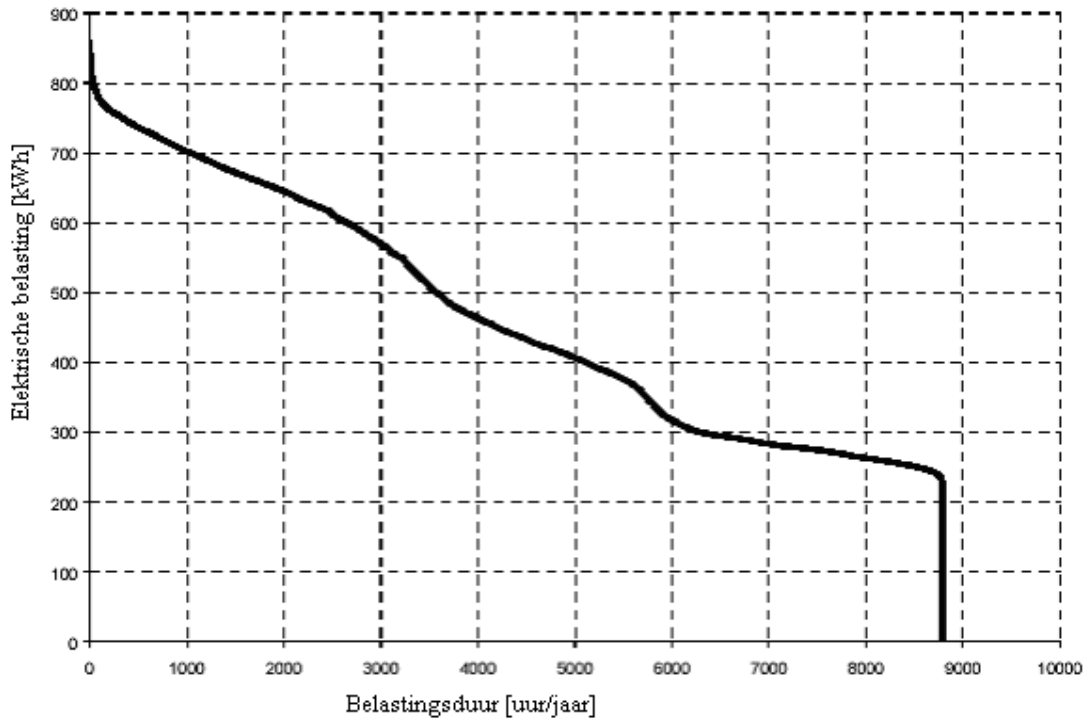


Fig. 3.3: Jaarbelastingsduurcurve voor elektriciteit

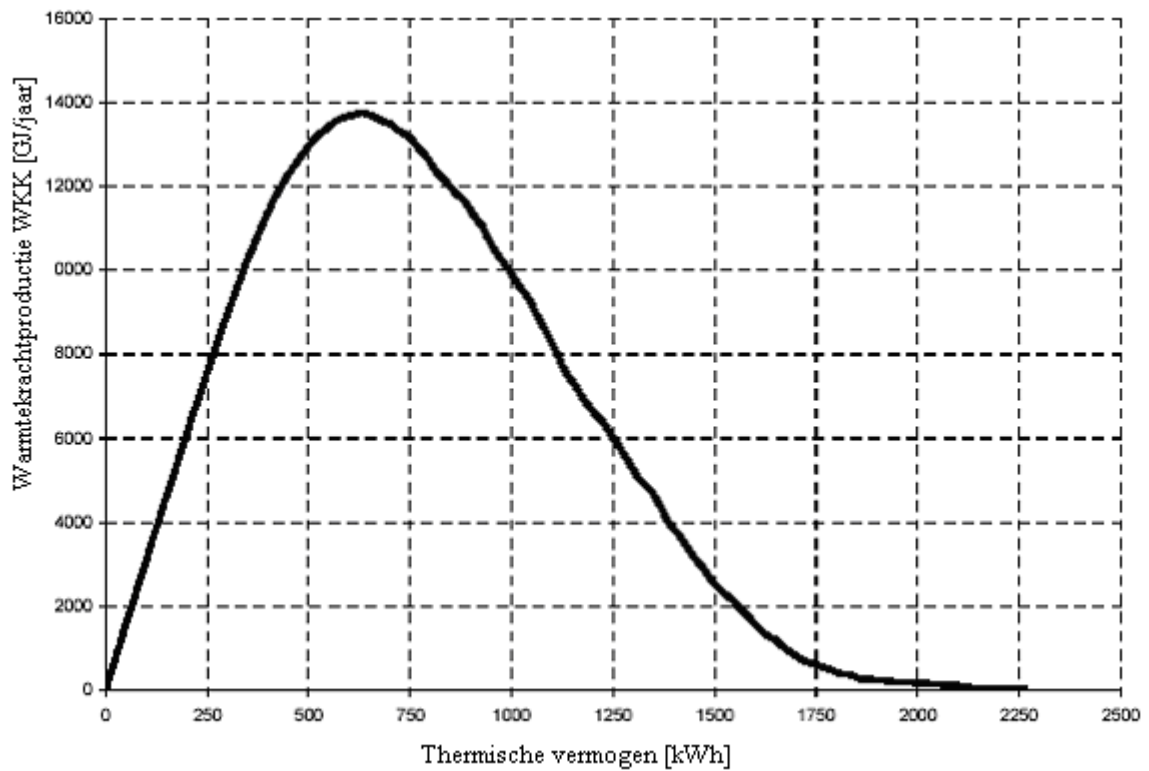


Fig. 3.4: Warmteproductie volgens de jaarbelastingduurcurve.

3.3 De rendabiliteitsberekening

Voor de economische analyse en het bepalen of de investeringen rendabel zijn dienen we de voorgestelde nieuwe toestand te vergelijken met een referentiesituatie. Hier zullen we de gegeven toestand ‘WKK’ vergelijken met de ‘geen WKK’ waarbij verschillende zaken meespelen.

Bij warmtekrachtkoppeling is het streven naar een rationeel energiegebruik (REG) belangrijk. Als alle REG-maatregelen zijn toegepast om de elektriciteits- en warmtevraag van een bedrijf of instelling te minimaliseren kan in een aantal gevallen door de elektriciteit en warmte geheel of gedeeltelijk met een warmtekrachtinstallatie te produceren nog eens tot 30 % op de primaire energiebehoefte bespaard worden. Omdat elk energieverbruik een bijkomende milieubelasting betekent, kan een warmtekrachtkoppeling ook een milieuvriendelijke technologie genoemd worden.

Hoewel WKK uit energetisch en ecologisch oogpunt voordelen biedt, is voor bedrijven en instellingen de economische haalbaarheid van warmte/krachtkoppeling de belangrijkste maatstaf. Het antwoord op de vraag of WKK economisch verantwoord is, is geen simpele ‘ja’ of ‘neen’. Om de economische haalbaarheid te kunnen bepalen dient per project een grondige vergelijking gemaakt te worden van de kosten en baten die een investering in WKK met zich meebrengt.

Tabel 1.1 toont de kosten en baten van een warmte/kracht-project waarbij wordt opgemerkt dat deze steeds gedefinieerd zijn in termen van bijkomende kosten en opbrengsten ten opzichte van de referentiesituatie zonder WKK.

Kosten	Baten
<ul style="list-style-type: none">- Investeringskosten- Vaste en variable exploitatiekosten:<ul style="list-style-type: none">• Onderhoud• Bediening	<ul style="list-style-type: none">- Energierekening zonder WKK<ul style="list-style-type: none">• Aankoop elektriciteit• Brandstofkosten- Energierekening met WKK<ul style="list-style-type: none">• Aankoop aanvullende elektriciteit• Aankoop noodstroom• Terugleververgoeding• Brandstofkosten

Tabel 1.1: Kosten en baten van een warmte/kracht-project

Het bepalen van de kosten en baten blijkt bij de warmtekrachtkoppeling voornamelijk bepaald te worden door vier factoren:

- verloop van de elektriciteits- en warmtevraag (verband)
- warmte/kracht-technologie
- koppeling met het openbare elektriciteitsnet (tarifiering)
- brandstofprijzen

Een belangrijke moeilijkheid bij het analyseren van de bovenstaande factoren is dat zowel de elektriciteits- en warmtevraag als de elektriciteitstarifiering sterk afhangen van de tijd (zelfs urengebonden zijn). Het is duidelijk dat men voordat men tot de aankoop van een warmte/kracht-installatie overgaat duidelijk inzicht moet hebben in de economische haalbaarheid van het systeem.

Vooreerst zijn er de investerings- en onderhoudskosten. Deze worden het best op basis van een gerichte offerte bepaald. Bij onderhoudskosten is het belangrijk de exploitatiekosten van de machines te kennen: onderhoudskosten worden vaak contractueel afgewerkt en uitgedrukt in draaiuren

Daarnaast hebben we de besparingen op de energierekening waarvoor we de brandstof- en de elektriciteitsprijzen nodig hebben. Er dient rekening gehouden te worden met het feit dat de markten voor elektriciteit en gas volop in beweging zijn door de vrijmaking van de energiemarkt. Voor grote verbruikers zal er in de toekomst een andere marktprijs gelden terwijl de kleine verbruikers waarschijnlijk aan tarieven gebonden blijven.

Tenslotte moeten voor de rendabiliteitsberekening ook de subsidies meegerekend worden. In Vlaanderen/België bestaan geen specifieke subsidieregelingen voor investeringen in WKK-installaties. Niettemin kan er overheidssteun aangevraagd worden in het kader van een aantal andere programma's. Het betreft de regeringssteun, de steun in het kader van de demonstratieprojecten en de versnelde fiscale investeringsaftrek. Om twijfelende investeerders over de streep te trekken is COGEN Vlaanderen bereid om financieel tussen te komen bij het uitvoeren van een haalbaarheidsstudie.

3.3.1 In eigen beheer: het bedrijf financiert en gebruikt de WKK zelf

Investerings, gebruikskosten (brandstof, onderhoud ...) en risico's worden gedragen door het bedrijf. Daartegenover staat een grotere besparing op de energiefactuur.

3.3.2 Met medewerking van een derde investeerder

De meeste gangbare vorm is de samenwerking met het eigen energiebedrijf. In deze vorm financiert en exploiteert het etablissement de installatie en draagt tevens het risico. De elektriciteit komt integraal aan het energiebedrijf toe. De warmte wordt aan een gereduceerd tarief aan deze verkocht. Het bedrijf heeft aanzienlijk minder besloomingen en loopt minder risico. Daartegenover staat een kleinere winstmarge.

3.3.2.1 Warmtekrachttechnologie

In WKK-gebouwen (bv. ziekenhuizen, zwembaden, kantoren ...) worden meestal warmte/kracht-installaties met verbrandingsmotoren (gas- of dieselmotoren) toegepast. Gasmotoren zijn beschikbaar vanaf 15 kW tot circa 3 MW. Dieselmotoren zijn verkrijgbaar voor vermogens tot enkele tientallen MW. Het elektrische rendement van een warmte/kracht-groep met dieselmotoren kan boven de 40 % liggen. Het thermische rendement is vergelijkbaar met het elektrische rendement, zodat het totale rendement tussen 80 % en 85 % ligt.

3.3.2.2 Koppeling met het openbare elektriciteitsnet

We bekijken nu welke consequenties de toepassing van WKK heeft op de tarifiering van:

- aankoop van elektriciteit van het net
 - verkoop van elektriciteit aan het net
- Aankoop van elektriciteit

In een aantal gevallen koopt de zelfproducent elektriciteit van het net als:
→ aanvullende elektriciteit: de WKK-installatie produceert onvoldoende elektriciteit om aan de vraag te voldoen en er moet bijgekocht worden.
→ noodstroom: de WKK-installatie is buiten bedrijf (onderhoud, storing) en de gehele elektriciteitsbehoefte wordt van het net aangekocht.

Bij de tarifiering wordt tussen deze twee situaties geen onderscheid gemaakt. Ongeacht het tarief dat de klant had voordat hij WKK toepaste, wordt aan de zelfproducent de aangekochte elektriciteit aangerekend aan het uurseizoentarief.

- Verkoop van elektriciteit

Als de WKK-installatie meer elektriciteit dan nodig produceert, kan elektriciteit aan het net teruggeleverd worden. Enkele kenmerken van de vergoeding van teruggeleverde elektriciteit worden besproken.

3.3.2.3 Brandstofprijzen

Voor gasolie wordt er een richtprijs per dag of week jaar gegeven. Voor aardgasleveringen zijn tarieven opgesteld die beschreven staan in een uitgave van het Controle Comité voor de Elektriciteit en het Gas. Aardgas wordt gefactureerd op de bovenste verbrandingswaarde.

3.4 Sensitiviteitsanalyse

Na het voorgaande kan men criteria opstellen voor de economische rendabiliteit van de WKK-installatie. Meestal gebruikt men hiervoor de terugverdientijd, omdat dit een zeer eenvoudige maatstaf is. Men vergelijkt de toekomstige opbrengsten met de investeringskosten en bepaalt na hoeveel jaar de investering terugverdiend is. Als deze termijn kort genoeg is, zal men overgaan tot de investering. Deze maatstaf houdt rekening met de tijdswaarde van het geld. Daarom wordt soms ook het systeem van netto huidige waarde gehanteerd. Hier worden alle geldstromen teruggerekend naar eenzelfde tijdstip, doorgaans het moment van de investering. Als de netto huidige waarde dan positief is, zal men de investering doen.

4 Warmtekrachtkoppeling in Vlaanderen

Typische toepassingsgebieden zijn:

- zwembaden
- ziekenhuizen
- scholen
- openbare gebouwen
- tuinbouw
- waterzuiveringsstations en afvalverwerkingsinstallaties waar biogas gewonnen wordt

In de jaren '90 kende warmtekrachtkoppeling een enorme bloei en werden behoorlijk wat gasturbines (in de grote industrie) en motoren (voor toepassingen met kleiner vermogen) gebouwd. De laatste jaren daarentegen waren eerder zwarte jaren en er werden nog weinig nieuwe projecten gerealiseerd. De uitbreiding van de energiemarkten, een dalende elektriciteitsprijs, een stijgende gasprijs en het aanslepen van de invoering van een certificatenstelsel om WKK economisch interessanter te maken zijn de belangrijkste oorzaken hiervan. Er is nochtans nog een belangrijk potentieel dat kan gerealiseerd worden en er wordt verwacht dat dit ook zal gebeuren eens de liberalisering achter de rug is en de regelgeving inzake certificaten volledig in voege is getreden.

Het blijkt ook dat er de laatste jaren meer investeringen gebeuren in Wallonië dan in Vlaanderen. In 1997 werd bovendien door VITO in samenwerking met Institut Wallon ook het energetische potentieel van warmtekrachtkoppeling in België bepaald. Laborelec en Electrabel maakten op basis van dit energetische potentieel en een marktbevraging een raming van het economische potentieel. Dit ligt een flink stuk lager dan het energetische potentieel, omdat een deel daarvan niet gerealiseerd wordt wegens allerlei barrières. Een invulling van het volledige economische potentieel tegen 2012 - de doelstelling van de Vlaamse overheid - kan ertoe leiden dat ongeveer 20 % van de in Vlaanderen verbruikte elektriciteit met Vlaamse WKK's kan opgewekt worden. Dit cijfer hangt natuurlijk sterk af van de evolutie van het elektriciteitsverbruik. Een toename van het elektriciteitsverbruik met 1,8 % per jaar wordt hierbij als realistisch aanzien.

Van dit potentieel situeert het overgrote deel zich in de industrie. Ook de tertiaire sector en de (glas-) tuinbouw nemen een aanzienlijk deel voor hun rekening terwijl het aandeel van de residentiële branche erg beperkt blijft. Binnen het industriële gebied liggen de meeste toepassingen bij de chemie (41 %), de voeding (15 %), de raffinaderijen (11 %) en de papier- en kartonindustrie (8 %). Wat de tertiaire tak betreft, spreken we vooral over toepassingen in kantoren (41 %), ziekenhuizen (21 %) en scholen (12 %). Het aandeel in de tuinbouw situeert zich voor driekwart in de groenteteelt waarbij vooral de tomatenteelt interessante mogelijkheden biedt, het andere kwart ligt in de sierteelt (kasplanten en snijbloemen).

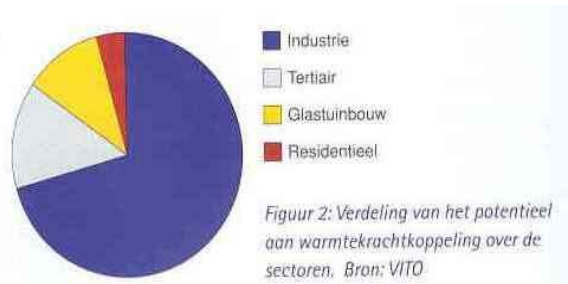


Fig 4.1: Verdeling van het potentieel van warmtekrachtkoppeling over de sectoren

4.1 WKK met motoren en turbines in Vlaanderen

Sinds 1990 wordt door VITO het opgestelde WKK-vermogen in Vlaanderen geïventariseerd. VITO maakt een overzicht van de op dat ogenblik gerealiseerde WKK-installaties in Vlaanderen. In 1990 bedroeg het opgestelde vermogen bijna 8MW verdeeld over 30 projecten. In 1999 was het totale vermogen opgelopen tot 115 MW verdeeld over 133 projecten.

Bovendien worden een aantal tendensen in vergelijking met de vorige jaren in kaart gebracht.

4.1.1 WKK met motoren

4.1.1.1 Evolutie van het opgestelde WKK-vermogen

Figuur 1 toont de evolutie van het opgestelde WKK-vermogen in Vlaanderen tussen 1990 en 2000. Hieruit blijkt dat het geplaatste vermogen in Vlaanderen sterk gestegen is vanaf 1995. Tussen 1995 en 1996 verdubbelde het van 27,6 Mwe naar 61,4 Mwe. In de laatste vier jaar is het opgestelde WKK-vermogen nogmaals verdubbeld, zodat het momenteel 134,6 Mwe verdeeld over 166 projecten bedraagt.

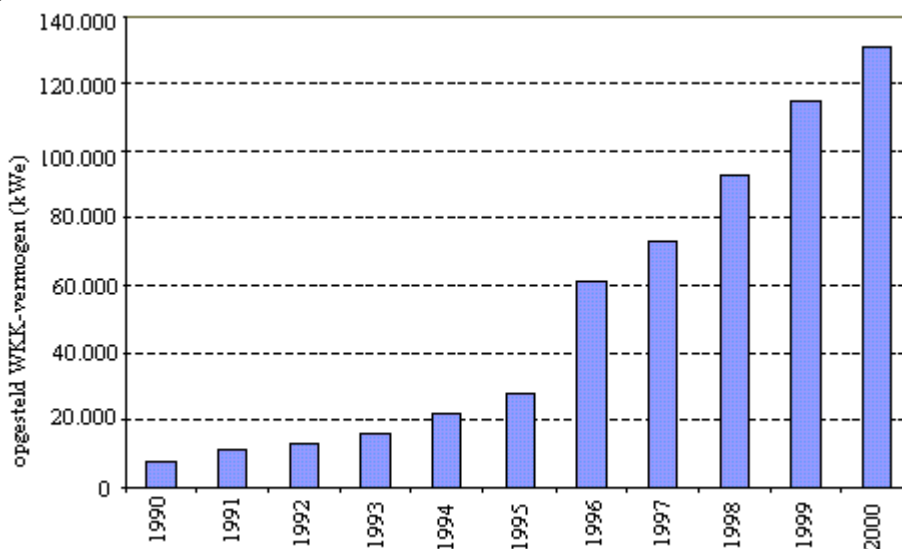


Fig. 4.2: Evolutie van het opgestelde WKK-vermogen van 1990 tot 2000

4.1.1.2 Verdeling WKK-vermogen per sector

Fig. 4.3 geeft het opgestelde vermogen weer voor de jaren 1990-2000 opgedeeld in de zes belangrijkste sectoren waar WKK-installaties voorkomen in Vlaanderen. De tuinbouw blijft de belangrijkste sector met een totaal vermogen van 60 MW (44 %), het opgestelde vermogen in de industrie bedraagt 52,5 MW (39 %). Het aandeel van afvalverwerking, ziekenhuizen, rusthuizen, kantoren en sport/recreatie/cultuur bedraagt respectievelijk 6,6 %, 5,6 %, 1,5 % en 2,5 %.

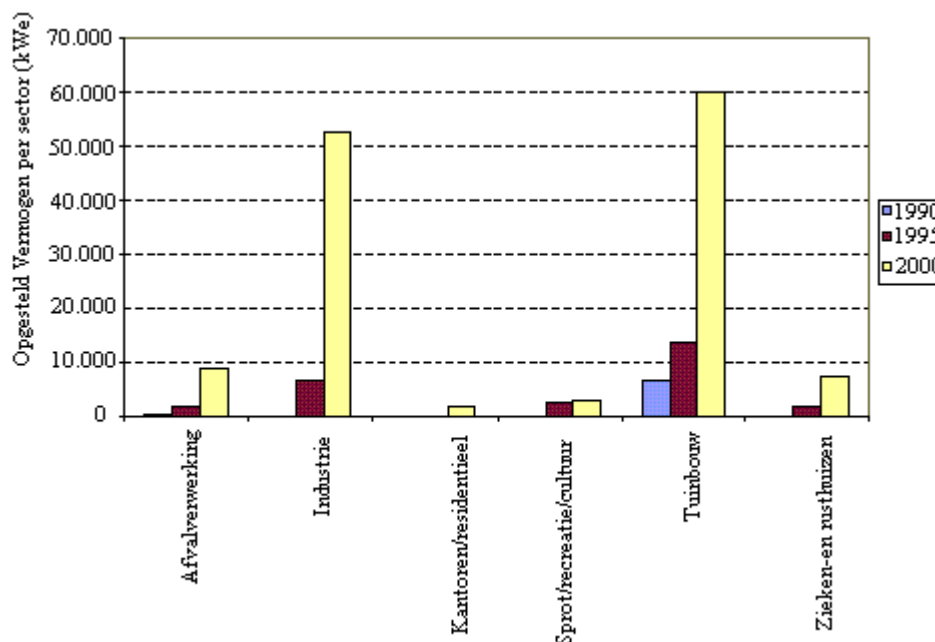


Fig. 4.3: Verdeling WKK-vermogen over de verschillende sectoren in 1990, 1995 en 2000.

4.1.1.3 Evolutie van de eenheidsgrootte van WKK-installaties

Het totale opgestelde WKK-vermogen is sterk gestegen tussen 1990 en 2000, maar ook de grootte van de verschillende projecten kent een stijging. Onderstaande tabel geeft een overzicht.

	1990	1995	2000
Totaal WKK-vermogen	7931	27642	134602
Aantal WKK-projecten	30	79	166
Gemiddelde vermogen/project	264	350	811
Aantal motoren	44	101	230
Gemiddeld vermogen/motor	180	274	585

4.1.1.4 Verdeling WKK-vermogen per brandstof

Fig. 4.4 toont dat het aandeel van aardgas in het totale opgestelde vermogen met motoren sterk gestegen is. Tot 1995 was gasolie nog de belangrijkste brandstof, vanaf 1996 is dit aardgas.

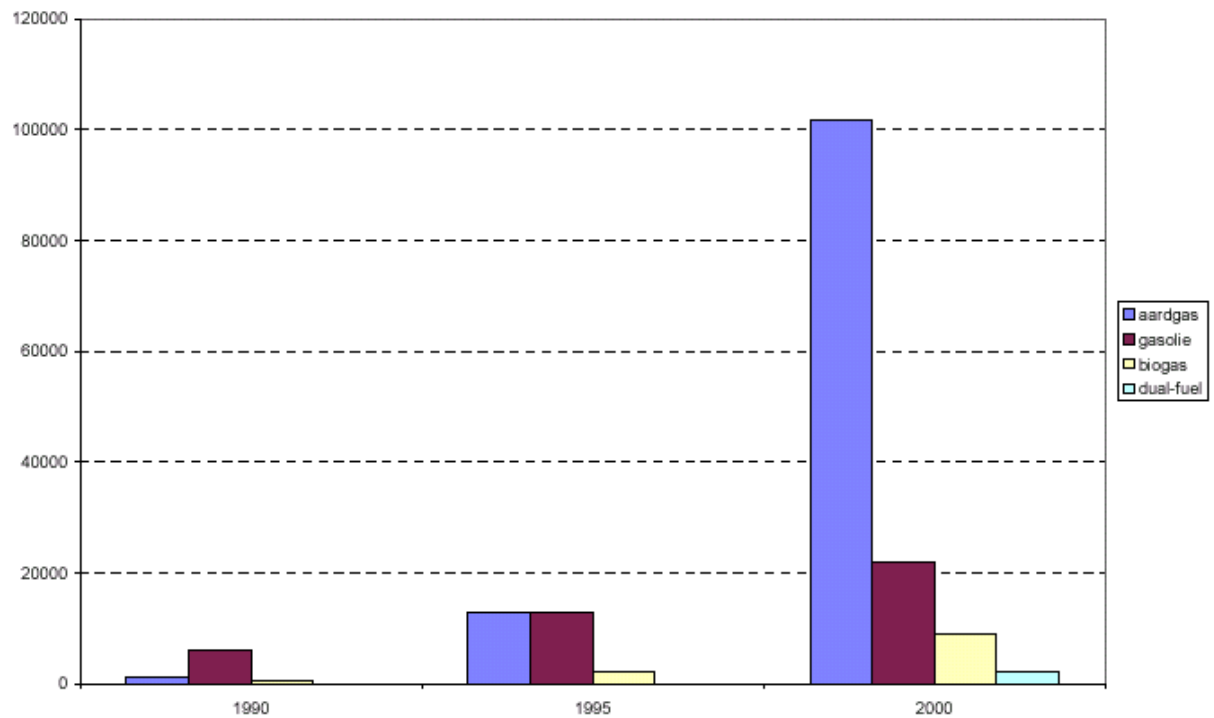


Fig. 4.4: Aandeel verschillende brandstoffen in 1990, 1995 en 2000

Fig. 4.5 geeft recentere verhoudingen aan tussen de gebruikte brandstoffen.

Aandeel brandstoffen

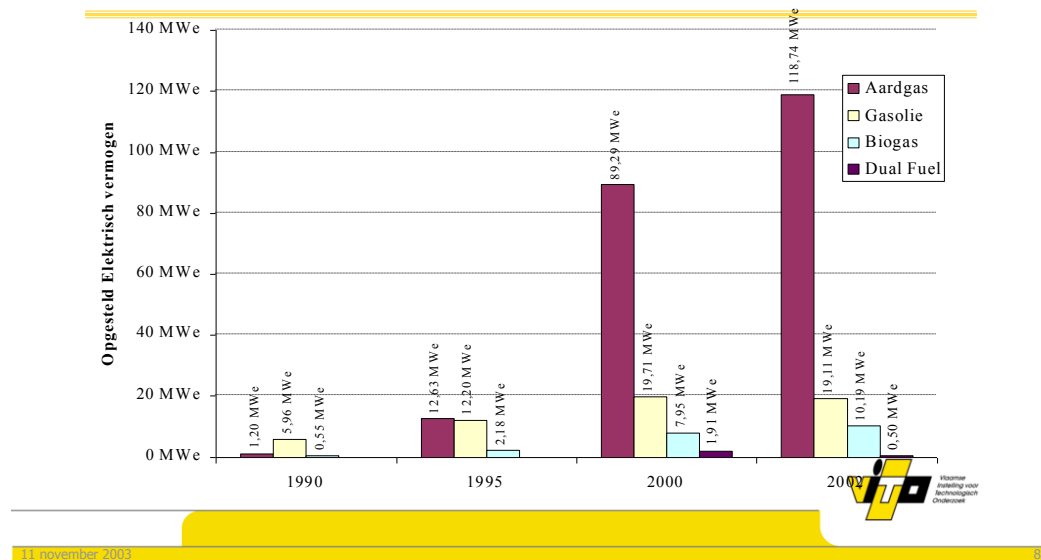


Fig. 4.5: Aandeel in verschillende brandstoffen in 1990, 1995, 2000 en 2002

4.1.1.5 Verdeling van het WKK-vermogen per beheersvorm

Figuren 4.6 en 4.7 geven een overzicht van de gehanteerde beheersvorm: eigen beheer of samenwerking met de elektriciteitsmaatschappij. Naar aantal projecten toe is eigen beheer nog steeds de meest frequente beheersvorm, naar opgesteld vermogen toe is samenwerking met de elektriciteitsmaatschappij echter de meest toegepaste beheersvorm wat duidt op een groter geïnstalleerd vermogen per project.

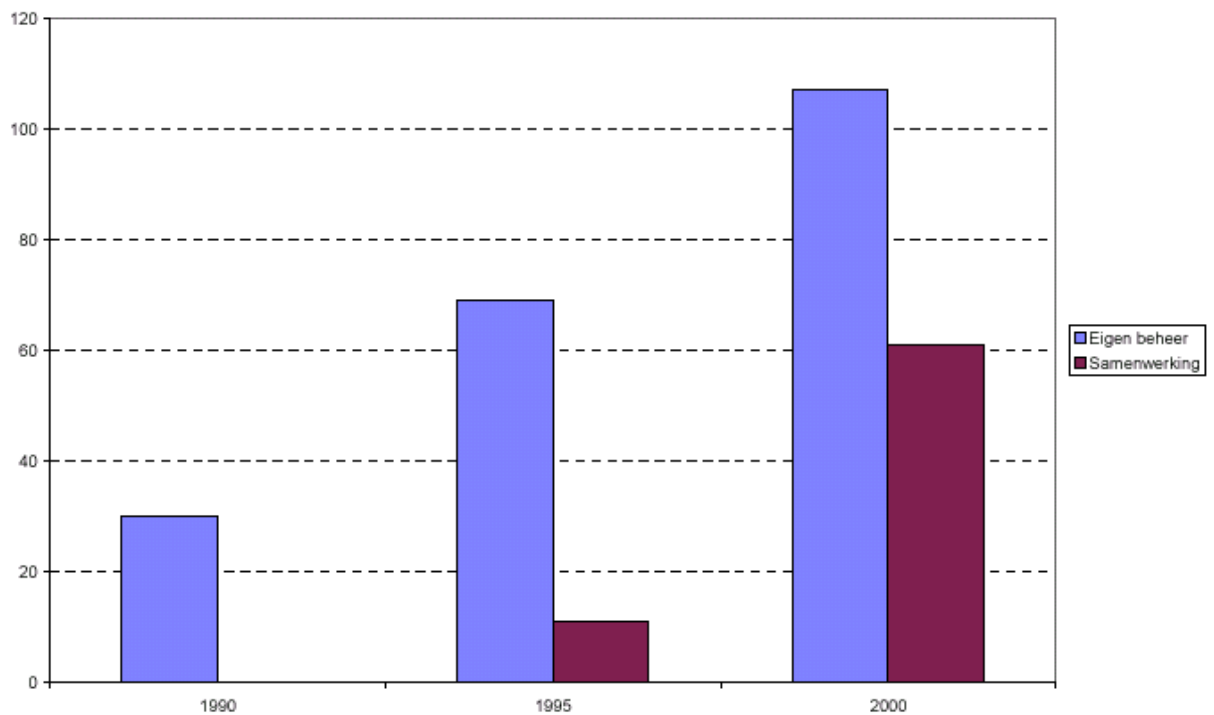


Fig. 4.6: Aantal WKK-projecten in 'eigen beheer' - 'samenwerking'.

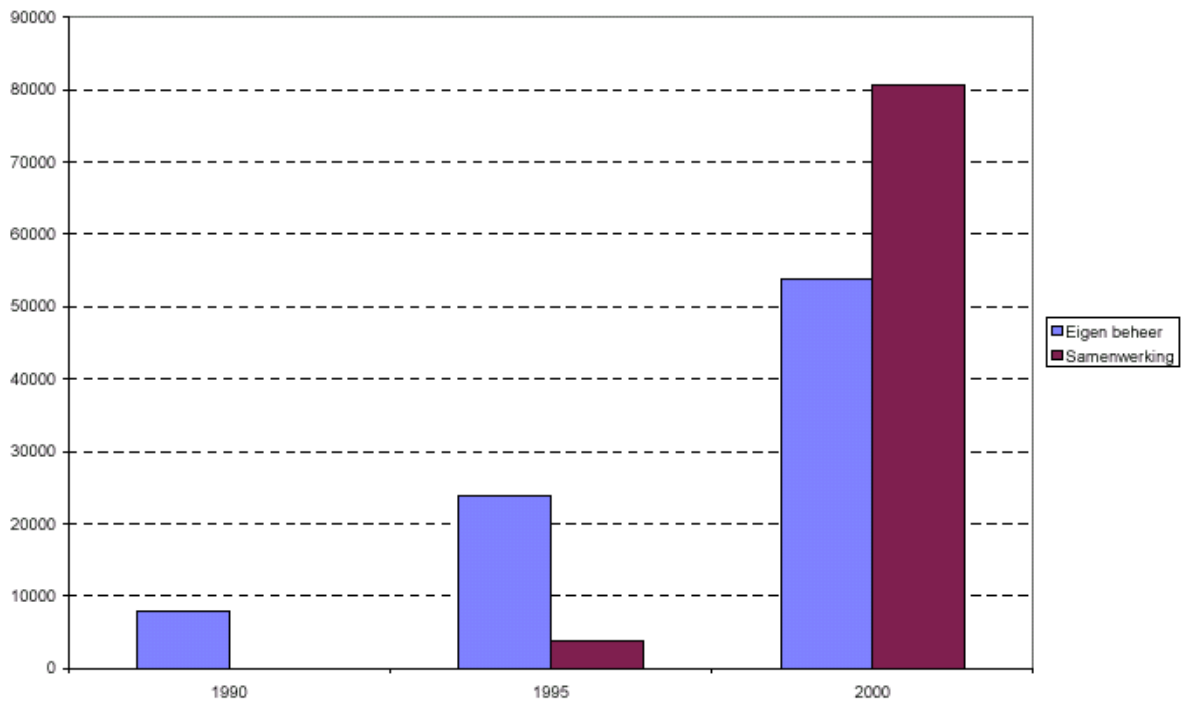


Fig. 4.7: Totaal opgesteld vermogen in eigen 'beheer'-'samenwerking'.

4.1.2 WKK met turbines

In 2000 werd in Vlaanderen een bijkomende WKK-installatie met turbine in bedrijf genomen, zodat het gerealiseerde vermogen in 2000 588 MW bedroeg. Alle WKK-installaties met turbines in Vlaanderen werden gebouwd in samenwerking met een energiebedrijf.

4.2 Besluit

Op 10 jaar tijd is het aantal WKK-installaties met motoren gestegen van 7,9 MW naar 134,6 MW.

De belangrijkste tendensen hierbij zijn:

- De meeste installaties komen voor in de tuinbouw en de industrie waar in 2000 115 MW aan WKK-vermogen opgesteld was.
- De eenheids grootte van de installaties kende een evolutie in stijgende lijn. In 2000 had reeds 11 % van de motoren een vermogen van meer dan 1000 kW.
- Meer en meer installaties werken op aardgas: in 2000 bedroeg het aandeel van aardgas 76 %.
- Het merendeel van de projecten wordt nog steeds in eigen beheer uitgebraat. Op vermogenbasis is de energiesector echter de belangrijkste eigenaar van de WKK-installaties wat duidt op een groter geïnstalleerd vermogen per project.

Het opgestelde vermogen bij WKK-installaties met turbines bedroeg in 2000 in Vlaanderen 588 MW.

5 Vergunningen en subsidies

De investeringskost van een warmtekrachtkoppelinginstallatie is steeds erg hoog ongeacht welke technologie wordt gekozen. Om hieraan enigszins tegemoet te komen biedt de overheid steun voor investeringen in warmtekrachtkoppeling door middel van diverse systemen. Wanneer we het over de rol van de overheid hebben, dienen we uiteraard ook te vermelden dat een warmtekrachtkoppeling vergunningsplichtig is.

5.1 Vergunningen

Bij de realisatie van een warmtekrachtkoppelinginstallatie dienen een milieu- en een bouwvergunning ingediend te worden. Voor de milieuvergunning zijn een aantal aspecten van belang. Hierbij spelen vooral de emissies een rol. Er zijn grenswaarden opgelegd voor de uitstoot van CO, NO_x, SO_x, stof, ... en dit afhankelijk van de uitvoeringsvorm van de warmtekrachtkoppelinginstallatie en de brandstof die wordt verbruikt. Daarnaast zijn er ook nog bepalingen omtrent geluid en koelwater. Hoewel reeds eerder werd vermeld dat motoren op zich veel geluid produceren kan men door een goede geluidsisolerende omkasting de geluidsemissie van de installatie sterk beperken.

In principe is in bijna alle gevallen een bouwvergunning nodig voor een warmtekrachtkoppelinginstallatie. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat er soms een zeer lange tijd kan verlopen tussen de aanvraag en de toekenning hiervan. Daarnaast is het ook belangrijk om op te merken dat een bouw- en een milieuvergunning in veel gevallen aan mekaar gekoppeld zijn.

5.2 Subsidies

Warmtekrachtinstallaties vallen binnen een aantal subsidieprojecten die een veel ruimer toepassingsgebied hebben dan alleen maar warmtekrachtkoppeling.

Een eerste is de ecologiesteun, die valt binnen de Europese kaderregeling. Om van deze steun te genieten moet de som van het elektrische en twee derden van het thermische rendement 55 % zijn. De subsidie bestaat uit het terugbetalen van een deel van de meerkost van de gedane investering. Dit is het prijsverschil tussen twee mogelijke installaties waarvan de duurste – die wordt uitgevoerd – een extra milieuvoordeel geeft. De ecologiesteun dient aangevraagd te worden voor de aanvang van de investeringen.

Een tweede subsidieprogramma waar men als warmtekrachtkoppelingseigenaar van kan genieten, is de verhoogde investeringsaftrek. Dit is een fiscale steunmaatregel van het Ministerie van Financiën waardoor winst en baten worden vrijgesteld van belasting voor een bedrag dat gelijk is aan een percentage van een bepaalde bedrijfsinvestering. Deze maatregel geldt alleen voor nieuwe investeringen. In principe wordt de investeringsaftrek in een keer verleend, maar bepaalde belastingplichtigen kunnen deze desgewenst spreiden.

Een laatste vorm van algemene steunmaatregel die ook op warmtekrachtkoppeling van toepassing kan zijn, is de hulp aan demonstratieprojecten. Om hiervan te kunnen genieten moet het echter om een nieuwe technologie gaan of om de eerste toepassing van een bestaande technologie in een bepaalde sector. Een aantal warmtekrachtkoppelinginstallaties hebben reeds van deze steunmaatregel kunnen genieten en werden dus als demonstratieprojecten beschouwd. De grootte van de steun bedraagt maximaal 250.000 euro en loopt in praktijk meestal op tot 30 tot 35 % van de investering.

Naast deze algemene programma's bestaan er ook specifiek op warmtekrachtkoppeling gerichte steunmaatregelen. Hiermee bedoelen we natuurlijk de veelbesproken warmtekrachtkoppelingcertificaten. Het invoeren van een certificatenstelsel kadert in een reeks maatregelen i.v.m. de reductie van de CO₂-uitstoot. CO₂ is namelijk een belangrijk broeikasgas en dus medeverantwoordelijk voor de klimaatverandering, de opwarming van de aarde, het afsmelten van de ijskappen, ... Het protocol van Kyoto voorziet op termijn een gevoelige beperking van de uitstoot van CO₂. Het is duidelijk dat warmtekrachtkoppeling hieraan een steentje – zelfs een steen – kan tegemoetkomen. Maar ook een toename van het aandeel van hernieuwbare energiebronnen en een beperking van het energiegebruik kunnen in belangrijke mate bijdragen. Wat de warmtekrachtkoppelinginstallaties betreft, is het geïnstalleerde vermogen in Vlaanderen momenteel nog vrij beperkt. Voor het verkrijgen van certificaten moet een installatie voldoen aan een kwaliteitscriterium. Daarna kan het aantal certificaten bepaald worden op basis van de totale primaire energiebesparing. Dat is de hoeveelheid primaire energie die ten opzichte van een gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit wordt uitgespaard door een warmtekrachtkoppeling te gebruiken.

De certificaten worden maandelijks toegekend. Alle gegevens hieromtrent worden in een centrale databank bijgehouden. De referentierendementen, die gebruikt worden voor het bepalen van de energiebesparing, worden voor een gegeven installatie bevroren, zodat een WKK niet plots uit het systeem kan vallen door stijging van de referentierendementen.

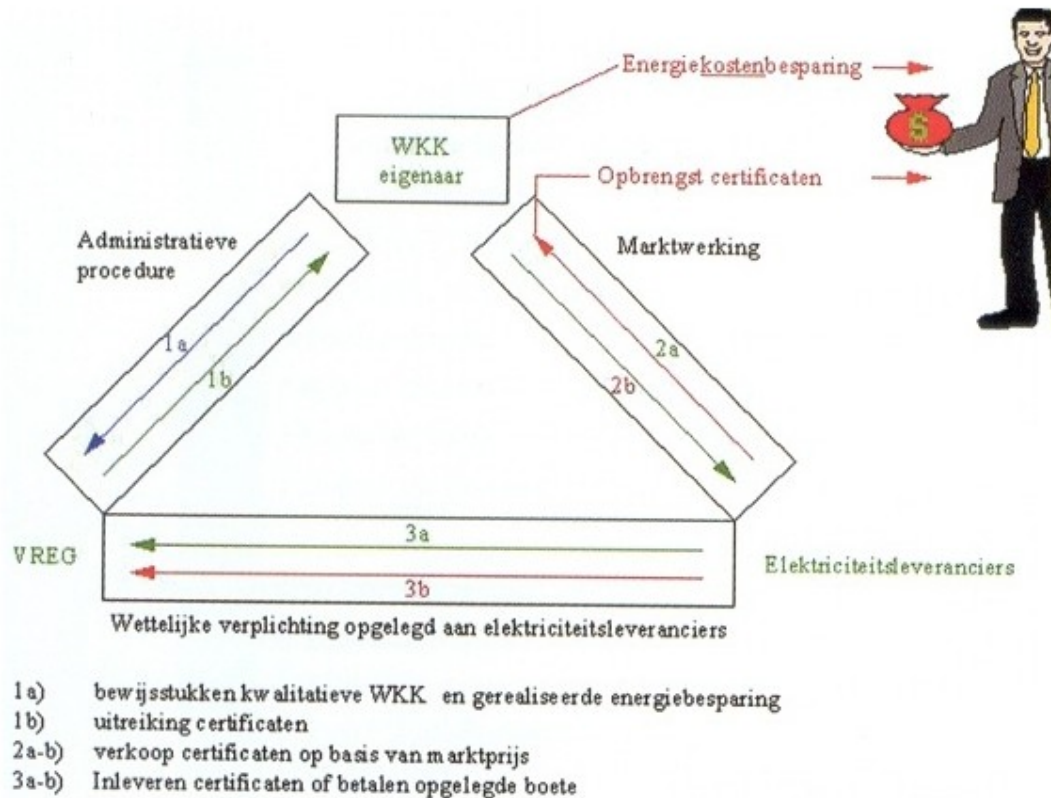


Fig 5.1: Certificaten regeling

6 Rendementsberekeningen

6.1 Algemeen

Wat is rendement?

Bij het doorlopen van een kringproces zijn begin- en eindtoestand dezelfde. Dat wil zeggen dat alle toestandsgrootheden weer dezelfde waarde verkrijgen. Bij toestandsveranderingen die achtereenvolgens worden doorlopen, zal warmte nu eens worden opgenomen, dan weer afgegeven. Ook de arbeid is gedurende een deel van het proces positief, tijdens het andere deel negatief. Voor een kringproces zijn de algebraïsche sommen van de toegevoerde warmtehoeveelheden, respectievelijk de afgevoerde arbeidshoeveelheden aan elkaar gelijk.

$$\Sigma Q = \Sigma W$$

Het thermische rendement van een kringproces is de verhouding van de nuttige arbeid W_n tot de hoeveelheid toegevoerde warmte Q_+ tijdens het beschouwde kringproces.

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{\Sigma Q_+}$$

$$\eta_{th} = \frac{(\Sigma Q_+ - \Sigma Q_-)}{\Sigma Q_+} = 1 - \frac{\Sigma Q_-}{\Sigma Q_+}$$

Q_+ = toegevoerde warmte

Q_- = afgevoerde warmte

$$\eta = \frac{\textit{nuttig}}{\textit{toegevoerd}} \quad (\text{Uitgedrukt in \%})$$

$$\eta_{el} = \frac{\textit{elektrische energie} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kWh}} \right]}{\textit{toegevoerde warmte} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kWh}} \right]}$$

$$\eta_{\theta} = \frac{\textit{thermische energie} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kWh}} \right]}{\textit{toegevoerde warmte} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kWh}} \right]}$$

6.2 Toepassing op rendement

Gegevens van de WKK in het PIH op 18 maart 2003.

	elektrische energie [kWh]	thermische energie [kWh]	gasverbruik [m ³]
8u30	2839407	4304112	894212
16u30	2841516	4307755	894833
Vershil	2109	3643	621

De waarden die we bekomen wanneer we het verschil nemen, zijn waarden voor een totale tijd van acht uur.

Wanneer we de waarden per uur willen weten, moeten we alles door 8 delen.

	elektrische energie [kWh]	thermische energie [kWh]	gasverbruik [m ³]
per uur	263,6	455,4	77,6

6.3 De verbrandingswaarde

Onder de verbrandingswaarde of de bovenste verbrandingswaarde (H_b) van een brandstof verstaan we de warmte in J (Joule) die vrijkomt bij een volledige verbranding van 1 kg brandstof waarbij de gevormde waterdamp condenseert tot water.

De verbrandingswaarde is afhankelijk van de chemische samenstellingen en de dichtheid van de brandstof en kan licht schommelen. De bovenste verbrandingswaarde duiden we aan met H_b (met condensatiewarmte). De onderste verbrandingswaarde duiden we aan met H_o (zonder condensatiewarmte).

Gezien het water bij een verbranding echter ook verdampt en hiervoor energie van de verbranding nodig is, heeft de verbrandingswarmte of bovenste verbrandingswaarde geen enkele praktische betekenis bij conventionele ketels. Alleen bij condensatieketels is de verbrandingswarmte belangrijk.

Onder de stookwaarde of de onderste verbrandingswaarde (H_o) van een brandstof verstaan we de warmte in J die vrijkomt bij een volledige verbranding van 1 kg brandstof waarbij de waterdamp in gasvormige toestand blijft.

Deze waterdamp zal bij de verbranding verdwijnen door de schouw. Het is een praktisch getal dat we gebruiken voor elke berekening bij conventionele ketels. Het is dan ook meestal de stookwaarde die we gebruiken voor de berekeningen.

$$\begin{aligned}\text{Berekenen van de toegevoerde warmte} &= H_o \times V_o \\ &= [\text{kJ/m}^3] \times [\text{m}^3_n] \\ &= [\text{kWh/m}^3_n] \times [\text{m}^3_n]\end{aligned}$$

6.4 De algemene gaswet

De algemene gaswet bespreekt de toestand van een afgesloten hoeveelheid gas waarbij zowel de druk p als de temperatuur T of het volume V veranderen.

Opstellen van de algemene gaswet:

Veronderstel dat de begintoestand van een afgesloten hoeveelheid gas gegeven wordt door P_1, V_1, T_1 . Na de reeks toestandsveranderingen wordt de eindtoestand gegeven door P_2, V_2, T_2 .

Om de relatie tussen begin- en eindtoestand te vinden maken we gebruik van een tussentoestand.

→ We bekijken de overgang van de begintoestand naar de tussentoestand.
Stel: de druk P_1 wijzigt zich tot P_2 terwijl de temperatuur constant blijft. Hierbij zal het volume veranderen van het beginvolume V_1 in een voorlopig volume V' , het tussenvolume.

$$P_0, V_0, T_0 \longrightarrow P_1, V', T_0$$

Onder deze voorwaarden geldt de wet van Boyle-Mariotte.

$$P_0 \times V_0 = P_1 \times V' \quad \text{bij } T = \text{constante}$$

$$V' = \frac{P_0 \times V_0}{P_1} \quad (1)$$

→ We bekijken de overgang van de tussentoestand naar de begintoestand.
Stel: de temperatuur T_0 wijzigt zich tot de temperatuur T_1 terwijl de druk constant blijft.

$$P_1, V', T_0 \longrightarrow P_1, V_1, T_1$$

Onder deze voorwaarden geldt de eerste wet van Gay-Lussac.

$$\frac{V'}{T_0} = \frac{V_1}{T_1} \quad \text{met } P = \text{constante}$$

$$V' = \frac{T_0 \times V_1}{T_1} \quad (2)$$

Door gelijkstelling van (1) en (2):

$$\frac{P_0 \times V_0}{P_1} = \frac{T_0 \times V_1}{T_1} \quad \Rightarrow \quad \frac{P \times V}{T} = \text{constante}$$

6.5 Bepalen van verbrandingswaarde uit factuur leverancier

Omdat de verbrandingswaarde van de leverancier afhankelijk is kan deze verschillende waarden aannemen.

De verbrandingswaarde staat op de factuur van de leverancier.

In het PIH te Kortrijk leverde dit de volgende cijfers op:

Onderste verbrandingswaarde	Bovenste verbrandingswaarde
10,4535486 kWh/Nm ³	11,5893 kWh/Nm ³

De bovenste verbrandingswaarde hebben we uit de factuur van het PIH Kortrijk gehaald.

De onderste verbrandingswaarde is altijd gelijk aan 0,902 x bovenste verbrandingswaarde

6.6 Bepalen van V_0

$$V_0 = \left(\frac{P_1}{P_0} \times \frac{T_0}{T_1} \right) \times V_1 = \left(\frac{1,053}{1,013} \times \frac{273}{304} \right) \times 77,6 = 72,44 \text{ m}^3$$

P_1 = de druk in de leidingen

Uit tabellen volgt dat er 295 mbar overdruk is.

Daaruit volgt dat $p = 1,013 + 0,0295 = 1,053$ bar

P_0 = de luchtdruk (altijd 1,013 mbar)

T_0 = de buitentemperatuur (we nemen 0 °C of 273 K)

T_1 = de temperatuur in de leidingen

Op 18 maart 2003 was er een temperatuur van 31 °C of 304 K

V_1 = het verbruikte volume gas (zie 6.2)

6.7 Bepalen van de toegevoerde warmte

$$Q_{toeg} = H_o \times V_0 = 0,902 \times 11,5893 \times 72,44 = 757,255 \text{ kWh}$$

H_o hebben we vroeger in dit werk bepaald (zie 6.5).

Voor V_0 : zie 6.6.

6.8 Bepalen van het elektrische rendement

$$\eta_{el} = \frac{\text{elektrische energie}}{\text{toegevoerde warmte}} = \frac{263,6 \text{ [kWh]}}{757,3 \text{ [kWh]}} = 34,8 \%$$

We kunnen het elektrische rendement bepalen door het aantal kWh gegenereerd door de generator te delen door de toegevoerde warmte. Volgens de leverancier moet er een minimaal elektrisch rendement zijn van 33,3 %. De machine voldoet aan deze eis.

6.9 Bepalen van het thermisch rendement

$$\eta_Q = \frac{\text{thermische energie}}{\text{toegevoerde warmte}} = \frac{455,4 \text{ [kWh]}}{757,3 \text{ [kWh]}} = 60,1 \%$$

We kunnen het thermische rendement bepalen door het aantal kWh gegenereerd door de warmte bij warmtewisselaar 1 te delen door de toegevoerde warmte. Volgens de leverancier moet er een minimaal thermisch rendement zijn van 55,3 %.

De machine voldoet ook hier weer aan de eis.

6.10 Berekenen van het totale rendement

$$\begin{aligned}\eta_{\text{tot}} &= \eta_Q + \eta_{el} \\ &= 60,1 \% + 34,8 \% \\ &= 94,9 \%\end{aligned}$$

Deze machine heeft een rendement van 94,9 % bij vollast terwijl de leverancier een rendement voorschreef van 88,6 %.

Dit betekent dat de machine ruim voldoet aan de eisen.

6.11 Rendementsberekening bij een lagere temperatuur in de leidingen

We nemen de temperatuur 5 °C lager dan de vorige keer. De temperatuur is nu 26 °C of 299 K.

In de eerste plaats bereken we V_0 , want deze is afhankelijk van de temperatuur in de leidingen.

$$V_0 = \left(\frac{P_1}{P_0} \times \frac{T_0}{T_1} \right) \times V_1 = \left(\frac{1,053}{1,013} \times \frac{273}{299} \right) \times 77,6 = 73,65 \text{ m}^3$$

Hieruit bepalen we dan Q_{toeg} , want deze verandert ook doordat V_0 verandert.

$$Q_{\text{toeg}} = H_0 \times V_0 = 0,902 \times 11,5893 \times 73,65 = 769,9 \text{ kWh}$$

Daarna bepalen we het elektrisch rendement.

$$\eta_{\text{el}} = \frac{\text{elektrische energie}}{\text{toegevoerde warmte}} = \frac{263,6 \text{ [kWh]}}{769,9 \text{ [kWh]}} = 34,2 \%$$

Bepalen van het thermisch rendement.

$$\eta_{\text{Q}} = \frac{\text{thermische energie}}{\text{toegevoerde warmte}} = \frac{455,4 \text{ [kWh]}}{769,9 \text{ [kWh]}} = 59,15 \%$$

Het totale rendement is dan:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{tot}} &= \eta_{\text{Q}} + \eta_{\text{el}} \\ &= 59,15 + 34,2 \\ &= 93,3 \% \end{aligned}$$

Hieruit kunnen we besluiten dat het rendement toch sterk afhankelijk is van de temperatuur. Er is slechts een verschil van 5 K en het rendement is al gedaald met 1,6 %.

7 Uitlaatgassen.

7.1 Schoorsteenverliezen

Als we over schoorsteenverliezen spreken, bedoelen we de warmte die door de schoorsteen verloren gaat.

Om de warmte die door de schoorsteen gaat per kg brandstof te kennen gebruiken we volgende formule:

$$Q_{\text{schoorsteen}} = m_{\text{rookgassen}} \times c_{\text{rg}} \times (T_{\text{rg}} - T_{\text{vl}})$$

$Q_{\text{schoorsteen}}$ = warmte door de schoorsteen
 $m_{\text{rookgassen}}$ = de massa rookgassen in kg/kg_{brandstof}
 c_{rg} = de soortelijke warmte van de rookgassen
 T_{rg} = de temperatuur van de rookgassen
 T_{vl} = de temperatuur van de verbrandingslucht

De massa van de rookgassen wordt bepaald volgens:

$$m_{\text{rookgassen}} = m_{\text{lucht}} + m_{\text{brandstof}}$$

$$m_{\text{lucht}} = \text{luchtmassa voor de verbranding}$$

Omdat we de warmte per kg brandstof willen weten is $m_{\text{brandstof}} = 1 \text{ kg}$

$$m_{\text{rookgassen}} = m_{\text{lucht}} + 1$$

Tijdens het verbrandingsproces gaat er geen massa verloren:
de massa voor de verbranding = de massa na de verbranding

$$m_{\text{rookgassen}} = \text{SLM} + \text{LO} + 1$$

SLM = de stochiometrische luchtmassa

LO = luchtoverschot

en

$$\lambda = \frac{TLM}{SLM} = \frac{SLM + LO}{SLM}$$

$$\text{dus } \text{SLM} + \text{LO} = \lambda \times \text{SLM}$$

λ = de luchtoverschot verhouding = de totale luchtmassa delen door de stochiometrische luchtmassa

$$m_{\text{rookgassen}} = \lambda \times \text{SLM} + 1$$

In volgende grafiek tonen we de theoretische verhouding van luchtoverschot met O_2 , CO , CO_2 en NO_x :

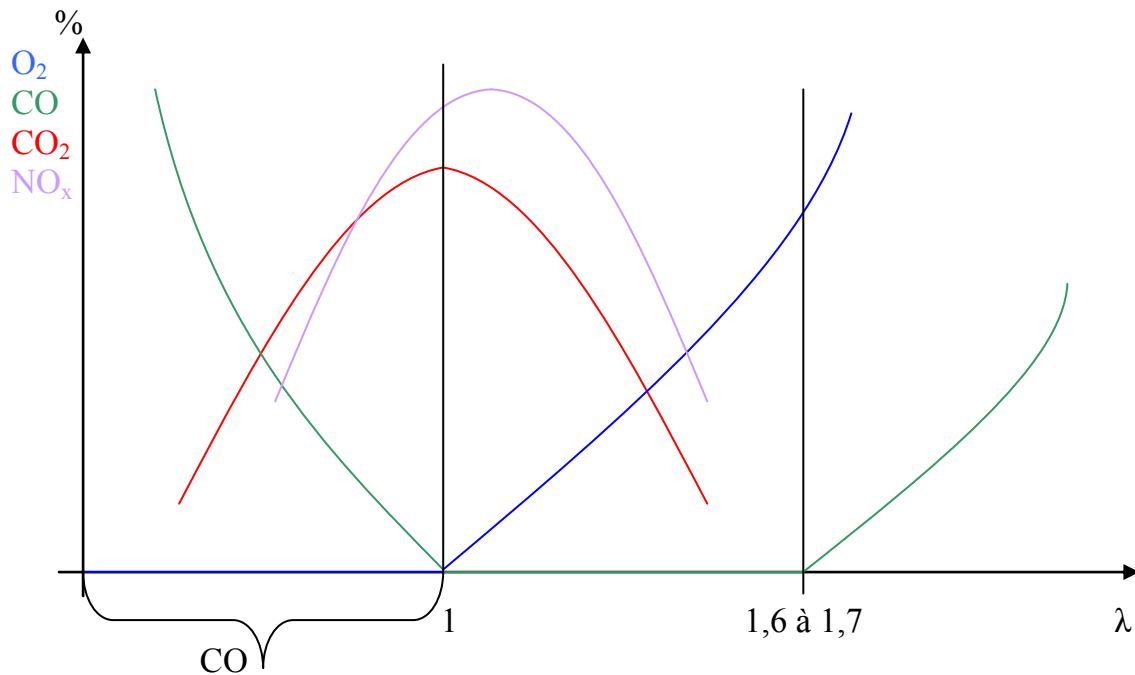


Fig 7.1: Certificaten regeling verhouding van luchtoverschot met O_2 , CO , CO_2 en NO_x

Opmerkingen:

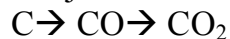
Men stelt de motor meestal zo af dat er een minimum O_2 of een maximum CO_2 gevormd wordt zonder de vorming van CO .

Als $\lambda < 1$, is er lucht te kort voor de verbranding. Met als gevolg dat er geen zuurstof over is voor de verbranding. Hierdoor verkrijgt men CO .

Als $\lambda = 1$, is dit de maximale CO_2 omzetting. Dit noemen we de stochiometrische verbranding

Als $\lambda > 1$, hebben we het absolute cijfer van de CO_2 , maar in % daalt de CO_2 , want er is meer luchttoevoer waardoor er zich meer rookgassen vormen.

Als je koolstof verbrandt, gebeurt het volgende:



Bij de overgang van CO naar CO_2 is er een temperatuur van minstens $800\text{ }^\circ\text{C}$ nodig. Als deze temperatuur lager ligt doordat er bijvoorbeeld te veel lucht is toegevoerd ($\lambda \gg 1$), zal er zich geen CO_2 , maar CO vormen.

In de praktijk is O_2 en de CO bij $\lambda = 1$ niet gelijk aan nul, maar wordt er nog een klein beetje O_2 en CO gevormd.

7.2 Brandstofsamenstelling

De gegevens over de samenstelling van het aardgas halen we uit de gaskarakteristieken van Distrigas N.V. (leverancier PIH) in maart 1996.

Samenstelling aardgas in [% mol]	Aantal % koolstof C na verbranding	Aantal % waterstof H na verbranding
1,08 % N ₂ 0,223 % O ₂ 86,083 % CH ₄ 9,783 % C ₂ H ₆ 2,213 % C ₃ H ₈ 0,507 % C ₄ H ₁₀ De rest is verwaarloosbaar klein	N ₂ verbrandt niet O ₂ verbrandt niet	N ₂ verbrandt niet O ₂ verbrandt niet
Σ = 99,889 %		

Om het percentage van koolstof en waterstof te kennen moeten we de relatieve hoeveelheid van C en H per product bepalen.

$m_C = 12 \text{ kg}$: atoommassa van koolstof
 $m_H = 1 \text{ kg}$: atoommassa van waterstof

De totale massa van CH₄ = $m_C + 4 \times m_H = 16 \text{ kg}$
→ 12/16 is de verhouding koolstof en 4/16 is de verhouding van waterstof.

De totale massa van C₂H₆ = $2 \times m_C + 6 \times m_H = 30 \text{ kg}$
→ 24/30 is de verhouding koolstof en 6/30 is de verhouding van waterstof.

De totale massa van C₃H₈ = $3 \times m_C + 8 \times m_H = 44 \text{ kg}$
→ 36/44 is de verhouding koolstof en 8/44 is de verhouding van waterstof.

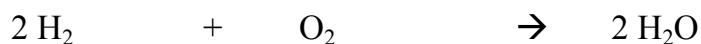
De totale massa van C₄H₁₀ = $4 \times m_C + 10 \times m_H = 58 \text{ kg}$
→ 48/58 is de verhouding koolstof en 10/58 is de verhouding van waterstof.

Samenstelling aardgas in [% mol]	Aantal % koolstof C na verbranding	Aantal % waterstof H na verbranding
1,08 % N ₂	N ₂ verbrandt niet	N ₂ verbrandt niet
0,223 % O ₂	O ₂ verbrandt niet	O ₂ verbrandt niet
86,083 % CH ₄	0,86083 x 12/16 = 0,6456	0,86083 x 4/16 = 0,2152
9,783 % C ₂ H ₆	0,09783 x 24/30 = 0,0783	0,09783 x 6/30 = 0,0196
2,213 % C ₃ H ₈	0,02213 x 36/44 = 0,0181	0,02213 x 8/44 = 0,0040
0,507 % C ₄ H ₁₀	0,00507 x 48/58 = 0,0042	0,00507 x 10/58 = 0,0009
	ΣC = 0,7462	ΣH = 0,2397

7.3 Bepalen van de stochiometrische luchtmassa SLM

Lucht bestaat uit: 21,0 volumeprocent O₂
23,2 massaprocent O₂
79,0 volumeprocent N₂
76,8 massaprocent N₂

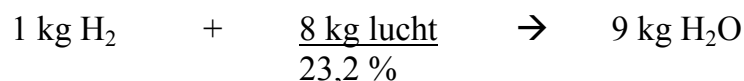
- Verbranding van diwaterstof (H₂)



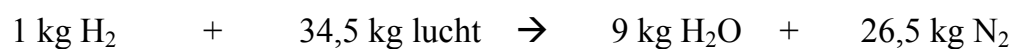
Vereenvoudigd:



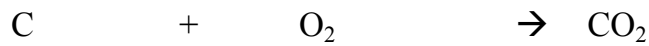
We kunnen de zuurstof ook uitdrukken in lucht (23,2 % van lucht bestaat uit O₂):



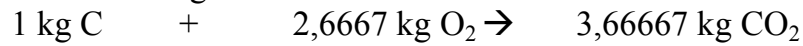
Als we lucht hebben, krijgen we ook stikstof die de massa's weer in evenwicht moet brengen. We hebben 34,5 kg lucht nodig waarvan 8 kg O₂ is, 35,5 kg – 8 kg = 26,5 kg N₂. Dit is de hoeveelheid stikstof die vrijkomt.



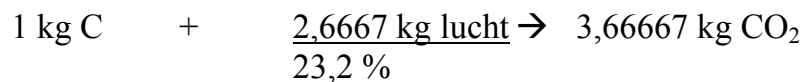
- Verbranding van koolstof C



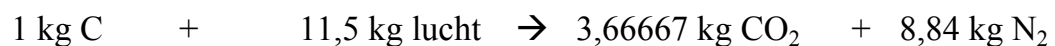
Vereenvoudigd:



We kunnen de zuurstof ook uitdrukken in lucht (23,2 % van lucht bestaat uit O₂):



Als we lucht hebben, krijgen we ook stikstof die de massa's weer in evenwicht moet brengen. We hebben 11,5 kg lucht nodig waarvan 2,6667 kg O₂ is? 11,5 kg – 2,6667 kg = 8,84 kg N₂. Dit is de hoeveelheid stikstof die vrijkomt.



fractie	aandeel (% in brandstof)	nodige zuurstof O ₂ [kg/kg _{brandstof}]	verbrandingsproducten [kg/kg _{brandstof}]		
			H ₂ O	CO ₂	N ₂
C	0,7462	0,7462 x 2,6667 = 1,99	/	0,7462 x 3,66667 = 2,736	0,7462 x 8,84 = 6,596
H ₂	0,2397	0,2397 x 8 = 1,918	0,2397 x 9 = 2,157	/	0,2397 x 26,5 = 6,352
N ₂	0,0108	rechtreeks naar uitlaatgassen	/	/	0,0108
CO ₂	0,00223		/	0,00223	/
	Σ = 1	Σ = 3,908 kg O ₂	Σ = 2,157 kg H ₂ O	Σ = 2,738 kg CO ₂	Σ = 12,959 kg N ₂
			Σ = 15,697 = DRG brandstof		
			Σ = 17,854 = NRG brandstof		

We kunnen de zuurstof ook uitdrukken in lucht (23,2 % van lucht bestaat uit O₂):

$$SLM = \frac{3,908 \text{ kg O}_2}{23,2 \%} = 16,845 \text{ kg lucht/kg}_{\text{brandstof}}$$

Het maximum massaprocentgehalte CO₂ in droge rookgassen is dan:

$$\frac{2,738}{15,694} = 17,44 \%$$

Nu gaan we de massaprocenten omrekenen naar volumeprocenten:

fractie	massa%	<u>massa%</u> molaire massa	volume %
CO ₂	17,44	17,44 / 44 = 0,3964	0,3964 / 3,3450 = 11,85 %
N ₂	82,56	82,56 / 28 = 2,9486	2,9486 / 3,3450 = 87,94 %
	Σ = 100 %	Σ = 3,3450	Σ = 100 %

7.4 Bepalen van de rookgassen

Rookgasmetingen van 26 februari 1998

Rookgasanalyse:

omgevingstemperatuur = 17 °C

temperatuur rookgassen = 90 °C

CO = 431 mg

NO = 167 mg

NO_x = 394 mg

} te verwaarlozen

O₂ = 8,31 volumeprocent

CO₂ = 7,28 volumeprocent (berekend in toestel)

rest = N₂

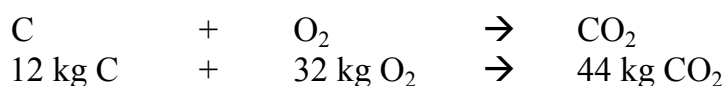
η = 85,1 % = rendement

verliezen = 14,9 %

LO = 59,4 % = luchtoverschot

λ = 1,594

Alle koolstof komt uit de brandstof, we kunnen dus de hoeveelheid brandstof per hoeveelheid rookgassen bepalen.



Per kg CO₂ is er 12/44 of 3/11 kg C gevormd, in 1 kg droge rookgassen is er 3/11 maal massaprocent CO₂ aan C aanwezig

$$\text{Massa droge rookgassen} = \frac{\text{massagehalte C in brandstof}}{\text{massagehalte C in rookgas}} \quad [\text{kg DRG/ kg}_{\text{brandstof}}]$$

$$\text{Massa droge rookgassen} = \frac{\text{massagehalte C in brandstof}}{3/11 \times \text{massaprocent CO}_2 \text{ in droge rookgassen}}$$

De hoeveelheid van CO₂ uit O₂ bepalen we uit de verbrandingsdriehoek.

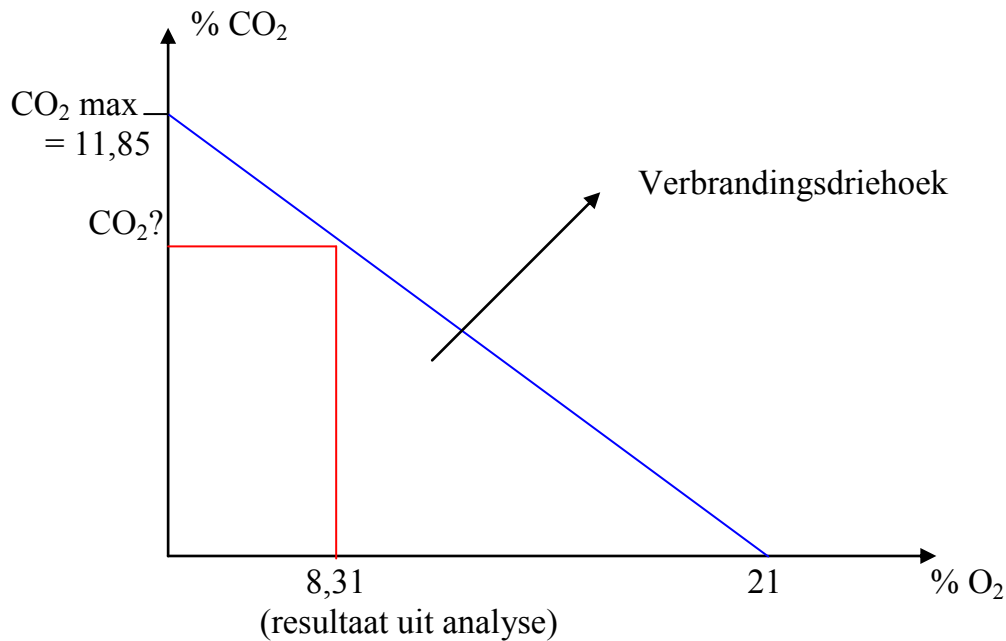


Fig. 7.2: Verbrandingsdriehoek

Opmerking:

De verbrandingsdriehoek geldt enkel als er geen CO gevormd wordt.

Bij zuivere lucht (21 % O₂) wordt geen CO₂ gevormd

Als de CO₂ 11,9 % is, is er geen overschot aan O₂ en is deze dus 0 %.

Uit gelijkvormige driehoeken:

$$\frac{CO_{2 \max} - CO_2}{CO_{2 \max}} = \frac{8,31}{21}$$

Dus:

$$CO_2 = CO_{2 \max} - CO_{2 \max} \times \frac{8,31}{21}$$

$$CO_2 = 11,85 - 11,85 \times \frac{8,31}{21} = 7,16 \text{ volume\%}$$

Nu gaan we het volumepercent omzetten naar het massaprocent in droge rookgassen.

fractie	volume%	vol% x molaire massa	massa%
CO ₂	7,16	7,16 x 44 = 315,04	315,04 / 2947,8 = 10,69 %
O ₂	8,31	8,31 x 32 = 265,92	265,92 / 2947,8 = 9,02 %
N ₂	84,53	84,53 x 28 = 2366,84	2366,83 / 2947,8 = 80,29 %
	Σ = 100 %	Σ = 2947,8	Σ = 100 %

$$\text{Massa droge rookgassen} = \frac{\text{massagehalte C in brandstof}}{3/11 \times \text{massaprocent CO}_2 \text{ in droge rookgassen}}$$

$$\text{Massa droge rookgassen} = \frac{0,7462}{3/11 \times 0,1069} = 25,595 \text{ kg DRG/ kg}_{\text{brandstof}}$$

We kunnen ook enkele controleberekening uitvoeren:

$$\text{O}_2\text{-overschot} = \text{droge rookgassen} \times \text{massagehalte O}_2$$

$$\text{O}_2\text{-overschot} = 25,595 \times 0,0902 = 2,309 \text{ kg / kg}_{\text{brandstof}}$$

$$\text{Luchtoverschot (LO)} = \frac{\text{O}_2 \text{ overschot}}{\text{massaprocent O}_2 \text{ in lucht}} \quad [\text{kg / kg}_{\text{brandstof}}]$$

$$\text{Luchtoverschot (LO)} = \frac{2,309}{0,232} = 9,953 \text{ kg / kg}_{\text{brandstof}}$$

$$\lambda = \frac{TLM}{SLM} = \frac{SLM + LO}{SLM} = \frac{16,845 + 9,553}{16,845} = 1,591$$

Het toestel geeft 1,594 aan.

We kunnen λ ook via benadering bepalen:

$$\lambda = \frac{CO_{2 \text{ max}}}{CO_{2 \text{ gemeten}}} = \frac{11,85}{7,28} = 1,628$$

$$\begin{aligned}
\text{massa natte rookgassen} &= \lambda \times \text{SLM} + 1 \\
&= 1,591 \times 16,845 + 1 \\
&= 27,80 \text{ kg} / \text{kg}_{\text{brandstof}} \\
&= \text{massa droge rookgassen} + \text{H}_2\text{O} \\
&= 25,595 + 2,157 \\
&= 27,752 \text{ kg} / \text{kg}_{\text{brandstof}}
\end{aligned}$$

7.5 Warmteverliezen

$$\begin{aligned}
Q_{\text{schoorsteen}} &= m_{\text{rookgassen}} \times C (T_{\text{rookgassen}} - T_{\text{verbrande lucht}}) \\
&= 27,80 \times 1,1 \times (90^\circ - 17^\circ) \\
&= 2232,34 \text{ kJ/kg}_{\text{brandstof}} (\text{verliezen})
\end{aligned}$$

We willen de warmteverliezen ten opzichte van de hoeveelheid brandstof kennen.

We bekijken enkele gegevens van in februari 1998.

De bovenste verbrandingswaarde $H_b = 42\,857 \text{ kJ/m}^3\text{n}$

De onderste verbrandingswaarde $H_o = 0,902 \times H_b$
 $= 38\,657 \text{ kJ/m}^3\text{n}$

(we gebruiken de onderste verbrandingswaarde voor het berekenen van het rendement)

Als we dit per kg willen weten dan delen we de verbrandingswaarde door de dichtheid (ρ) van het aardgas ($\rho = 0,8272 \text{ kg/m}^3\text{n}$):

$$\frac{H_a}{\rho} = \frac{38\,657 \text{ kJ/m}^3\text{n}}{0,8272 \text{ kg/m}^3\text{n}} = 46732,4 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{H_b}{\rho} = \frac{42857 \text{ kJ/m}^3\text{n}}{0,8272 \text{ kg/m}^3\text{n}} = 51809,7 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{\text{schoorsteen}} = \frac{2232,34}{46732,4} \times 100\% = 4,78\% \text{ ten opzichte van } H_o$$

De gemeten verliezen in het toestel kunnen we als volgt berekenen:

$$\begin{aligned}
&= \text{condensatieverlies (verschil tussen } H_o \text{ en } H_b) + \text{schoorsteenverlies} \\
&= 10\% + 4,78\% \\
&= 14,78\%
\end{aligned}$$

7.6 Emissiewaarden : volgens waarden VLAREM → TA lucht
(TA lucht normen: zie bijlage 9.6)

Gegevens van 28 januari 2004

$$\text{CO} = 374 \text{ mg/m}^3$$

$$\text{NO}_x = 722 \text{ mg/m}^3$$

$$\text{O}_2 = 7,87 \text{ volumepercent \% (geschat)}$$

$$\text{O}_2\text{-norm} = 5 \%$$

$$E_b = \frac{21 - O_b}{21 - O_m}$$

b = referentie

m = gemeten mg/m^3

$$\text{CO}_{ref} = E_b \times 374 = \frac{21 - 5}{21 - 7,87} \times 374 = 455,75 \text{ mg/m}^3$$

→ de normen: 650 mg/m^3

$$\text{NO}_x = E_b \times 722 = \frac{21 - 5}{21 - 7,87} \times 722 = 880 \text{ mg/m}^3$$

→ de normen: 1300 mg/m^3

Emissies volgens waarden van VLAREM

Vroeger toegelaten (voor 1 januari 2000). Geldig voor deze WKK.

$$\text{NO}_x \text{ max.} = 2600 \times \eta / 30 \text{ mg/Nm}^3$$

$$\text{CO max.} = 1300 \text{ mg/Nm}^3$$

Nu toegelaten (na 31 december 1999).

$$\text{NO}_x \text{ max.} = 500 \times \eta / 30 \text{ mg/Nm}^3$$

$$\text{CO max.} = 650 \text{ mg/Nm}^3$$

Om sommige gegevens te verkrijgen hebben we gebruik gemaakt van de volgende meters:

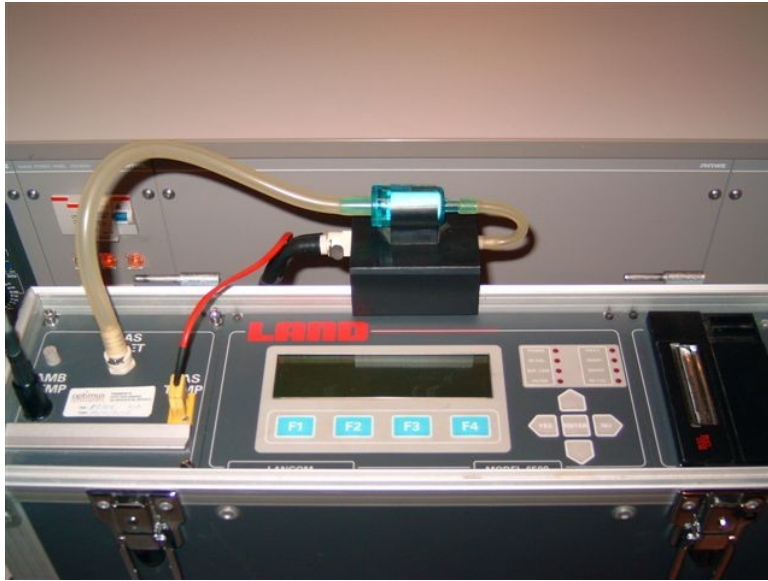


Fig. 7.3: De rookgasanalysator merk Lancom, type 6500

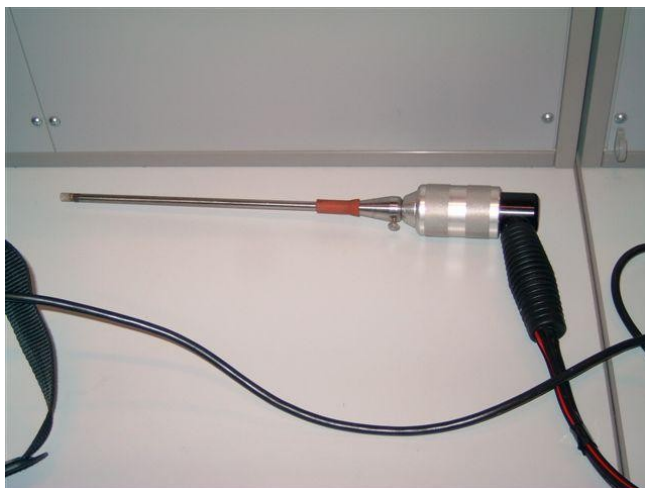


Fig. 7.4: De rookgassonde

8 Geluid

8.1 Wat is geluid?

Geluid ontstaat door trilling van een veerkrachtig lichaam. Het in trilling brengen kan door om het even welke trillingsbron. Geluid wordt pas waargenomen als er zich een elastische middenstof bevindt tussen ons oor (trommelvlies) en het trillend voorwerp. De geluidstrillingen worden vanaf het oor door zenuwimpulsen naar de hersenen gestuurd die ze interpreteren als geluid. De middenstof kan een gas, vloeistof of een vaste stof zijn. Geluid plant zich dus niet voort in een vacuüm. De overdracht van geluid gebeurt via longitudinale golven d.w.z. dat ze in dezelfde richting trillen als ze zich voortplanten. Geluidsgolven bestaan dus uit golven van regelmatige verdichtingen en verdunningen van een elastische middenstof.

8.2 Voortplantingssnelheid van het geluid

Geluid kan door elk medium worden overgedragen en alle geluidsgolven planten zich door elke stof bij constante temperatuur met een constante snelheid voort. De snelheid van het geluid door lucht van 20 °C is b.v. 334 m/s. Door sommige media gaat het geluid echter sneller afhankelijk van de elasticiteit en de dichtheid. Geluidsgolven gaan echter zeer moeilijk van het ene medium naar een ander over met een hogere of lagere dichtheid.

8.2.1 Voortplantingssnelheid in gassen

De geluidssnelheid werd voor het eerst gemeten tussen Montlhéry en Montmartre. Beurtelings werd er in één van deze plaatsen een kanonschot afgevuurd. In de andere plaats bepaalde men het tijdverloop tussen het zien van de losbranding en het horen van het schot. Uit de kennis van de afstand en van het tijdverloop kon men de geluidssnelheid berekenen. Door in beide richtingen te werken kon men de invloed van de wind elimineren.

8.2.2 Voortplantingssnelheid in vloeistoffen

De snelheid van het geluid in water werd gemeten op het meer van Genève. Als resultaat vonden ze 1435 m/s.

8.2.3 Voortplantingssnelheid in vaste stoffen.

Om voortplantingssnelheid in vaste stoffen te bepalen maakte men gebruik van de elastische eigenschappen van de stof.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ met } E \text{ is gelijk aan de elasticiteitsmodulus}$$

De voortplantingssnelheid in vaste stoffen kan oplopen tot hoger dan 5000 m/s.

8.3 Toonsterkte, intensiteit van een toon

Aan elke geluidstoon kan men een toonsterkte of intensiteit (I) toekennen. Deze toonsterkte kan men opvatten als de hoeveelheid trillingsenergie die per tijdseenheid en per oppervlakte-eenheid door het oor opgevangen wordt.

$$I = \frac{P}{A} = \frac{\text{trillingsenergie per sec (vermogen)}}{\text{oppervlak}} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

De energie van de toonsterkte is recht evenredig met het kwadraat van de amplitude van de trilling.

$$P = \frac{E}{t} = \frac{2\pi^2 \times m \times A_{mp}^2 \times f^2}{t}$$

Verwijdert men zich weg van de geluidsbron dan verzwakt het geluid. De uitgezonden trillingsenergie moet zich verdelen over golffronten waarvan de oppervlakte voortdurend groter wordt. De hoeveelheid energie die op het trommelvlies terecht komt, wordt dus kleiner als de afstand tot de bron groter wordt.

Wanneer het geluid op homogene wijze uitgezonden wordt, is de oppervlakte recht evenredig met het kwadraat van de straal:

$$A = 4\pi r^2$$

Omdat de intensiteit omgekeerd evenredig met de oppervlakte is, geldt:

$$I = \frac{P}{4\pi \times r^2}$$

Om de waargenomen toonsterkte uit te drukken gebruikt men een nieuwe grootheid, intensiteitsniveau of luidheidsniveau genoemd. Men kan aantonen dat de waargenomen toename van de geluidsintensiteit door het oor recht evenredig is met de logaritme van de uitgezonden intensiteit.

Intensiteitsniveau kunnen we als volgt definiëren:

$$L = \log \frac{I}{I_0}$$

I_0 : is een referentie-intensiteit die bij overeenkomst gelijkgesteld wordt aan 10^{-12} W/m^2 . Men noemt deze waarde de "gehoordrempel".

De eenheid voor intensiteitsniveau is de bel (B). In de praktijk gebruikt men echter de decibel (dB). Dan wordt de formule:

$$L = 10 \times \log \frac{I}{I_0}$$

Het intensiteitsniveau voor het menselijk oor is begrepen tussen 0 dB en 120 dB. Geluiden met een geluidsniveau groter dan 120 dB veroorzaken een pijnindruk.

Deze eenheid is een logaritmische waarde waardoor een verdubbeling van het geluidsniveau een verhoging van 3 dB oplevert.

8.4 Geluidsnormen voor een WKK-installatie

Een WKK-installatie moet voldoen aan bepaalde geluidsnormen. Die hangen af van in welk gebied de WKK-installatie gesitueerd ligt. De WKK in het PIH te Kortrijk bevindt zich in industriegebieden, dienstverleningsgebieden, gebieden voor gemeenschapsvoorzieningen en openbare nutsvoorzieningen.

gebied	milieukwaliteitsnormen in dB in openlucht		
	dag	avond	nacht
industriegebied	60	55	55

In bovenstaande tabel zien we dat er in een industriegebied een intensiteitsniveau van 60 dB geregistreerd mag worden.

We hebben door middel van een decibelmeter (fig 8.1) kunnen controleren of de WKK-installatie voldoet aan de eisen van de geluidsnormen.



Fig. 8.1: De geluidsmeter: een Ono Sokki LA-220

Toen we dit controleerden, maten we een intensiteitsniveau van 55,8 dB. De WKK-installatie voldoet bijgevolg aan de normen.

De installatie moet niet enkel voldoen aan de normen van de normen in openlucht, aan de normen binnen moet ook voldaan worden.

In het PIH te Kortrijk is de geluidsnorm zeer hoog (onder de 55 dB). Dit komt omdat ze in dit lokaal ook nog les geven. In het PIH maten we 44 dB.

9 Bijlagen

9.1	Verslag van bezoek aan PIH op 6 oktober 2003.....	70
	Onderwerp: kennismaking, algemene info, beschikbare technologieën	
9.2	Verslag van bezoek aan PIH op 12 november 2003.....	71
	Onderwerp: rendementsberekeningen	
9.3	Verslag van bezoek aan bedrijf E. Van Wingen op 14 januari 2004.....	72
9.4	Verslag van bezoek aan PIH op 28 januari 2004.....	73
	Onderwerp: rookgasanalyse en geluidsmetingen	
9.5	Verslag van bezoek aan WKK van Sint-Rembertziekenhuis op 7 april.....	74
9.6	Emissienormen – “TA Luft” normen.....	77

9.1 Verslag van bezoek aan PIH op 6 oktober 2003

Op maandag 6 oktober 2003 bezocht onze groep (Ward Debruyne, Kristof Sys en Frederik Van Dorpe) samen met onze mentor mevr. De Laere en met dhr. Verhaeghe het PIH in Kortrijk.

We hadden dhr. D'Hulster een mail gestuurd om te vragen of wij eventueel op maandagvoormiddag 6 oktober een eerste keer de WKK van dichtbij konden bekijken om zo makkelijker onze opzoekingen te begrijpen en te doorgronden.

Rond 8 uur vertrokken we met de bus richting PIH-Kortrijk en kwamen daar aan omstreeks 8 uur 45. De eerste veertig minuten kregen we samen met de leerkrachten een powerpointpresentatie voorgeschoteld rond de master-bachelorproblematiek. Rond 9 uur 50 kregen we dan een korte rondleiding in het PIH door dhr. D'Hulster waarbij hij enkele leslokalen toonde waar metingen worden gedaan op motoren, elektronica bestudeerd werd ... Rond half elf konden we dan kennis maken met dhr. Vanslambrouck.

Dhr. Vanslambrouck had zijn werk voorbereid en schotelde ons direct een bundeltje bladeren voor met daarin enkele figuren, grafieken en meetresultaten. We begonnen met het overlopen van enkele energiemogelijkheden (warmte en elektriciteit) met hun werkingsprincipe en hun rendement. Onder andere de stoomketel met tegendrukstoomturbine, gasturbine met recuperatiestoomketel en tegendrukstoomturbine (STEG-centrale), gasturbine met recuperatiestoomketel (WKK) kwamen ter sprake.

Hierna overliepen we het schema van de specifieke WKK in het PIH zelf waarbij we ook een overzicht kregen van de geplaatste meetpunten (temperatuur, druk ...). Nadien kregen we grafieken van de gebruikte energie op dag-, maand- en jaarbasis.

Tenslotte gingen we grafieken van de 6^{de} oktober zelf bekijken op de computer die continu meetstanden registreert en het verbruik binnen de scholengroep bepaalt. Spijtig genoeg hadden ze 's morgen een klein probleem gehad en was de WKK nog niet lang opgestart waardoor we een onvolledig beeld kregen. Nadien openden we de geluidsdempende deuren om de WKK met gasmotor eens te bekijken. Aan de uitlaat hebben we kunnen voelen dat er nog altijd vocht in zat.

Omstreeks 11 uur 30 moesten we ons bezoek stopzetten en keerden we terug richting Torhout.

9.2 Verslag van bezoek aan PIH op 12 november 2003

Op woensdag 12 november 2003 bezocht onze groep (Ward Debruyne, Kristof Sys en Frederik Van Dorpe) samen onze mentor mevr. De Laere het PIH in Kortrijk.

Dhr. Vanslambrouck had ons via een mail voorgesteld om op woensdag 12 november in het PIH samen te komen met alle groepen die het in hun GIP over de WKK hebben. De bedoeling van deze samenkomst was om via berekingen de energiebesparing die wij met onze WKK realiseren, aan te tonen. Dit ging gebeuren via meetgegevens die hij op de PC had opgeslagen. Hij vroeg ons om vooraf enkele begrippen op te zoeken die we zouden kunnen gebruiken om de energiebepaling beter te begrijpen: het rendement, de verbrandingswaarde (bovenste en onderste), de algemene gaswet en de hoeveelheid warmte nodig voor het opwarmen van een stof.

Rond 12 uur 45 vertrokken we met de auto richting PIH-Kortrijk en kwamen daar omstreeks 13 uur 20 aan, een tiental minuten voor tijd dus. In die tien minuten mochten we even rondkijken in het labo waar de WKK staat.

Dhr. Vanslambrouck vroeg eerst ons aan de andere VTI-leerlingen voor te stellen en te verwoorden wat we gingen doen met het onderwerp WKK, voor ons was dat een kleine praktische realisatie.

Hij begon met een algemeen begrip van rendement. Daarna wou hij overgaan naar een rendementsbepaling van een bepaalde dag. Hiervoor wou hij een dag kiezen waarvan hij alle gegevens (gasverbruik, temperaturen, drukken ...) wist en waarvan de WKK continu op vollast had gewerkt. Uiteindelijk had hij voorzien om het rendement van de 18^{de} maart van 2003 te berekenen en dit tussen 8 uur 30 en 16 uur 30. Hiervoor moesten we de database raadplegen om de opgemeten waarden af te lezen en dan te gebruiken. Na enkele berekeningen en een hele hoop uitleg kwamen we op een totaal rendement van 94,9 %, wat hij natuurlijk graag liet zien met de opmerking dat er een kleine foutenmarge moest ingerekend worden, want hij had de indruk dat zijn temperatuursensor een vijftal graden te hoog lag.

Na de berekeningen stelde hij een aantal onderwerpen voor om later op het jaar te doen:

- een geleid bezoek aan een WKK, hij dacht aan Gaselwest Kortrijk, omdat deze een absorptiekoeling heeft om koude te maken in plaats van warmte bijvoorbeeld tijdens de zomer
- een vrij bezoek aan een WKK
- een bezoek aan de constructeur van de WKK in het PIH
- een rookgasanalyse uit voeren in het PIH
- een geluids- en trillingsmeting uit voeren in het PIH

9.3 Verslag van bezoek aan bedrijf E. Van Wingen op 14 januari 2004

Op woensdag 14 januari 2004 bezocht onze groep (Ward Debruyne, Kristof Sys en Frederik Van Dorpe) en Thomas Janssens samen met onze mentor mevr. De Laere en met dhr. Verhaeghe het bedrijf E. Van Wingen langs de Ringvaart in Evergem.

Op 12 november 2003 hadden wij in het PIH afgesproken om een bezoek te brengen aan de constructeur van de warmtekrachtkoppelinginstallatie van het PIH, E. Van Wingen. Om definitief af te spreken had dhr. Vanslambrouck ons met een mail voorgesteld om op woensdag 14 januari eens samen te komen, wat wij dan ook aanvaardden.

Omstreeks 13u30 vertrokken we dan met de auto richting E. Van Wingen in Evergem. Daar kwamen we omstreeks 13 uur 35 aan, enkele minuutjes te laat, maar dit was geen probleem.

We begonnen het bezoek met een korte uitleg over de geschiedenis van het bedrijf gegeven door een werknemer. Daarna kregen we een kort overzicht van de verschillende WKK-installaties, de brandstofmogelijkheden (diesel, aardolie, biogas, benzine, ...) en waar de verschillende warmtewisselaars kunnen geplaatst zijn op de WKK.

Na dit overzicht maakten we een rondje in het bedrijf en bekeken we onder andere: de tekenbureaus, het testlokaal voor de WKK, de controlezaal voor WKK's, ...

Op het einde spraken we nog met dhr. Vanslambrouck of om op woensdag 28 januari 2004 een rookgasanalyse uit te voeren in het PIH.



9.4 Verslag van bezoek aan PIH op 28 januari 2004

Op woensdag 28 januari 2004 bezocht onze groep (Ward Debruyne, Kristof Sys en Frederik Van Dorpe) het PIH in Kortrijk.

Dhr. Vanslambrouck had ons op 14 januari in het bedrijf E. Van Wingen voorgesteld om samen te komen in het PIH om daar een rookgasanalyse uit te voeren op de WKK die daar gevestigd is en te vergelijken of die resultaten in orde waren met de Belgische (Vlarem II) en de Duitse (TA-Luft) emissie-wetten en het narekenen van de luchtvermaat en schoorsteenverliezen via de verbrandingstheorie alsook het uitvoeren van een geluidsmeting en die eveneens te vergelijken met de normen, maar dit enkel als er nog tijd over zou zijn. Hij had ons gevraagd om vooraf de begrippen verbranding van koolstof en waterstof (berekenen luchtmassa) en de omrekening van volumesamenstelling naar gassenstelling op te frissen.

Rond 12 uur 45 vertrokken we met de trein richting PIH in Kortrijk en kwamen daar omstreeks 13 uur 35 aan, enkele minuutjes te laat, maar de trein had een kleine vertraging.

Dhr. Vanslambrouck gaf ons om te beginnen een bundeltje met enkele meetresultaten van een tijdje geleden, hij dacht dat de rookgasmeter niet meer de correcte waarde zou opmeten, omdat de zuurstofsensor al een heel stuk overtijd was. In dat bundeltje zaten ook de gaskarakteristieken van maart '96, de Vlarem-emissies, de TA-Luftemissies en de geluidsnormen.

Hierna konden we aan de berekeningen beginnen. Eerst wilden we enkele waarden hebben, daarvoor hadden we de rookgasmeter nodig, maar zoals verwacht was de zuurstofsensor niet meer in goede staat en gaf dus een verkeerde waarde aan. Daarom hebben we de waarden van 26 februari 1998 genomen.

Rond 15 uur 45 hadden we de rookgasmetingen achter de rug en werd in groep beslist om ook nog de geluidsmeting uit te voeren. Daarvoor gingen we met de decibelmeter het geluid binnen en buiten meten om te kijken of deze in orde waren met de wetgeving. De decibels buiten waren een stuk hoger dan binnen, maar zoals we zelf konden vaststellen kwam dit zeker niet door de WKK, want die hoorden we buiten zelfs niet, maar wel door het geluid van de omgeving.

Op het einde spraken we af om nog een bezoek te brengen aan Gaselwest Kortrijk (met de absorptiekoeling), maar voor de definitieve datum zouden we nog een mail ontvangen.

9.5 Verslag van bezoek aan WKK van Sint-Rembertziekenhuis op 7 april 2004

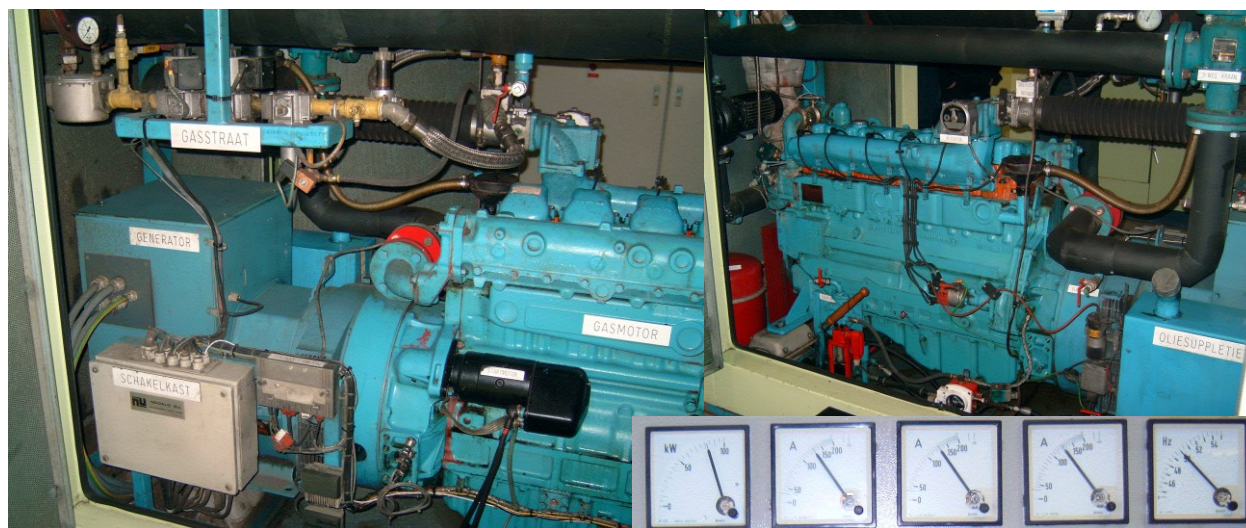
Op woensdag 7 april 2004 bezocht onze groep (Ward Debruyne, Kristof Sys en Frederik Van Dorpe) de WKK van het Sint-Rembertziekenhuis van Torhout.



Dhr. Vanslambrouck had ons aangeraden om op eigen initiatief een warmtekrachtkoppeling te bezoeken. Dit voorstel werd nog belangrijker toen een mogelijk bezoek aan Gaselwest Kortrijk afgevoerd werd omwille van organisatorische problemen. Kristof en Frederik hadden eerder al contact opgenomen met iemand van de technische dienst van het Sint-Rembertziekenhuis, namelijk Mr. Sinnesael Marc, om informatie over hun WKK op te vragen, dus het lag voor de hand dat we daar ook de WKK zouden gaan bekijken. We hadden met Mr. Sinnesael om 14 uur afgesproken aan de ingang van het ziekenhuis.

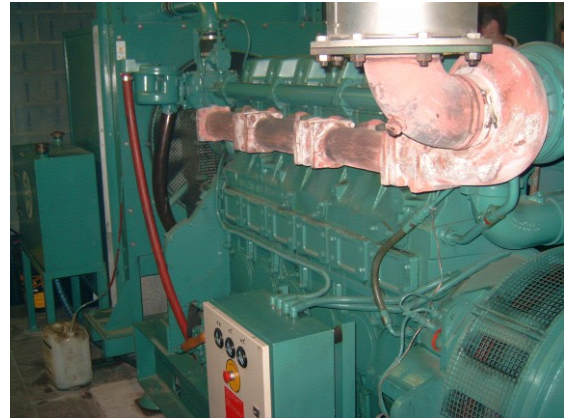
Het Sint-Rembertziekenhuis heeft twee warmtekrachtkoppelingen staan, één grote en één kleine, zodat ze makkelijk over kunnen schakelen naar een gevraagd vermogen. De kleine WKK kan een vermogen aan van 75 kW de grote WKK kan tot 175 kW gaan. Indien men een vermogen tot 75 kW nodig heeft, legt men enkel de kleine WKK aan, indien een vermogen tussen de 75 kW en 175 kW, legt men enkel de grote WKK aan. Als men een vermogen van meer dan 175 kW nodig heeft legt men beide aan, dit vermogen kan oplopen tot 250 kW.

Enkele foto's van de kleinere WKK:



Deze twee warmtekrachtkoppelingen staan parallel op het net. Dus de stroom wordt volledig aan het net geleverd en het ziekenhuis haalt dan hun nodige elektriciteit van het net. De warmte wordt wel volledig gebruikt voor het ziekenhuis. In de winter draaien de machines 24 op 24 in de zomer is dit een heel stuk minder (ongeveer 8 uur per dag). De kostprijs van zo'n machines, inclusief onderhoud, kwam in 1992 neer op 5 miljoen BEF (125000 €).

Na het bekijken van de warmtekrachtkoppeling gingen we ook nog kijken naar de noodgroep, wat eigenlijk ook een warmtekrachtkoppeling zou kunnen zijn, maar de warmte dat hierbij geproduceerd wordt, wordt rechtstreeks aan de omgeving uitgestoten en gebruikt men dus niet nuttig. Ook al omdat deze machine alleen maar wordt opgestart wanneer er nood is. Deze machine kan een vermogen aan van 352 kW, maar wanneer de machine parallel op het net is gekoppeld gaat men maar tot 175 kW. Indien de noodgroep rechtstreeks het ziekenhuis moet voorzien gaat deze dus tot 352 kW. Ter demonstratie stak Mr. Sinnesael eventjes de noodgroep aan en zagen we duidelijk dat het vermogen geleidelijk steeg tot 175 kW nadat de stroomleidingen eerst in fase waren gekomen met het net.



Ter afsluiting gingen we naar de hoogspanningscabine waar we zagen hoe de elektriciteit van het hoogspanningsnet werd gehaald en getransformeerd tot de gebruikelijke spanning.

Dit alles stond via een telefoonlijn in verbinding met de centrale in Harelbeke die kon controleren of de machine nog helemaal goed liep of als er geen fouten tijdens het proces optraden. Van daaruit kon men eventueel ook beslissen om de machine stil te leggen. Ook de twee gasmeters naar de WKK waren uitgerust met een elektronische teller die rechtstreeks doorgaven naar een centrale.



Omstreeks 15u10 hadden we de belangrijkste aspecten gezien en gehoord en keerden we huiswaarts.

9.6 Emissienormen – “TA Luft” normen

SAMENWERKINGSVERBAND VOOR ECONOMISCHE EN MILIEUVRIENDELIJK ENERGIEVERBRUIK

Vernieuwing van de “TA Luft 2002” – Gehalte voor WKK-installaties

De eerste algemene bestuursvoorschriften i.v.m. de Duitse emissiewet (technische aanduiding voor de zuiverheid van de lucht – TA Luft) is vanaf 1 oktober 2002 in kracht getreden. Sindsdien gelden onder andere enkele nieuwe grenswaarden van schadelijke stoffen van de uitlaatgassen van verbrandingsmotoren en gasturbines. De voorschriften gelden voor installaties met een brandstofwarmtevermogen vanaf 1 MW. De volgende tabel stellen de veranderingen voor WKK-installatie.

	Momentele "TA Luft" normen (geldig vanaf 1.10.2002)	Als vergelijking: Oude "TA Luft" normen (geldig tot 30.9.2002)
Gasmotoren		
NOx-grenswaarde *voor armemengselmotoren *voor andere 4-takmotoren	500 mg/m ³ 250 mg/m ³	500 mg/m ³ 500 mg/m ³
CO-grenswaarde *voor aardgas en andere gassen (buiten biogas)	300 mg/m ³	650 mg/m ³
Dieselmotoren		
NOx-grenswaarde *voor zelfverbrandingsmotoren ≥ 3 MA *voor zelfverbrandingsmotoren < 3 MA	500 mg/m ³ 1000 mg/m ³	2000 mg/m ³ 4000 mg/m ³
CO-grenswaarde *voor zelfverbrandingsmotoren	300 mg/m ³	650 mg/m ³
Stof-, partikelgrenswaarde *voor zelfverbrandingsmotoren	20 mg/m ³	130 mg/m ³
Gasturbines		
NOx-grenswaarde *voor gasturbines met aardgas	75 mg/m ³ (bij 70-100% van de last)	150 mg/m ³ (bij totale lastarbeid)
CO-grenswaarde *voor gasturbines	100 mg/m ³ (bij 70-100% van de last)	100 mg/m ³ (bij 100% van de last)

Gedetailleerde informatie over de grenswaarden van motoren- en turbine-installaties vind je in delen 5.4.1.4 en 5.4.1.5 van de “TA Luft”. Een volledige norm vind je op het internet onder <http://www.bmu.de/download/dateien/taluft.pdf>

10 Bronnen

→ Boeken:

- VERBEKE, R., *Symposion: rationeel energiegebruik door warmte-kracht koppeling voor Electrabel-Gaselwest Waregem*
- BULTEEL, P., *Warmtekrachtkoppeling, een middel tot rationeel energiegebruik*, 1996
- VAN NUFFEL, L., *Energie en milieu: warmtekrachtkoppeling*, 2003 1995
- KESTERS, L., *Promotie van warmtekrachtkoppeling voor Cogenvlaanderen*, september 2003
- VERHAEGHE, D., *Cursus fysica 3^{de} graad, 1^{ste} leerjaar*
- VERHAEGHE, D., *Cursus fysica 3^{de} graad, 2^{de} leerjaar*
- DE LAERE, M., *Cursus theoretische mechanica 3^{de} graad*

→ Internet:

- *COGEN VLAANDEREN VZW. Voor promotie van warmtekrachtkoppeling (WKK) in Vlaanderen*, internet, 2003-09, (<http://www.cogenvlaanderen.be>)
- *E. VAN WINGEN. Worldwide Diesel & Gas Power*, internet, 01-2004. (<http://www.vanwingen.be>)
- *DE BRAUWER, E., Cursus Thermodynamica*, internet, 09-2003. (<http://www.de-brauwier.be>)
- *DE KEUKELEERE, K., Onderzoeksdomeinen*, internet, 09-2003. (<http://www.vito.be/energie/energietechnologie.htm>)
- *WKK is de gecombineerde productie van warmte en kracht (Elektriciteit)*, internet, 2003-09 (<http://www.warmtekrachtkoppeling.be>)
- *Het milieu en informatiesysteem voor het Vlaamse Gewest*, internet, 2003-09 (<http://www.emis.vito.be>)
- *De warmtekrachtkoppeling (WKK)*, internet, 09-2003. (http://www.electrabel.be/smallmedium/productcenter/cogenerationsm_NL.asp)
- *Warmtekrachtkoppelingen in ziekenhuizen*, internet, 09-2003. (<http://www.vtdv.be/kring%20West-Vlaanderen/2002-dec-05%20verslag.pdf>)
- *Warmtekrachtkoppeling*, internet, 09-2003. (<http://www.agriholland.nl/dossiers/energie/wkk.html>)
- *Warmtekrachtkoppeling*, internet, 09-2003. (<http://europa.eu.int/scadplus/leg/nl/lvb/l27021.htm>)
- *Energiek Vlaanderen gaat hernieuwbaar*, internet, 09-2003. (http://www.argusmilieu.be/NEO/middenkrant/Alles/2002_energiek.htm)
- *Stroomopwekkende tegeltjes vormen energiebron van de toekomst*, internet, 09-2003. (<http://www.delta.tudelft.nl/jaargangen/29/25/carbo.html>)

- *Duurzaam bouwen voor militaire infrastructuur: warmtekrachtkoppeling*, internet, 2003-09
(http://www.mil.be/nv_vox_scripts/show_article_nl.asp?article_id=1662)
- *Warmte-Kracht-Koppeling, WKK*, internet, 2003-09.
(http://www.mech.kuleuven.ac.be/tme/research/energy/topics/cogen_nl.phtml)
- *Warmtekrachtkoppeling – inleiding*, internet, 2003-09.
(http://62.58.106.148/01_ons_bedrijf/01_05_hoe_werkt_het/01_05_03_wkk/01_wkk_intro.htm)
- *Energie binnen handbereik*, internet, 2003-09.
(<http://www.rwegas.nl/generator.php/50>)
- *Warmtekrachtkoppeling is verliesgevend voor papiersector*, internet, 2003-09
(<http://www.deenergiepas.nl/nieuws/maart/27032002a.htm>)

- **Besluit**

In het vijfde jaar waren we reeds bezig met het zoeken van een gepast onderwerp. Kristof en Frederik hadden een grote interesse voor motoren. Deze interesse is dan ook overgeslagen op Ward. We zochten een onderwerp met een praktische kant. We hadden enkele ideeën en daar is de warmtekrachtkoppeling uitgekomen. Dit onderwerp werd ons aangeraden door de heer Dirk Verhaeghe.

Half september 2003 zijn we dan met veel enthousiasme aan het onderwerp begonnen. We zijn gestart met het opzoeken van informatie op het internet en zijn zo in contact gekomen met enkele personen die ingegaan zijn op onze mails en die informatie hebben opgestuurd. We hebben dit onderwerp uitvoerig theoretisch behandeld (wat is WKK?, haalbaarheidsstudie, beschikbare technologieën, voor- en nadelen WKK ...) en we zijn tot de conclusie gekomen dat warmtekrachtkoppeling in de toekomst zeer belangrijk kan zijn.

Ondertussen waren we aan het nadenken wat we praktisch zouden kunnen realiseren. We hadden een voorstel gedaan aan onze mentor, mevrouw Miranda De Laere. Zij is met het plan naar de heer Luc Boone geweest en daarna kwam zijn voorstel om een viertaktmotor te gebruiken. Hij heeft de dieselmotor op statief gezet en daarop hebben wij dan enkele metingen en berekeningen uitgevoerd.

Nu ons eindwerk af is, zijn we tevreden en fier over wat we gedaan en bereikt hebben. We hebben een mooie theoretische uiteenzetting over een interessant onderwerp met een al even prachtige praktische realisatie. Gedurende heel het jaar hebben we ons met veel moed en het grootste plezier ingezet om van de G.I.P. te maken wat hij nu geworden is. We hebben geleerd dat samenwerken zeer belangrijk is voor de vooruitgang van de G.I.P.

Naast iedereen die ons geholpen heeft aan ons eindwerk willen we zeker ook elkaar bedanken voor onze goede samenwerking.

11 Logboek

In de eerste kolom vermelden we wie er aan het eindwerk heeft gewerkt, in de tweede vermelden we de datum. In de derde kolom komt wat we precies gedaan hebben. Dit logboek geeft niet exact weer hoeveel tijd we precies bezig geweest zijn of wat we heel precies gedaan hebben, het is enkel bedoeld om een idee te geven.

1 Woord vooraf

Wij bespreken in onze geïntegreerde proef de warmtekrachtkoppeling. Het theoretische stuk hebben we al uitgebreid besproken, maar daarnaast hebben we ook nog een praktisch gedeelte gemaakt. Dit zullen we in de volgende bladzijden bespreken.

Omdat we allemaal iets wilden realiseren hebben we een praktisch deel ingevoerd. Met dit voorstel gingen we naar mevrouw Miranda De Laere en die vond dit meteen goed. Nu was enkel nog de vraag: Wat gaan we realiseren?

Dan zijn we met een plan afgekomen om een motor van een bromfiets te gebruiken en daarmee elektriciteit op te wekken en de warmte nuttig te gebruiken om zo een warmtekrachtkoppeling weer te geven. Maar ons voorstel sprak ook de heer Luc Boone aan en samen met de leerlingen van de garage heeft hij dan voor ons een dieselmotor van een Ford Fiesta op statief geplaatst. Dit gebeurde voor de paasvakantie.

Tijdens de paasvakantie konden we dan beginnen aan het praktische gedeelte. We zijn begonnen met het aanbrengen van vijf temperatuurmeters, drie watertellers en een warmtewisselaar met ventilator. Met de gegevens van de metingen konden we enkele berekeningen maken.

We hadden graag wat plaats gemaakt voor een dankwoord in ons praktisch bundeltje. Op de eerste plaats mevrouw Miranda De Laere en de heer Luc Boone, omdat zij onze vragen steeds wisten te beantwoorden. Daarnaast bedanken we ook de heer Marc Beuselinck voor het leveren van de temperatuur- en watermeters. Tenslotte verdienen ook onze ouders een pluimpje voor het steeds beschikbaar zijn wanneer we iets materieels tekort hadden.

Inhoudstafel

Woord vooraf	81
Inhoudstafel 83	
1 Ondernomen stappen	84
1.1 Wat de leerling van de garage voor ons deden	84
1.2 Wat wij gerealiseerd hebben	84
2 Bespreken van de onderdelen	87
2.1 Warmtewisselaars	87
2.1.1 Algemeen	87
2.1.2 Onze warmtewisselaar	88
2.2 De radiator	90
2.2.1 Problemen en risico's	90
2.2.2 Radiatoren	90
2.2.3 Soorten koelingen	91
2.2.4 Koelcircuit bij een auto	91
2.3 Waterpomp	92
2.4 Reservoir	92
2.5 Uitlaat 93	
2.6 Waterteller	94
2.7 Temperatuursensoren	94
3 Dieselmotor	95
3.1 Algemeen	95
3.2 Voor- en nadelen van een dieselmotor	95
3.3 Verbrandingsmotoren	96
3.4 Nokkenas	98
3.5 Krukassen	98
3.6 De directe en indirecte inspuiting	100
3.6.1 De directe inspuiting	100
3.6.2 De indirecte inspuiting	101
4 Bedoeling van onze praktische realisatie	103
4.1 Bepalen toerental op rolantie	105
4.2 Berekening op warmtewisselaar	106
4.3 Berekening op radiator	111
4.4 Berekening op uitlaatgassen	112

Besluit 117

1 Ondernomen stappen

1.1 Wat de leerling van de garage voor ons deden

Voordat wij aan de slag konden, hebben de leerlingen van het 7^{de} jaar automechanica een motor van een Ford Fiesta op statief geplaatst. Ze hebben ook nog de radiator gemonteerd en een brandstoftank erop geplaatst.

Figuur 1.1 geeft weer wat deze leerlingen voor ons gerealiseerd hebben.

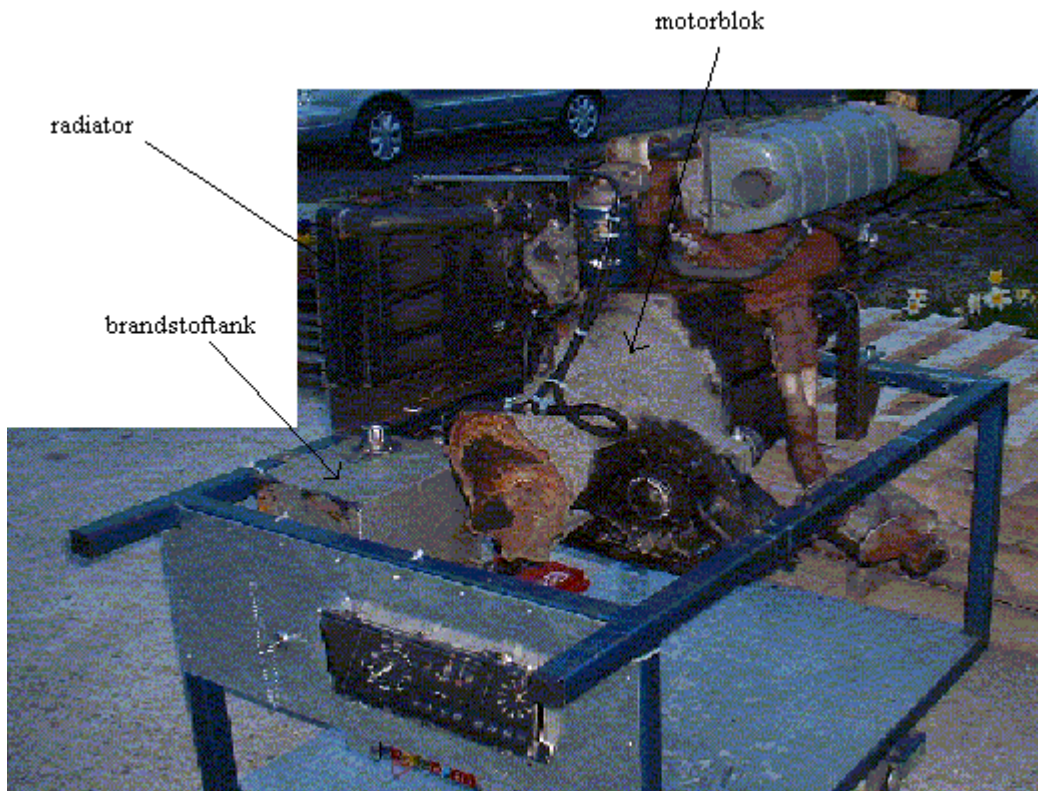


Fig. 1.1: Realisatie leerlingen automechanica

1.2 Wat wij gerealiseerd hebben

Daarna was het de bedoeling dat wij iets gingen realiseren. Dit hebben we in de paasvakantie aangepakt. We hebben er enkele dagen onze handen mee vol gehad en zijn tot een resultaat gekomen waar we heel fier op zijn. We hebben er namelijk een warmtewisselaar met ventilator geplaatst, vijf temperatuurmeters en drie watertellers.

Dit zien we in de volgende figuren.

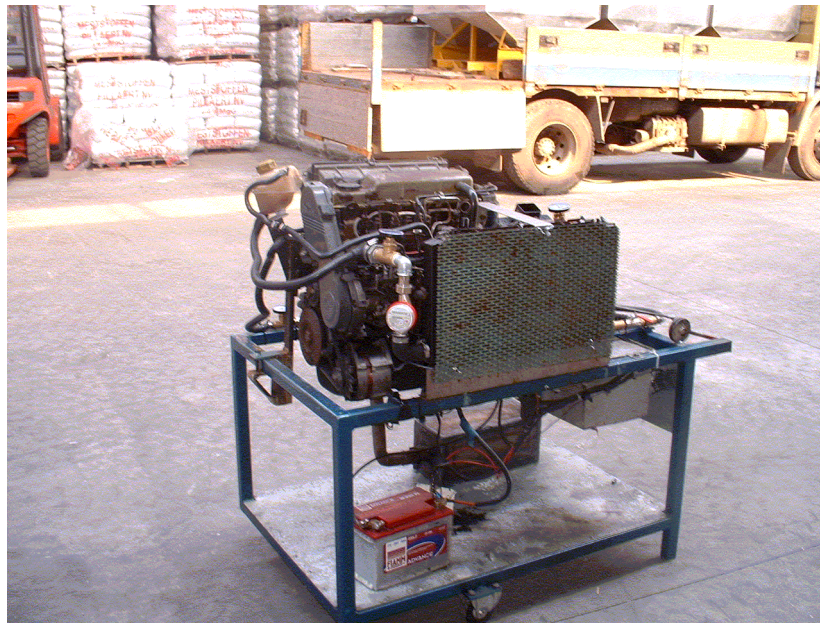


Fig. 1.2: Onze realisatie

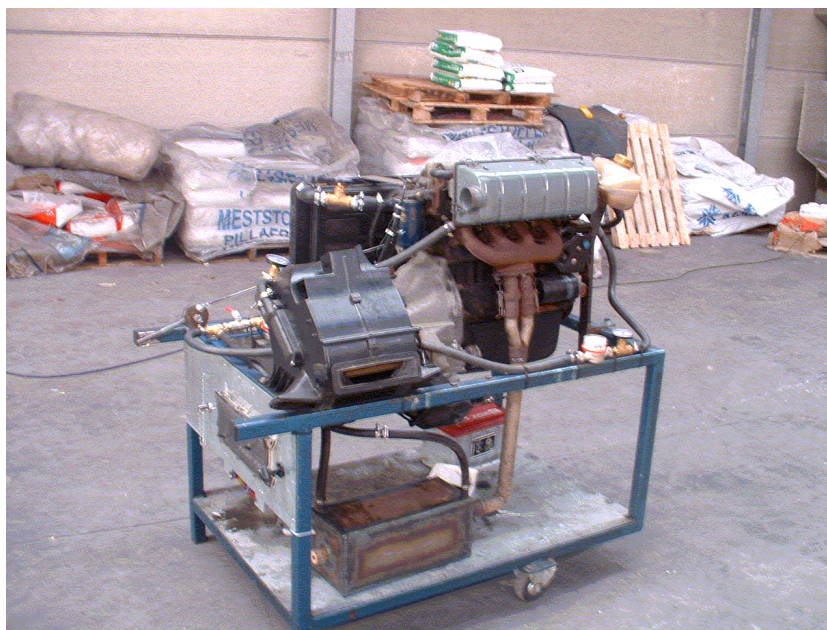


Fig. 1.3: Onze realisatie

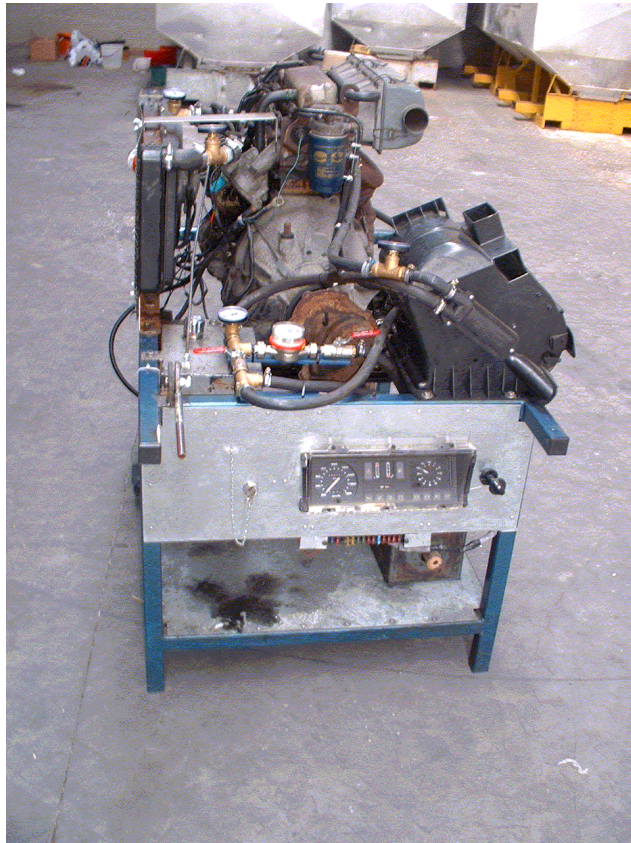


Fig. 1.4: Onze realisatie

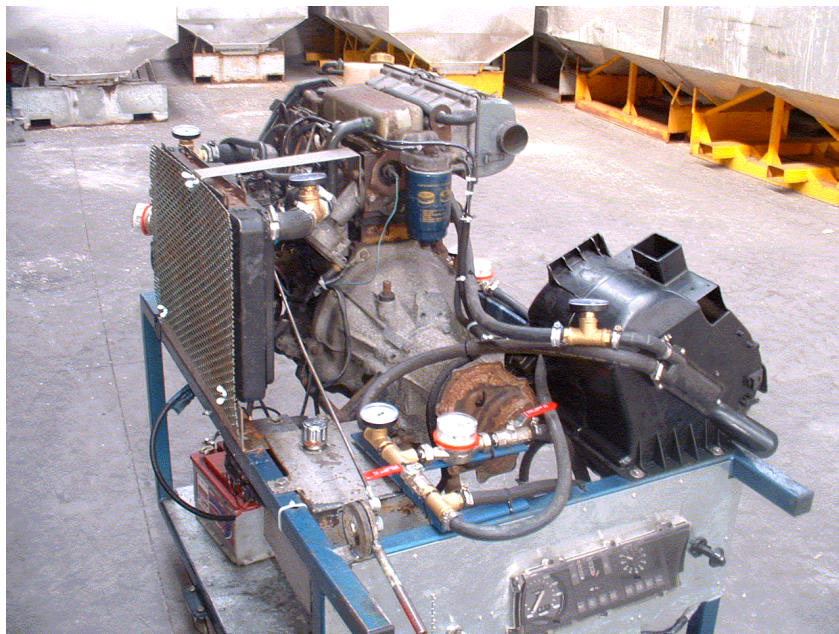


Fig. 1.5: Onze realisatie

2 Bespreken van de onderdelen

2.1 Warmtewisselaars

3.4.0 Algemeen

Een energie- of warmtewisselaar is een toestel dat speciaal gebouwd is om de warmte (of de koude) van een bepaald medium over te dragen op een koudere (of een warmere) massa. Deze media zijn gassen of vloeistoffen. Tussen de beide is een wand aanwezig die goed warmtegeleidend moet zijn en die daarom zo dun mogelijk is.

We kunnen de warmtewisselaars onderverdelen in twee soorten:

- gelijkstroomwarmtewisselaar
- tegenstroomwarmtewisselaar

- Een gelijkstroomwarmtewisselaar is een energiewisselaar waarbij langs beide zijden van een wand twee verschillende of identieke media stromen op een verschillende temperatuur. Dit gebeurt in dezelfde richting en dezelfde zin van de wand.

Het principeschema:

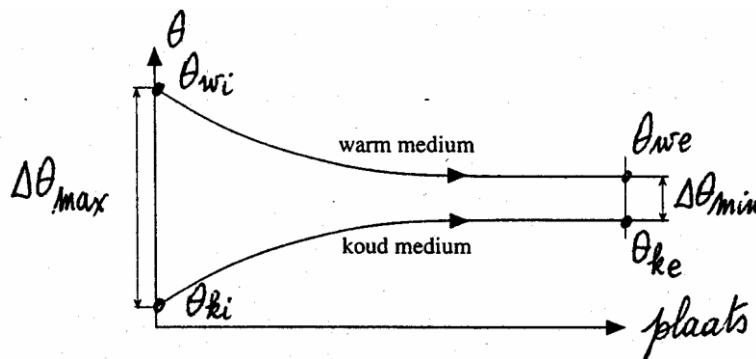


Fig. 2.1: Schema gelijkstroomwarmtewisselaar

Dit diagram duidt op de verticale as de temperatuur θ aan en op de horizontale as het afgelegde oppervlak A .

Het is de bedoeling om een warm medium kouder te maken door gebruik te maken van een koudere massa. Deze laten we langs het warme vloeien en daardoor zal het warme afkoelen en het koud medium opwarmen.

Enkele voorbeelden van gelijkstroomwarmtewisselaars zijn sanitaire boilers, luchtverwarming, verwarmingsketels en warmterecuperatietoestellen.

- Een tegenstroomwarmtewisselaar is een energiewisselaar waarbij langs beide zijden van een wand twee verschillende of identieke media stromen op een verschillende temperatuur en dit in dezelfde richting, maar in tegengestelde zin van de wand.

Het prinsipeschema:

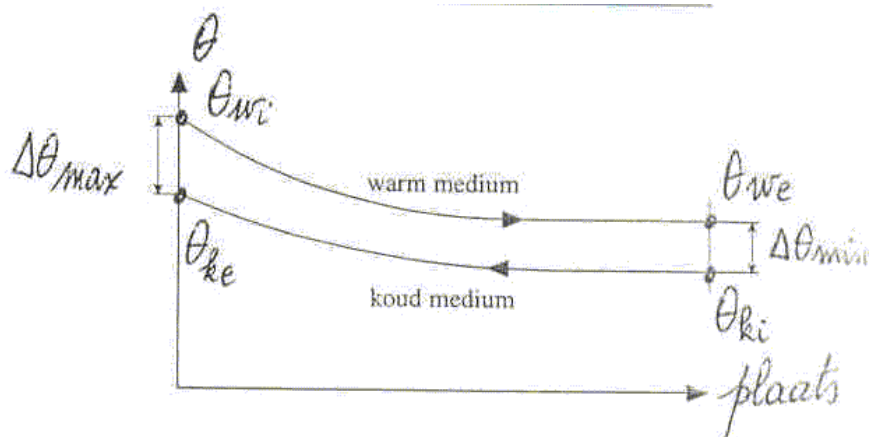


Fig. 2.2: Schema tegenstroomwarmtewisselaar

Beide media stromen in tegengestelde richting waardoor de uitgangstemperatuur van het koude medium warmer wordt dan de uitgangstemperatuur van het warme medium. In vergelijking met een gelijkstroomwarmtewisselaar draagt een tegenstroomwarmtewisselaar voor hetzelfde verwarmende oppervlak meer warmte over.

3.4.1 Onze warmtewisselaar

In ons praktisch gedeelte hebben we ook gebruikgemaakt van een warmtewisselaar. Deze ziet er als volgt uit.

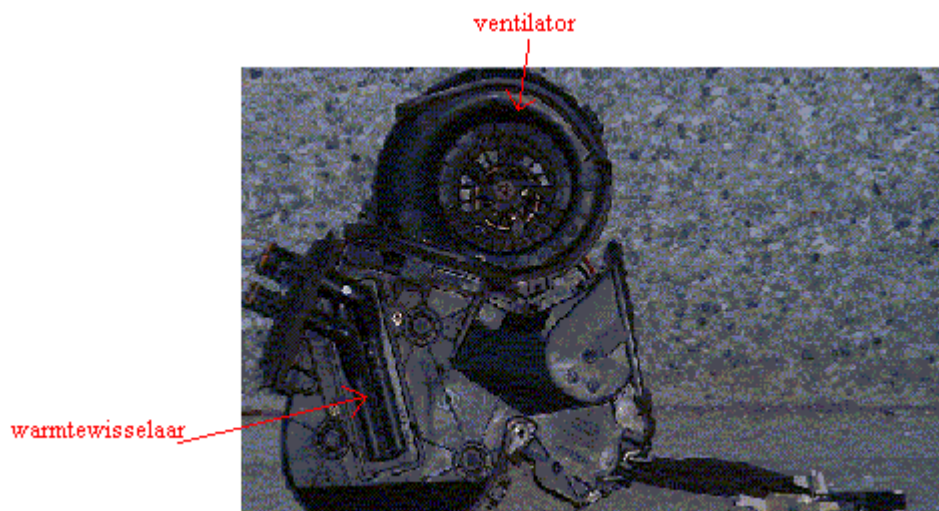


Fig. 2.3: Warmtewisselaar ingebouwd bij een ventilator

Op de bovenstaande figuur zien we linksonder de warmtewisselaar met daarboven de ventilator. We hebben het koelwater laten stromen door de warmtewisselaar die dan warmte afgeeft. Door middel van de ventilator die aangedreven wordt door de alternator, hebben we de warme lucht kunnen verplaatsen naar een opening, zodat we de warme lucht kunnen voelen. Deze warmtewisselaar werkt in tegenstroom. We laten het water binnen en sturen er lucht overheen die dan opgewarmd wordt.

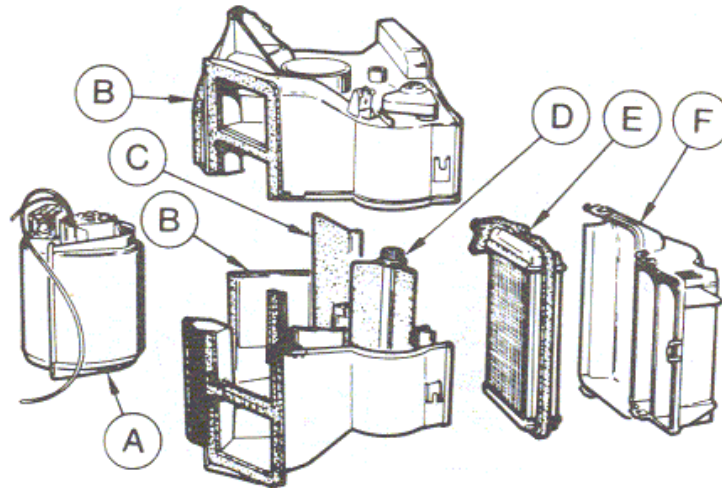


Fig. 2.4: Opbouw van een warmtewisselaar en een ventilator

Op de bovenstaande figuur is A de aanjagermotor (ventilator) en E is de warmtewisselaar. De andere aangeduide stukken zijn voornamelijk de kleppen en omkasting van de warmtewisselaar en ventilator.

2.2 De radiator

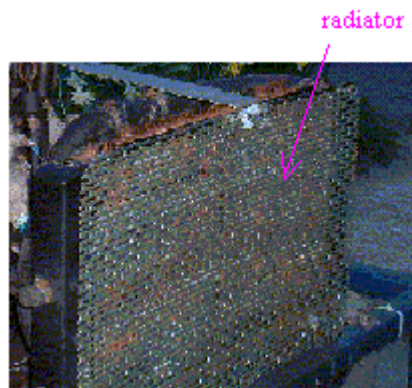


Fig. 2.5: De radiator

De hoofdbedoeling van een radiator is om de warmte van de motor af te geven aan de lucht. De warmte moet eerst getransporteerd worden naar een groter oppervlak dat we de radiator noemen. Het transport wordt verzorgd door de watercirculatie. Het is dus van het allerhoogste belang dat we een goede watersetup opbouwen en weten dat de opname (van de motorblok) en afgifte (de radiator) van warmte de belangrijkste factoren zijn. De vloeistof is slechts een transportmiddel. De radiator zorgt voor een goede koeling van het motorblok. Zowel bij radiator als bij motorblok is het contactoppervlak de sleutel tot lage temperaturen. Als er niet genoeg warmte in het transportmiddel kan gestopt worden, dan kun je deze natuurlijk ook niet afstaan aan de radiator. Andersom geldt hetzelfde: wordt er niet genoeg warmte afgegeven in de radiator, dan kan er ook minder warmte aan de motor onttrokken worden.

2.2.1 Problemen en risico's

Velen denken dat waterkoeling gevaarlijk is, maar als men dat alles met een beleid doet, is dit absoluut niet zo. Het grootste gevaar is de lekkage. Ze kan leiden tot vorming van kortsluiting bij de elektrische schakelingen.

2.2.2 Radiatoren

Een nadeel van autoradiatoren is vaak de kwaliteit. Ze zijn vaak erg smerig en passen niet altijd in de kast. Het smerig zijn kan je verhelpen door zete spoelen met azijn. Een radiator moet zijn warmte kwijt aan de lucht. Veel contact met de lucht is dus belangrijk en daarom zijn veel lamellen zeer gewenst. Dit is meteen het grootste voordeel van een autoradiator. Aangezien enkel de radiator voor de afgifte van warmte zorgt, is het belangrijk een goede radiator te hebben.

2.2.3 Soorten koelingen

Er bestaan twee soorten koelsystemen: directe en indirecte. Bij directe koeling of luchtkoeling wordt lucht over de koelribben op de buitenzijde van de cilinders en cilinderkoppen geblazen. De ventilator in wagens met luchtkoeling zorgt wel voor meer lawaai. Bij moto's wordt die luchtkoeling bekomen doordat de motorfiets rijdt. Bij de indirecte koeling of waterkoeling circuleert het water door kanalen binnen in de motor.

2.2.4 Koelcircuit bij een auto

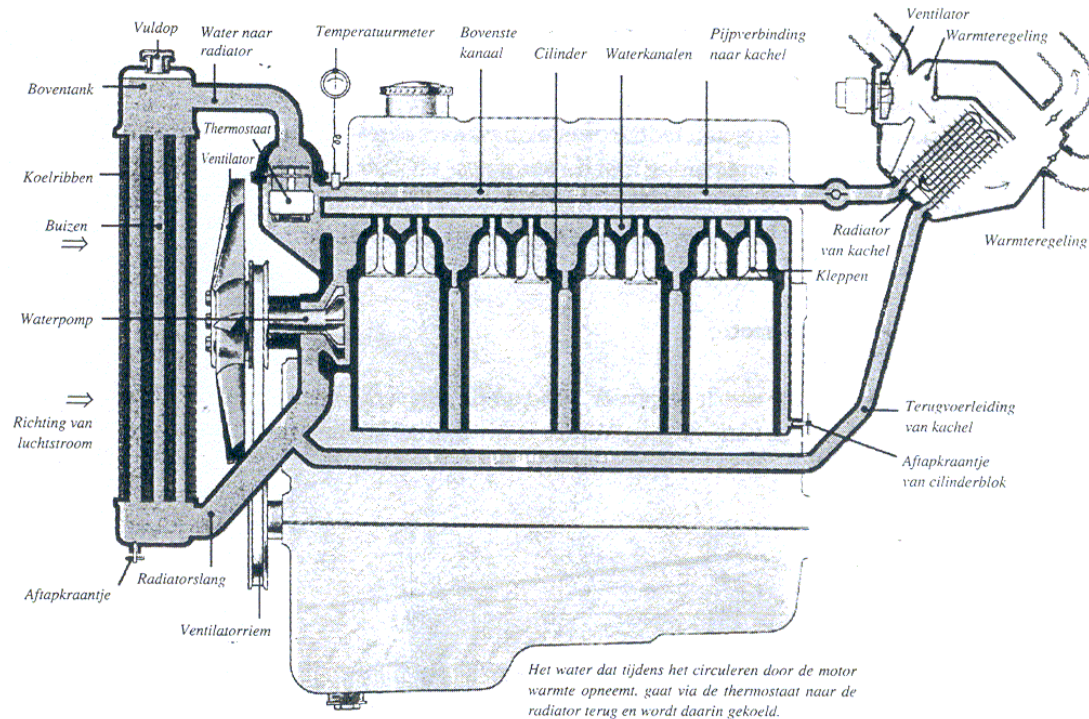


Fig. 2.6: Koelcircuit bij een auto

In de bovenstaande figuur zien we links de radiator en rechtsboven de warmtewisselaar met ventilator. Hier zien we het volledige circuit van het koelwater dat niet continu door de radiator stroomt. Het is pas zo vanaf een bepaalde temperatuur. Hiervoor zorgt de thermostaat, die zit in de wateruitlaat van de motor en dient om de watercirculatie te beperken totdat de motor een behoorlijke bedrijfs temperatuur heeft bereikt. Cilinderwanden die een temperatuur lager dan 60°C hebben, veroorzaken condensatie en dus corrosie. Door de watercirculatie gedeeltelijk af te sluiten (met een klep bestaande uit een balgje met een gas die uitzet bij stijgende temperatuur) komt de motor sneller op temperatuur.

2.3 Waterpomp

Voor het water een circulatie kan doorlopen, is er natuurlijk ook een waterpomp nodig die het koelwater naar de radiator stuurt en zo terug naar de motor om een gesloten circuit te vormen. De waterpomp zorgt voor een kunstmatige circulatie (een soort schoepenpomp) van het koelwater.

2.4 Reservoir

Een reservoir is nodig voor het makkelijk vullen en ontluchten van het systeem. Het is een misverstand dat een groot reservoir voor een lage temperatuur zorgt. Een groot reservoir zorgt alleen voor een langere opwarmtijd. Na die tijd zal de temperatuur gelijk zijn aan die van een zelfde systeem met een klein reservoir. Met een klein reservoir is de tijd tussen opwarmen en afkoelen dus korter.



Fig. 2.7: Detail reservoir

Fig. 2.8: Reservoir

2.5 Uitlaat

In onze praktische realisatie hebben we net zoals bij een warmtekrachtkoppeling gebruikgemaakt van recuperatie van de uitlaatgassen. In de uitlaat bevindt er zich ook een warmtewisselaar. Hieronder zie je een foto van de uitlaat die gemaakt werd door het 7^{de} jaar automechanica.



Fig. 2.9: Uitlaat

Deze warmtewisselaar bestaat uit een cilinder waardoor de uitlaatgassen passeren en daar rond een balk waarbinnen het koelwater zich bevindt. De warmtewisselaar is een tegenstroomwarmtewisselaar.

2.6 Waterteller

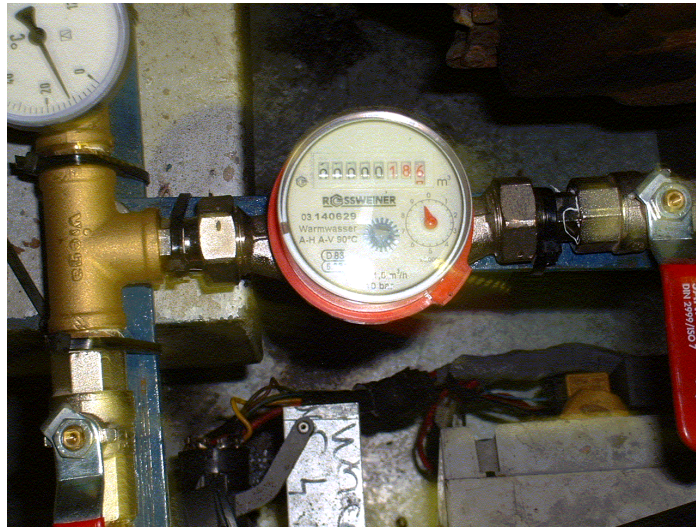


Fig. 2.10: Waterteller

We maken gebruik van een woningwaterteller om zo te bepalen hoeveel liter water er per uur door de radiator en door de warmtewisselaar met ventilator gaat. Dit was de goedkoopste manier, want een debietmeter is veel duurder.

2.7 Temperatuursensoren

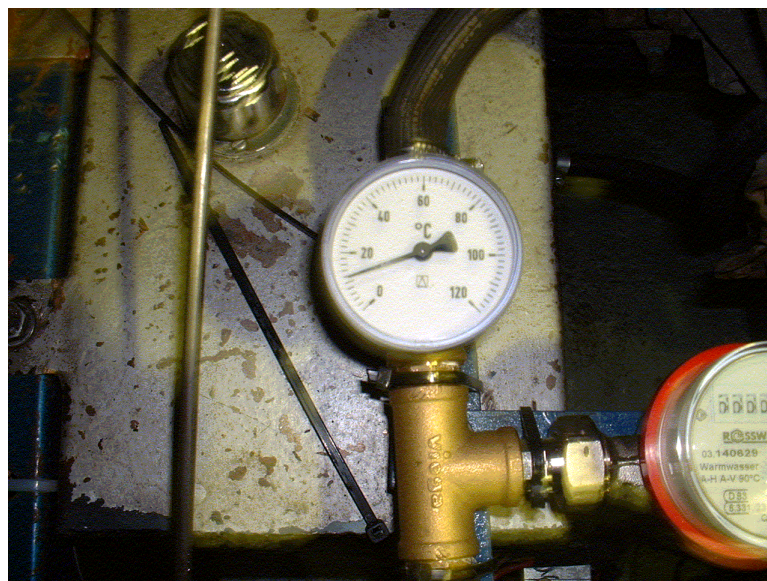


Fig. 2.11: Temperatuurmeter

We plaatsen temperatuursensoren om zo het temperatuurverschil te weten voor en na de radiator en voor en na de warmtewisselaar.

3 Dieselmotor

3.1 Algemeen

Een dieselmotor, ook wel diesel genoemd, is uitgevonden door Rudolf Diesel en is een verbrandingsmotor die werkt volgens het principe van zelfontbranding van een samengedrukt mengsel van brandstof en lucht. Hij werkt volgens het zuigerprincipe waarbij een ontbrandend mengsel de zuiger in de cilinder naar beneden drukt. De kracht wordt via een drijfstang en kruktaf op de krukas overgebracht.

Het grote verschil met de benzinemotor is dat het mengsel vanzelf ontsteekt en er dus geen aparte ontstekingsinrichting nodig is, daarentegen is er altijd een apart inspuitsmechanisme vereist.

Oudere dieselmotoren werken volgens het indirecte principe: de brandstof wordt niet rechtstreeks boven de zuiger ingespoten, maar in een aparte voorkamer. Vaak wordt daar dan ook een gloeispiraal in geplaatst.

Tegenwoordig nemen de direct ingespoten diesels een steeds grotere plaats in de automobielenindustrie. Het voordeel van deze modernere systemen is dat door de elektronische regeling van inspuitsmomenten en hoeveelheid van de brandstof de instoot van schadelijke gassen veel beter beheersbaar is. Een nadeel is echter een relatief groter lawaai dat vooral bij oudere, grote bestelwagenmotoren bekend is. Tegenwoordig is de stand van de techniek zo hoog dat de dieselmotor niet meer onder hoeft te doen voor de benzinemotor. Het rendement van een dieselmotor is hoger dan die van een benzinemotor. Daarom is het brandstofverbruik bij gelijkblijvende prestaties lager.

3.2 Voor- en nadelen van een dieselmotor

Het belangrijkste voordeel van een dieselmotor is het goedkoper verbruik wanneer je veel kilometers moet afleggen.

Nadelen zijn:

- een dieselmotor heeft een hoge aankoopprijs
- de compressie-einddruk ligt veel hoger bij een benzinemotor, wat aanleiding geeft tot een mechanisch zwaarder uitgevoerde motor
- de dieselmotor draait met een lager toerental
- de motor ontwikkelt een lager vermogen bij een zelfde cilinderinhoud

In onze praktische realisatie maken we gebruik van een dieselmotor, met name van een vierslagdieselmotor van een Ford Fiesta.

Nu gaan we de vierslagdieselmotor vergelijken met een vierslagbenzinemotor.

Een vierslagdieselmotor heeft zowel positieve als negatieve aspecten.

De voordelen zijn:

- voor een vierslagdieselmotor is er geen ontstekingsinstallatie nodig
- de uitlaatgassen zijn minder milieubelastend
- de brandstof is goedkoper
- vierslagdieselmotoren hebben een sterk motorisch koppel, deze is ongeveer constant bij een laag toerental
- de gemiddelde kracht op de zuiger is groter

Het spreekt voor zich dat geen enkele motor perfect is.

De nadelen zijn:

- wanneer je een vierslagdieselmotor wil aankopen, ga je een hoge aankoopprijs betalen
- we hebben een zwaarder mechanisch uitgevoerd vermogen
- minder vermogen bij een zelfde cilinderinhoud
- bij een indirecte insputing gebruikt men een speciale voorgloeistartinstallatie
- de dieselmijnt om de motor te starten is door de hedendaagse technologie herleid tot enkele seconden

3.3 Verbrandingsmotoren

[Hieronder zie je een eenvoudige voorstelling van een verbrandingsmotor.](#)

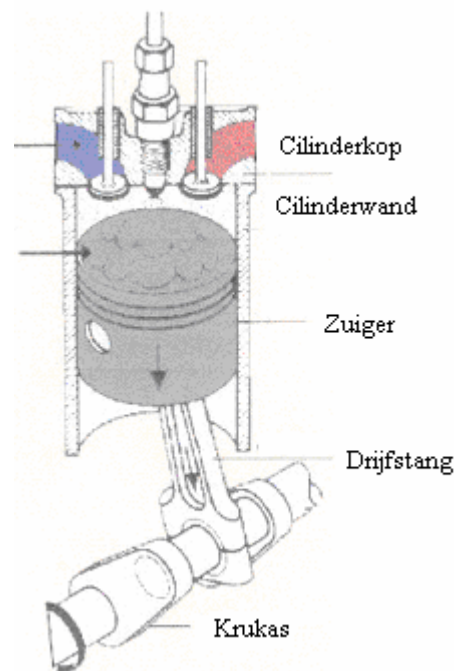


Fig. 3.1: Eenvoudige voorstelling verbrandingsmotor

Nu gaan we uitleggen hoe de verbrandingsmotor werkt.

- In het blauwe gedeelte komt de verse lucht binnen. De lucht wordt vanzelf naar binnen gezogen naarmate de zuiger in zijn cilinder naar beneden wordt bewogen. Uiteraard moet de inlaatklep openstaan. Dit noemen we de inlaatslag.
- Zodra de zuiger het onderste punt heeft bereikt, beweegt de zuiger zich omhoog. Dit noemen we de compressieslag (= beide kleppen blijven gesloten). De lucht wordt dan gecomprimeerd en stijgt in temperatuur. Hier merken we het grote verschil tussen benzine- en dieselmotoren.
- Doordat de brandstof trager is met ontsteken dan de zuiger zich beweegt, is de zuiger voorbij het hoogste punt. Omdat de hete gassen uitzetten, duwen die de zuiger naar beneden. Dit noemen we de arbeidsslag.
- Als de zuiger in benedenpositie komt, is de arbeidsslag afgelopen. Dan opent de uitlaatklep zich. De zuiger is dan bij het onderste punt en beweegt zich vervolgens naar boven en duwt de uitlaatgassen de cilinder in (rode gedeelte).
- Hierna begint de hele cyclus opnieuw. Dit noemen we de vierslagmotor. De cyclus luidt als volgt:
 - 1) De inlaatslagzuiger beweegt van het hoogste punt naar beneden met een open inlaatklep.
 - 2) De compressieslagzuiger beweegt van het onderste punt naar boven met beide kleppen gesloten.
 - 3) De arbeidsslagzuiger beweegt zich van het hoogste punt naar beneden met beide kleppen gesloten.
 - 4) De uitlaatslagzuiger beweegt van het onderste punt naar boven met een open uitlaatklep.

Verskil:

- Bij een benzinemotor is de compressieverhouding kleiner dan bij een dieselmotor. Dat betekent dat de gecomprimeerde druk in een dieselmotor een stuk hoger is dan bij de benzinemotor met als gevolg dat deze hogere druk een hogere eindtemperatuur geeft. Dit is de reden waarom bij een benzinemotor een bougievonk de verbranding moet inleiden. De eindtemperatuur bij een diesel is zo hoog dat de brandstof uit zichzelf tot ontsteking komt.
- Als de zuiger haast in topositie is, wordt bij een diesel de brandstof ingespoten via een verstuiver met behulp van een hogedrukbrandstofpomp (bij een benzinepomp wordt dan een bougievonk gegeven)

3.4 Nokkenas

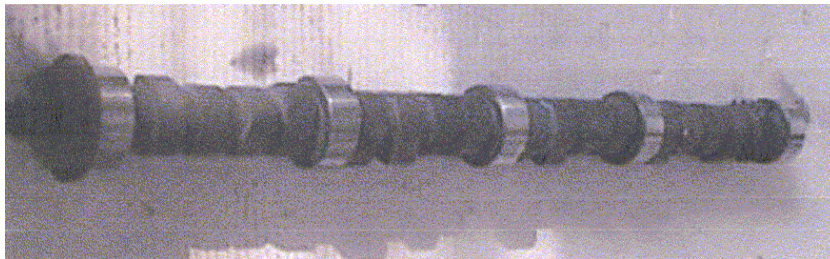


Fig. 3.2: Nokkenas

Het openen en sluiten van kleppen worden geregeld door de nokkenas. Deze zorgt ervoor dat de kleppen zich op de gepaste tijd openen of sluiten en gedurende de vereiste periode opengehouden worden om de vrije aan- en afvoer van de gassen mogelijk te maken. Deze bewegingen kunnen worden bereikt door een overbrenging vanuit de krukas via onder of bovenliggende nokkenas. De rotatiesnelheid van de nokkenas is altijd de helft van de rotatiesnelheid van de krukas. Dat komt, omdat de nokkenas zijn hele cyclus in één omwenteling doorloopt en de krukas er twee omwentelingen overdoet om de zuiger vier slagen te laten maken. De nokkenas is van gesmeed staal of van gietijzer dat machinaal bewerkt en daarna gehard wordt, om een maximale slijtageweerstand voor de flanken van de nokken te verkrijgen. Het bedient één pompelement per cilinder. Er zijn dus in de dieselmotor evenveel pomp-elementen als cilinders. De hoekstand van de ene nok t.o.v. de andere is zo dat het inspuitmoment overeenkomt met de ontstekingsvolgorde van de motor.

3.5 Krukassen

Krukassen hebben geen directe invloed op het motorvermogen, maar ze moeten wel het geproduceerde vermogen transporteren. We spreken van het krukasmechanisme, omdat we de combinatie van krukas/ zuiger/ drijfstang bedoelen. De zuiger maakt een op- en neergaande beweging in de cilinder. Door de zuiger te verbinden met de krukas door middel van een drijfstang ontstaat een krukasmechanisme. Dit mechanisme zet dan de op en neergaande beweging om in een draaiende beweging. Tegelijkertijd worden de krachten overgebracht op de krukas. Bij de constructie van de krukas wordt er rekening gehouden met het gewicht van het roterende gedeelte en het gewicht van het op - en neergaande gedeelte. Tegenover de kruktaf bevindt zich een contragewicht. De zwaarte van het tegengewicht wordt vermeerderd met 100% roterend gewicht plus een bepaald percentage van het oscillerende gewicht.

Wanneer er trillingen ontstaan, kost dat veel vermogen en wordt de levensduur van het materiaal korter. Trillingen zijn niet gewenst en moet men dus opheffen. Als we de motor, om welke reden dan ook, meer rendement willen laten leveren ontkomen we niet aan het balanceren van het krukasmechanisme.

Een krukas moet perfect gebalanceerd worden op milligrammen en daarna moeten de drijfstangen en zuigers gemonteerd worden. Deze onderdelen hebben onderling de nodige grammen verschillen en daarom heeft dit balanceren natuurlijk geen nut. De zuigers worden door de fabriek met bepaalde gewichtstoleranties geleverd, maar het betreft hier toch enkele grammen. De drijfstangen worden met een klein verschil van enkele grammen geleverd, maar dit is een verschil in totaalgewicht. Gaat men nu de drijfstangen bij gedeelten wegen, blijkt dat de kop en de voet veel grotere verschillen hebben. Dit maakt de bij uitwerking veel uit, omdat het kopgewicht deel uitmaakt van het op- en neergaande gewicht en het voetgewicht van het ronddraaiende gewicht.

We kunnen hiervan een voorbeeld geven.

Een luxeauto rijdt met 100km/u, bij deze snelheid is het toerental van de wielen ongeveer 1000 omwentelingen/min. Wanneer nu één van de voorwielen een onbalans van 10 gram heeft, voelt men het hele stuurmechanisme trillen, terwijl bij sommige snelheden de gehele wagen trilt. Krukassen van motoren draaien een toerental van 5000 tot 14000 omwentelingen/min. De beweging van de trilling is bij de krukas kleiner dan bij het voorwiel, omdat de diameters van beide nogal verschillen, maar de frequentie is vele malen groter (toerental).

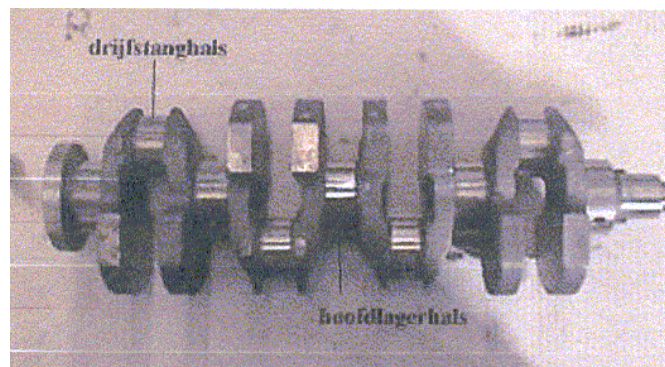


Fig. 3.3: Krukkenas

3.6 De directe en indirecte inspuiting

3.6.1 De directe inspuiting

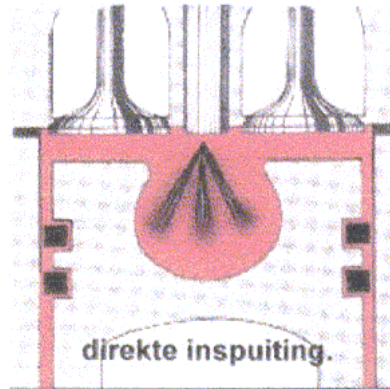


Fig. 3.4: Directe inspuiting

Kenmerken:

De verstuiver staat rechtstreeks in verbinding met de verbrandingskamer. Deze heeft een zo klein mogelijk wandoppervlak, zodat de warmteverliezen zo beperkt mogelijk zijn. Hierdoor komt het dat de zuiger of cilinderkop uitgehold is. Deze vorm bevordert de wervelingen van de samengestelde lucht waardoor de verbranding vollediger is. De verstuiving gebeurt door een meergatsverstuiver en de verstuivingsdruk is hoog. Zo wordt de gasolie zeer fijn verstoven.

3.6.2 De indirecte inspuiting

4.3

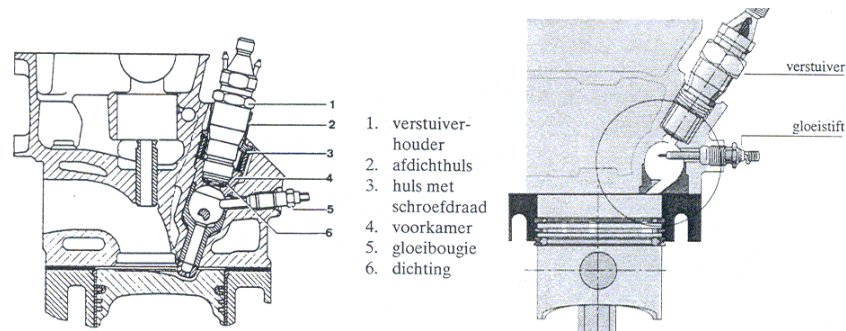


Fig. 3.5: Indirecte inspuiting

Kenmerken:

De verbrandingsruimte bestaat uit twee delen: de voorkamer en de wervelkamer.

Voorkamer

Het ene deel wordt ingenomen door de voorkamer. In deze ruimte wordt de verbranding ingeleid om zich voort te zetten in de cilinder. De voorkamer staat via enkele gaatjes in verbinding met de cilinderruimte.

Werking:

Tijdens de compressie wordt de lucht tot in de voorkamer geperst. De eengatsverstuiver spuit hierin alle brandstof. Doordat er zo weinig lucht in de voorkamer aanwezig is, kan er slechts een deel van de gasolie ontbranden. Intussen verdampt een deel van de gasolie. De eerste ontbranding veroorzaakt een drukverhoging in de voorkamer met als gevolg dat het overschot van de brandstof met een hoge snelheid naar de cilinder verstoven wordt en daar verder verbrand wordt.

Wervelkamer

Het tweede deel van de verbrandingsruimte noemt men de wervelkamer. In deze ruimte wordt de cilinderkop aangebracht. De wervelkamer beslaat bijna de gehele verbrandingsruimte. Hij is bolvormig en staat in verbinding met de cilinder. Alle ingespoten brandstof komt in de wervelkamer terecht.

Werking:

Tijdens de compressie wordt de lucht in de wervelkamer geperst waardoor hij een snel ronddraaiende beweging maakt. Bij de verbranding van de eerste brandstof stijgt de druk in de wervelkamer boven deze van de cilinderruimte. De zuiger is intussen aan het dalen. De draaiing van de lucht in de wervelkolom keert om met als gevolg dat de lucht en de brandstof zich vermengen met een hoge snelheid en door het verbindings-kanaal naar de cilinder worden gestuwd.

Voor- en nadelen van de indirecte inspuiting

Voordelen:

- Een lagere verstuivingsdruk (ongeveer 100bar)
- De mogelijkheid bestaat om de motor met een hoger toerental te laten draaien
- Doordat de verbrandingsruimte uit twee ruimten bestaat, nl. de voor- en de wervelkamer, ontstaat er een rustig verbrandingsproces.

Nadelen:

- Door de warmteverliezen is er bijna altijd een hulpmiddel nodig om de motor te starten, dit kan met behulp van een gloeibougie of een gloeiweerstand in de inlaat
- Het rendement ligt lager met als gevolg dat het brandstofverbruik hoger ligt
- Doordat de verbrandingsgassen in de kamer achterblijven, krijgen we een minder goede vulling
- We hebben een hogere compressieverhouding en dit eist een zwaardere startmotor

We hebben dus drie cyclussen :

- Bij de warmtewisselaar: hierbij is het een twijfelgeval: het is geen echte tegenstroom en ook geen echte gelijkstroom. Daarom hebben we onze berekeningen met een kruisstroomwarmtewisselaar gedaan. We kennen opnieuw de in- en uittemperatuur en het debiet d.m.v. een watermeter ,hierdoor kunnen we terug de warmteoverdracht bepalen.
- Bij de radiator: een tegenstroomwarmtewisselaar, daarop kunnen we berekeningen doen doordat we er twee temperatuurmeters en een watermeter op hebben geplaatst kunnen we de warmteoverdracht bepalen.
- Bij de uitlaat: een tegenstroomwarmtewisselaar, daarop kunnen we ook berekeningen doen voordat we twee temperatuurmeters en een watermeter hebben erop geplaatst, kunnen we opnieuw de warmteoverdracht bepalen.

4.1 Bepalen toerental op rolantie

Volgens ons meetapparaat draait de nokkenas aan een toerental van 4490 min^{-1} maar dit is niet de waarde waarmee de nokkenas draait, dit is de waarde waarmee het wiel van het meetinstrument draait. Door deze verhoudingen te gaan omrekenen kunnen we het werkelijke toerental van de nokkenas weten.

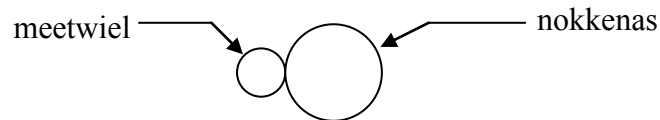


Fig. 4.2: Overbrenging meetwiel - nokkenas

Diameter nokkenas = $D_2 = 160 \text{ mm}$

Omtrek vliegwiel = 100 mm

Toerental vliegwiel = $n_1 = 4490 \text{ min}^{-1}$

De omtrek van het vliegwiel:

Algemeen :

$$2 \cdot \pi \cdot r_1 = \pi \cdot D_1 = 100 \text{ mm}$$

Bijzonder :

$$D_1 = \frac{100 \text{ mm}}{\pi}$$

$$D_1 = 31,83 \text{ mm}$$

Bepalen van toerental krukas:

Algemeen:

$$\frac{D_1}{n_2} = \frac{D_2}{n_1}$$

Bijzonder:

$$n_2 = \frac{D_1 \cdot n_1}{D_2}$$

$$n_2 = \frac{31,83 \text{ mm} \cdot 4490/\text{min}}{160 \text{ mm}}$$

$$n_2 = 879,3/\text{min}$$

Besluit: de nokkenas heeft een toerental van 879 min^{-1}

4.2 Berekening op warmtewisselaar

Hier voeren we enkele berekeningen op de warmtewisselaar uit. Het is de bedoeling dat we theoretisch nagaan hoeveel oppervlakte we zouden nodig hebben om van 76°C naar 50°C te gaan. Deze oppervlakte zullen we dan controleren met de werkelijke oppervlakte van de warmtewisselaar. Dit zou theoretisch en praktisch ongeveer dezelfde waarde moeten zijn.

Deze onderstaande figuur toont de warmteoverdracht van de warmtewisselaar (van een autoventilatie, zie figuur 2.3).

Gegeven:

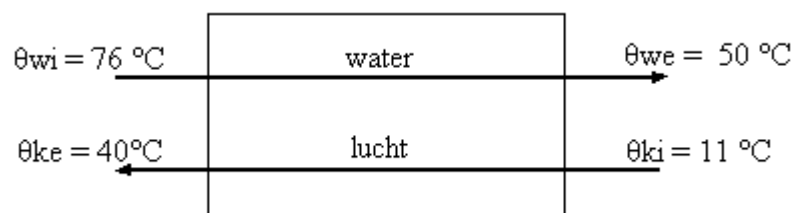


Fig. 4.3: Warmteoverdracht van warmtewisselaar

$c = 4186\text{J/kgK}$ soortelijke warmte van water

$\rho_w = 1000\text{ J/kg.K}$ massadichtheid van water

Onder de soortelijke warmte c verstaat met de warmtehoeveelheid die nodig is om 1kg van de betreffende stof één kelvin te doen stijgen.

$h_1 = 55\text{ W/m}^2.\text{K}$ overgangscoefficiënt aan de buitenzijde van de wand in $\text{W/m}^2\text{K}$
overgangscoefficiënt lucht.

$h_2 = 3000\text{ W/m}^2.\text{K}$ overgangscoefficiënt aan de binnenzijde van de wand in $\text{W/m}^2\text{K}$, overgangscoefficiënt water.

De overgangscoefficiënten zijn de getallen die aanduiden hoeveel er aan de binnen- en buitenkant van een wand aan warmte overgaat per seconde en per m^2 wandoppervlak wanneer het verschil tussen wand en omgeving 1K bedraagt.

$\lambda_{al} = 203\text{ W/m.K}$ warmtegeleidingcoefficient aluminium

De warmtegeleidingcoefficient λ van een stof is de hoeveelheid warmte in joule die in één seconde overgaat van de ene naar de andere zijde van een vlakke laag met een dikte van één meter, indien het temperatuurverschil tussen de beide zijden één graad Celsius of één kelvin bedraagt.

$d = 1\text{ mm}$ dikte van de enkelvoudige wand in m

Bepalen van $\Delta\theta_m$:

Tegenstroomwarmtewisselaar:

$$\Delta\theta_{\max} = \theta_{wi} - \theta_{ke} = 76 - 40 = 36 \text{ K}$$

$$\Delta\theta_{\min} = \theta_{we} - \theta_{ki} = 50 - 11 = 39 \text{ K}$$

$$\Delta\theta_m = \frac{\Delta\theta_{\max} - \Delta\theta_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta\theta_{\max}}{\Delta\theta_{\min}}\right)} = \frac{36 - 39}{\ln\left(\frac{36}{39}\right)} = 37,48 \text{ K}$$

Gelijkstroomwarmtewisselaar:

$$\Delta\theta_{\max} = \theta_{wi} - \theta_{ki} = 76 - 11 = 65 \text{ K}$$

$$\Delta\theta_{\min} = \theta_{we} - \theta_{ke} = 50 - 40 = 10 \text{ K}$$

$$\Delta\theta_m = \frac{\Delta\theta_{\max} - \Delta\theta_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta\theta_{\max}}{\Delta\theta_{\min}}\right)} = \frac{65 - 10}{\ln\left(\frac{65}{10}\right)} = 29,38 \text{ K}$$

We willen het niet weten voor een tegen of gelijkstroomwarmtewisselaar, maar wel voor een kruisstroomwarmtewisselaar. Om het resultaat te verkrijgen moeten we het gemiddelde nemen van de twee. (We moeten een kruisstroomwarmtewisselaar gebruiken omdat de lucht het koelwater kruist.)

$$\Rightarrow \text{gem. } \Delta\theta_m = \frac{37,48 + 29,38}{2} = 33,43 \text{ K}$$

Bepalen van de warmtehoeveelheid Q die van het water wordt overgedragen op de lucht:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 0,115 \cdot 4186 \cdot 1000 \cdot (76 - 50) = 12516 \text{ kJ}$$

$$\begin{aligned} \text{met } m &= \rho \times q_v \\ &= 1000 \text{ kg/m}^3 \times 0,115 \text{ m}^3/\text{h} \\ &= 115 \text{ kg} \end{aligned}$$

q_v hebben we bepaald door middel van de watermeter. Na een tijd van zes minuten was er 11,5 liter (dm^3) water gepasseerd door de warmtewisselaar. Wanneer we dit nu vermenigvuldigen met 10 dan weten we het debiet per uur.

Bepalen van de warmtestroom Φ_w

We nemen aan dat we een rendement hebben van 100%.

$$\Phi_w = \frac{Q}{t} = \frac{12516 \text{ kJ}}{3600 \text{ sec}} = 3,48 \text{ kW}$$

Bepalen van de k-waarde van de buizen

$$k = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} = \frac{1}{\frac{1}{55} + \frac{0,001}{203} + \frac{1}{3000}} = 53,99 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

R_t is gelijk aan de som van de drie weerstanden die de wand biedt tegen de overdracht van de warmte. Deze drie weerstanden bestaan uit de overgangsweerstand aan de binnenzijde (R_i), de overgangsweerstand aan de buitenzijde (R_e) en de warmteweerstand van de vaste wand (R).

De omgekeerde waarde van deze totale thermische weerstand wordt de thermische transmissiecoëfficiënt genoemd, voorgesteld door de letter k en meestal de k -waarde van de wand genoemd.

Bepalen van de benodigde oppervlakte

$$\Phi_w = k \cdot A \cdot \Delta\theta_m$$

$$\Rightarrow A = \frac{\Phi_w}{k \cdot \Delta\theta_m} = \frac{3480}{53,99 \cdot 33,43} = 1,92 \text{ m}^2$$

met $q =$ de warmtestroomdichtheid in W/m^2
 $\Phi =$ de warmtestroom of het warmteverlies in W
 $A =$ het oppervlak in m^2
 $\Delta\theta_m =$ het temperatuursverschil in K

Bepalen van het oppervlakte die warmte afgeeft

Dit doen we door de oppervlakte van de warmtewisselaar te bepalen. Een warmtewisselaar bestaat uit metalen plaatjes naast elkaar en uit buisjes. Hieronder hebben we deze oppervlakte berekend.

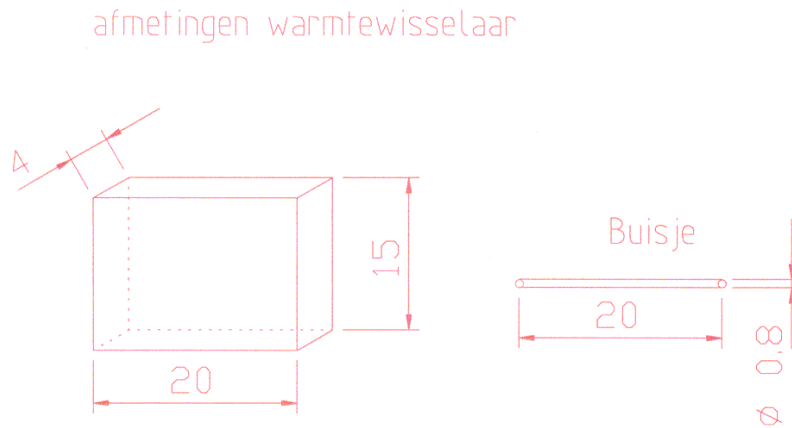


Fig. 4.4: Bepalen oppervlakte plaatjes in warmtewisselaar

De lengte van één buis is 200mm en er zijn 16 buisjes of 2 maal 8 buisjes aanwezig.

$$8 \cdot 200 \cdot 2 = 3,2 \text{ m buis}$$

Hierna kunnen we de oppervlakte van de buisjes bepalen.

Ze hebben een diameter van 8mm, hieruit kunnen we de omtrek bepalen en deze bedraagt 25,13 mm.

De oppervlakte van de buisjes is dus:

$$\begin{aligned} A &= 25,13 \cdot 10^{-3} \text{ m} \times 3,2 \text{ m} \\ &= 0,08 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Zoeken van het oppervlak van de plaatjes

Er zijn in het totaal 250 plaatjes met een lengte van 15cm en met een breedte van 4cm.

(10 mm → 14 plaatjes in 1cm bevinden er zich 14 plaatjes van een oppervlakte)

De oppervlakte voor één plaatje :

$$0,04 \cdot 0,15 = 0,006 \text{ m}^2$$

Dus de totale oppervlakte van de plaatjes is gelijk aan :

$$\Rightarrow 0,006 \cdot 250 = 1,5 \text{ m}^2$$

De totale oppervlakte van de plaatjes en de buisjes :

$$\Rightarrow 1,5 + 0,08 = 1,58 \text{ m}^2 \text{ aanwezig}$$

Besluit uit meting 1 en berekening

Na onze eerste meting hebben we dan via de meetresultaten de oppervlakte berekend die zou nodig zijn om de warmte af te geven om van een temperatuur van 76 °C naar 50 °C te kunnen gaan. Deze was 1,92 m².

Deze hebben we ook bepaald door de oppervlakte effectief te gaan opmeten van een warmtewisselaar. Hiervoor kwamen we een waarde uit van 1,58 m².

We mogen besluiten dat we met onze meting en berekening ongeveer gelijk uitkomen. Het is wel niet hetzelfde maar dit komt omdat we h_1 en h_2 wel eens kunnen verschillen van waarde. (h_1 kan tussen 10 en 100 gelegen zijn en h_2 kan tussen 2000 en 4000 gelegen zijn, dit kan een enorme verandering opleveren in de berekening)

4.3 Berekening op radiator

Na de warmtewisselaar kunnen we nu ook eens de warmteoverdracht bij de radiator berekenen.

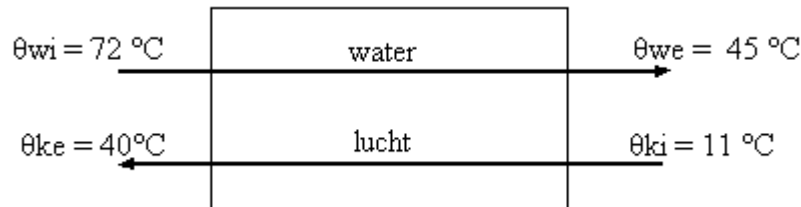


Fig. 4.5: Warmteoverdracht van warmtewisselaar

Bij de radiator is er maar één berekening mogelijk, namelijk het berekenen van de warmtehoeveelheid Q van het water dat wordt overgegeven aan de lucht.

De formule om dit te berekenen is net dezelfde als die bij de warmtewisselaar:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 0,09 \cdot 4186 \cdot 1000 \cdot (72 - 45) = 10172 \text{ kJ}$$

$$\begin{aligned} \text{met } m &= \rho \times q_v \\ &= 1000 \text{ kg/m}^3 \times 0,09 \text{ m}^3/\text{h} \\ &= 90 \text{ kg} \end{aligned}$$

q_v hebben we bepaald door middel van de watermeter. Na 6 minuten was er 9 liter (dm^3) water door de warmtewisselaar gepasseerd. Wanneer we dit nu vermenigvuldigen met 10 dan weten we het debiet per uur.

De warmte die dus afgegeven wordt bij de radiator is 10172 kJ.

Als we de warmteoverdracht bij de radiator optellen bij de warmteoverdracht bij de warmtewisselaar dan vinden we de totale warmteoverdracht die we uit het koelwater van de motorblok halen.

$$\begin{aligned} Q_{\text{tot}} &= Q_{\text{radiator}} + Q_{\text{warmtewisselaar}} \\ &= 10172 \text{ kJ} + 12516 \text{ kJ} \\ &= 22688 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Deze totale warmteoverdracht is enkel geldig wanneer we de kraan van de uitlaatgassen dichtdoen.

4.4 Berekening op uitlaatgassen

Hier voeren we enkele berekeningen op uitlaatgassen uit. Het is de bedoeling dat we theoretisch nagaan hoeveel oppervlakte we zouden nodig hebben om van 56°C naar 64°C te gaan. Deze oppervlakte zullen we dan controleren met de werkelijke oppervlakte van de warmtewisselaar. Dit zou theoretisch en praktisch ongeveer dezelfde waarde moeten zijn.

Deze onderstaande figuur toont de warmteoverdracht van de warmtewisselaar (van een autoventilatie, zie figuur 2.3).

Gegeven:

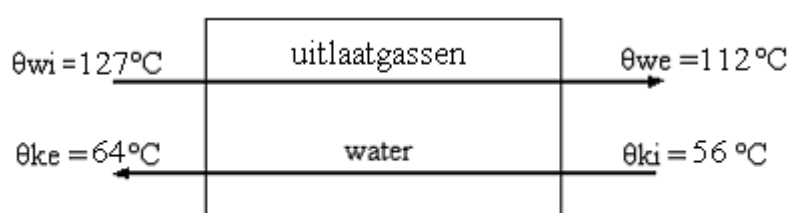


Fig. 4.6: Warmteoverdracht van warmtewisselaar bij uitlaatgassen

$c = 4186 \text{ J/kgK}$ soortelijke warmte van water

$\rho_w = 1000 \text{ J/kg.K}$ massadichtheid van water

Onder de soortelijke warmte c verstaat met de warmtehoeveelheid die nodig is om 1kg van de betreffende stof één kelvin te doen stijgen.

$h_1 = 80 \text{ W/m}^2.\text{K}$ overgangscoefficiënt aan de binnenzijde van de wand in $\text{W/m}^2\text{K}$
overgangscoefficiënt uitlaatgassen.

$h_2 = 2500 \text{ W/m}^2.\text{K}$ overgangscoefficiënt aan de buitenzijde van de wand in $\text{W/m}^2\text{K}$, overgangscoefficiënt water.

De overgangscoefficiënten zijn de getallen die aanduiden hoeveel er aan de binnen- en buitenkant van een wand aan warmte overgaat per seconde en per m^2 wandoppervlak wanneer het verschil tussen wand en omgeving 1K bedraagt.

$\lambda_{ijz} = 80,4 \text{ W/m.K}$ warmtegeleidingcoefficient ijzer

De warmtegeleidingcoefficient λ van een stof is de hoeveelheid warmte in joule die in één seconde overgaat van de ene naar de andere zijde van een vlakke laag met een dikte van één meter, indien het temperatuurverschil tussen de beide zijden één graad Celsius of één kelvin bedraagt.

$d = 1 \text{ mm}$ dikte van de enkelvoudige wand in m

Bepalen van $\Delta\theta_m$:

Tegenstroomwarmtewisselaar:

$$\Delta\theta_{\max} = \theta_{wi} - \theta_{ke} = 127 - 64 = 63 \text{ K}$$

$$\Delta\theta_{\min} = \theta_{we} - \theta_{ki} = 112 - 56 = 56 \text{ K}$$

$$\Delta\theta_m = \frac{\Delta\theta_{\max} - \Delta\theta_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta\theta_{\max}}{\Delta\theta_{\min}}\right)} = \frac{56 - 63}{\ln\left(\frac{56}{63}\right)} = 59,43 \text{ K}$$

Bepalen van de warmtehoeveelheid Q die van de uitlaatgassen wordt overgedragen op het water:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 0,115 \cdot 4186 \cdot 1000 \cdot (64 - 56) = 3851,12 \text{ kJ}$$

$$\begin{aligned} \text{met } m &= \rho \times q_v \\ &= 1000 \text{ kg/m}^3 \times 0,115 \text{ m}^3/\text{h} \\ &= 115 \text{ kg} \end{aligned}$$

q_v hebben we bepaald door middel van de watermeter. Na een tijd van zes minuten was er 11,5 liter (dm^3) water gepasseerd door de warmtewisselaar. Wanneer we dit nu vermenigvuldigen met 10 dan weten we het debiet per uur.

Bepalen van de warmtestroom Φ_w

We nemen aan dat we een rendement hebben van 100%.

$$\Phi_w = \frac{Q}{t} = \frac{3851,12 \text{ kJ}}{3600 \text{ sec}} = 1,07 \text{ kW}$$

Bepalen van de k-waarde van de buizen

$$k = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} = \frac{1}{\frac{1}{80} + \frac{0,001}{80,4} + \frac{1}{3000}} = 77,85 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

R_t is gelijk aan de som van de drie weerstanden die de wand biedt tegen de overdracht van de warmte. Deze drie weerstanden bestaan uit de overgangsweerstand aan de binnenzijde (R_i), de overgangsweerstand aan de buitenzijde (R_e) en de warmteweerstand van de vaste wand (R).

De omgekeerde waarde van deze totale thermische weerstand wordt de thermische transmissiecoëfficiënt genoemd, voorgesteld door de letter k en meestal de k -waarde van de wand genoemd.

Bepalen van de benodigde oppervlakte

$$\Phi_w = k \cdot A \cdot \Delta\theta_m$$

$$\Rightarrow A = \frac{\Phi_w}{k \cdot \Delta\theta_m} = \frac{1070}{77,85 \cdot 59,43} = 0,23 \text{ m}^2$$

met $q =$ de warmtestroomdichtheid in W/m^2
 $\Phi =$ de warmtestroom of het warmteverlies in W
 $A =$ het oppervlak in m^2
 $\Delta\theta_m =$ het temperatuursverschil in K

Bepalen van het oppervlakte die warmte afgeeft

Dit doen we door de oppervlakte van de warmtewisselaar te bepalen. De warmtewisselaar bij de uitlaatgassen bestaat uit een cilinder met daarop enkele lamellen.



Fig. 4.7:foto warmtewisselaar uitlaatgassen

De lengte van de bak is 40 cm lang. Zoals je op de foto kan zien zit er binnenin een cilinder. Deze cilinder heeft een diameter van 12cm. Daar vloeien de uitlaatgassen. Op de cilinder zijn er 8 lamellen geplaatst om ook op deze manier warmte af te geven. De lamellen hebben een lengte van 40 cm en een breedte van 3 cm. De plaat die gebruikt is geweest om de warmtewisselaar te maken is 1 mm dik.

Bepalen oppervlak van lamellen

$$A = 8 \times 3 \times 40 = 960 \text{ cm}^2 \text{ (dit is het oppervlak van de lamellen)}$$

Bepalen van het oppervlak van de cilinder

$$A = 1 \times \pi \times d = 40 \times \pi \times 12 = 1507,96 \text{ cm}^2$$

Er is dus een totale oppervlakte aanwezig van:

$$A_{\text{tot}} = 1507,96 + 960 = 2467,96 \text{ cm}^2 = 0,25 \text{ m}^2$$

Besluit uit meting 3 en berekening

Na onze meting hebben we dan via de meetresultaten de oppervlakte berekend die zou nodig zijn om de warmte af te geven om van een temperatuur van 56 °C naar 64°C te kunnen gaan. Deze was 0,23 m².

Deze hebben we ook bepaald door de oppervlakte effectief te gaan opmeten van een warmtewisselaar. Hiervoor kwamen we een waarde uit van 0,25 m².

We mogen besluiten dat we met onze meting en berekening gelijk uitkomen. Het is wel niet hetzelfde maar dit komt omdat we h_1 en h_2 wel eens kunnen verschillen van waarde. (h_1 kan tussen 10 en 100 gelegen zijn en h_2 kan tussen 2000 en 4000 gelegen zijn, dit kan een enorme verandering opleveren in de berekening)

2 Besluit

Met onze praktische realisatie was het voornamelijk de bedoeling om het principe van een warmtekrachtkoppeling weer te geven. Daar halen ze warmte uit turbo, koelwater en uitlaatgassen. Bij onze praktische realisatie hebben we enkel de warmte gerecupereerd uit koelwater en uitlaatgassen. Bij een warmtekrachtkoppeling halen ze ook nog de warmte uit de turbo ,maar omdat er geen turbo aanwezig is, kunnen we deze ook niet recupereren.

Uit onze berekeningen hebben we de warmtehoeveelheid bepaald uit de warmtewisselaar, radiator en uitlaatgassen.

Bij de warmtewisselaar hebben we ook nog de oppervlakte berekend van onze warmtewisselaar en die dan vergeleken met de werkelijke oppervlakte. Hierbij konden we besluiten dat onze berekeningen klopten. Deze zelfde berekening (ongeveer) hebben we ook uitgevoerd bij de uitlaatgassen. Hierbij konden we net als bij de warmtewisselaar besluiten dat onze berekeningen correct waren. Bij de radiator konden we enkel de warmteoverdracht bepalen. We konden de oppervlakte bij de radiator niet berekenen, omdat we de praktisch niet kunnen bepalen.

Als algemeen besluit kunnen we stellen dat onze praktische realisatie de juiste principes weergeeft van een warmtekrachtkoppeling.