

Biomassa vergisting installatie

Inleiding

De productie van biogas (duurzame energie) geschiedt via het bio-synthese proces in een vergistingsinstallatie. De input (energiegrondstof) is mais (energiegewas) en een hulpgrondstof (i.c. mest). Een vergistinginstallatie kan opgedeeld worden in drie functionele delen:

- de productie van biogas;
- de benutting van biogas;
- de voor- en na-opslag van het digestaat (restproduct na vergisting).

In dit document zullen de verschillende onderdelen worden beschreven met de bijbehorende functie. Behalve de vergister zelf en het proces zal ook beschreven worden hoe de opslag van de processtoffen kan plaatsvinden.

Technologie / techniek

Hier wordt ingegaan op de technologische en technische achtergronden van de vergistingsinstallatie. Allereerst zal worden beschreven hoe het principe van vergisting verloopt, waarbij de factoren die van belang zijn bij het proces afzonderlijk worden beschreven. Daarnaast worden de verschillende biochemische stappen in de reactor nader uitgewerkt. Vervolgens worden de verschillende reactortypen uitgelegd en tenslotte staat beschreven wat er met de diverse producten uit de installatie gedaan kan worden.

Principe van de vergisting

Vergisting is het afbreken van organische stof in de biomassa (energiegewas) onder anaërobe (zuurstofloze) omstandigheden met behulp van methaanvormende micro-organismen. Deze biomassamix kan bestaan uit energiegewassen zoals mais, maar er kunnen ook diverse andere organische producten aan deze biomassamix worden toegevoegd zoals mest.

Bij het vergistingproces ontstaat biogas, een gasmengsel dat voor 60-65% bestaat uit methaan en voor 35-40% uit CO₂. Het bevat verder een kleine fractie H₂S en NH₃ en een verzadigde hoeveelheid water.

Het uiteindelijke doel van de vergisting is het produceren van biogas uit energiegewassen en mest als hulpgrondstof, waarna biogas omgezet kan worden in warmte en elektriciteit via een gasmotor, of alleen maar warmte in een warmwaterketel.

Het vergistingproces is te verdelen in twee hoofdstappen, de zure vergisting en de methaanvergisting. De zure vergisting produceert vooral vluchtige vetzuren. Bij de methaanvergisting worden deze vetzuren omgezet in CO₂ en CH₄.

Het verloop van het vergistingsproces is afhankelijk van een aantal factoren, namelijk:

- Temperatuur;
- Zuurgraad;
- Verblijftijd;
- C/N-verhouding;
- Procesremmende stoffen (zware metalen, medicijnen);
- Menging;
- Drogestofgehalte.

Op de hierop volgende pagina's zullen deze factoren afzonderlijk beschreven worden.

Temperatuur

De temperatuur is van invloed op de snelheid van het vergistingsproces. Bij een hogere temperatuur verloopt het proces sneller, waardoor er meer biogas in een kortere tijd vrijkomt. De totale hoeveelheid biogas die vrijkomt blijft echter gelijk. Er zijn hierbij drie zones te onderscheiden, namelijk:

- psychrofiële zone: 0 - 20°C, optimum 17°C;
- mesofiële zone: 20 - 45°C, optimum 33°C;
- thermofiële zone: 45 - 75°C, optimum 55°C.

De optimale temperatuur (optimum temperatuur) in een zone is de temperatuur, waarbij het vergistingsproces in deze zone zorgt voor een maximale biogasopbrengst bij een minimale vergistingsduur.

Psychrofiële vergisting

(ook wel koude vergisting genoemd) is het proces van vergisting dat zich afspeelt bij een optimumtemperatuur van 17°C. Psychrofiële vergisting treedt altijd op bij het opslaan van mest in traditionele kelders of silo's (spontane vergisting). Bij psychrofiële vergisting wordt meestal niet geïsoleerd en weinig of niet verwarmd, waardoor de investeringskosten dus relatief laag zijn.

Deze manier van vergisting is niet geschikt om toe te passen in een aparte vergister, het biogas komt namelijk maar heel langzaam vrij. Onder de 25°C zal de gasopbrengst snel afnemen, doordat de activiteit en vooral de groei van de bacteriën temperatuursafhankelijk is. Als de temperatuur van het vergistingsproces onder de 15°C ligt, is de gasopbrengst minder dan 30% van de maximale opbrengst. De verblijftijd van de biomassamix in een psychrofiële reactor kan wel oplopen tot meer dan 100 dagen. Daarom is dit proces niet toepasbaar bij vergistingsinstallaties op boerderijniveau.

Mesofiële vergisting

Dit proces speelt zich af bij een optimumtemperatuur van 33°C. Bij voorkeur moet de temperatuur tussen de 30 en 40°C blijven. Deze temperatuur is uitermate geschikt om in de vergistingreactor toe te passen. De methaanvormende bacteriën in dit proces zijn namelijk niet zo gevoelig voor veranderingen in de temperatuur of de zuurgraad in de reactor. Zeker op boerderijniveau is dit een aan te bevelen proces. De verblijftijd van de biomassamix bij dit proces kan variëren van 15 - 40 dagen afhankelijk van de aangeleverde mestsoort en het type reactor.

Thermofiële vergisting

Dit proces speelt zich af bij een optimumtemperatuur van 55°C. Voordeel van de hogere temperatuur is dat het biogas sneller vrijkomt, waardoor volstaan kan worden met een kortere verblijftijd (10 - 20 dagen). De totale hoeveelheid biogas die vrijkomt is echter niet hoger dan bij mesofiële vergisting. Het biogas komt alleen sneller vrij. Het CH₄-gehalte in het biogas is bij een thermofiel proces gemiddeld 3% lager dan bij een mesofiel proces.

Nadeel van het thermofiële proces is dat er relatief veel energie toegevoerd moet worden, om de biomassamix in de reactor op temperatuur te houden. De methaanvormende bacteriën zijn bij thermofiële vergisting uitermate gevoelig voor schommelingen in temperatuur en zuurgraad. Een kleine schommeling van de zuurgraad kan al fataal zijn voor de thermofiële methaanvormende bacteriën. Temperatuurschommelingen in de vergister van 1 tot 2°C zijn geen probleem. Wanneer de temperatuur meer dan 2 tot 3°C schommelt, neemt de gasproductie af. Door de hogere temperatuur is het vrije NH₃-gehalte in de vergistende biomassamix hoger (het evenwicht tussen NH₃ en NH₄, verschuift richting NH₃). Het vergistingsproces is hier gevoelig voor, adaptatie van de methaanbacteriën aan de vrije NH₃ kan dit echter ondervangen.

Zuurgraad

Hydrolyse is mogelijk in een breed pH-traject. De optimale pH van verzuring van koolhydraten bedraagt 5,5 - 6,0 en van eiwitten 7,0 - 7,5. De optimale pH voor methaanvorming bedraagt 7,5 - 8,5. Mest (pH 7,5 - 8,0) bevat een hoog gehalte aan pH-bufferende stoffen zoals HCO₃⁻, NH₃ en PO₄³⁻. Hydrolyse, verzuring en methaanvorming van biomassamix in een gemengde reactor zal nauwelijks pH veranderingen teweegbrengen, als echter veel gemakkelijk afbreekbare koolhydraten in de vorm van co-producten aan de biomassamix worden

toegevoegd, bestaat het gevaar van verzuring van de reactorinhoud tot zelfs $\text{pH} < 5$ hetgeen zal resulteren in volledige ontzetting van de methaanvorming.

Verblijftijd

Er dient een minimale verblijftijd van de biomassamix in de reactor of vergistingstank te worden aangehouden in verband met het uitspoelen van de methaanvormende bacteriën. Het aanhouden van deze verblijftijd is noodzakelijk, omdat de methaanvormende bacteriën langzaam groeien en dan nog niet voldoende nieuwe bacteriën hebben aangemaakt. Er is ook sprake van een maximale verblijftijd. Bij een verblijftijd groter dan deze maximale verblijftijd is de biogasproductie dermate laag, dat de warmtebehoefte van de reactor groter is dan de calorische waarde van het gevormde biogas.

C/N-verhouding

Voor de energievoorziening van de bacteriën zijn koolstof (C) en zuurstof (O) nodig. Verder zijn voor de eiwitvoorziening en de bacterievermeerdering nog waterstof (H), stikstof (N), zwavel (S) en fosfor (P) nodig. Daarnaast zijn er ook nog spoorelementen en ijzer nodig.

Bij een lage C/N-verhouding is er veel stikstof en weinig koolstof aanwezig. Is er teveel stikstof aanwezig dan kunnen de bacteriën afsterven. Bij een te lage N-concentratie zal er niet voldoende koolstof worden omgezet. Een C/N-verhouding van 30 is de beste verhouding.

Procesremmende stoffen

Zware metalen en eventueel in de biomassamix aanwezige medicijnen (zoals antibiotica) hebben een negatieve invloed op het vergistingsproces. Ook reinigings- en desinfecteer middelen kunnen negatieve invloed hebben. Zij remmen het proces namelijk af, waardoor er minder biogas wordt geproduceerd. Bij verschimmelde biomassa kunnen ook de toxines de biologie remmen en zware metalen worden niet vergist. Ze blijven dus aanwezig in het digestaat. Hierdoor kunnen de zware metalen op het land en in de bodem terecht komen, wanneer het digestaat op het land wordt uitgereden.

Menging

Voor het verloop van het vergistingsproces is het van belang dat er goed gemengd wordt. Hierdoor wordt de inhoud homogeen in de reactor verdeeld. Daarnaast wordt de afbraaksnelheid ook groter, omdat de bacteriën door het mengen intensiever in contact komen met de voeding. Er kunnen plaatselijk minder goede procesomstandigheden optreden door ophopingen van voeding, verontreinigingen, afbraakproducten en temperatuursverschillen. Deze worden door goed mengen voorkomen. Tenslotte is menging ook van belang om drijfslagen, schuimvorming in de reactor en ophoping van zand onder in de reactor te voorkomen.

Drogestofgehalte

Het drogestofgehalte van de biomassamix is ook van invloed op het verloop van het vergistingsproces. Het drogestofgehalte van het te vergisten materiaal mag maximaal 15% bedragen bij een propstroomvergister. Bij een volledig geroerde vergister mag het drogestofgehalte maximaal 8-10% bedragen. Deze typen vergisters zullen in paragraaf 5.7.2 verder worden besproken. In tabel 3 staan een aantal verschillende producten weergegeven met daarbij het drogestofgehalte, de biogasopbrengst en het aantal kWh.

Mestsoort	DS%	Biogasopbrengst (m ³ /ton)	kWh.
Bermgras	30	120	216
Kippenmest	25	82	147
Maïs	33	200	400
Plantaardig vet	100	560	1000
Rundveemest	10	14	26
Vleesvarkenmest	9	27	48
Zeugenmest	5	15	27

Tabel: Opbrengstwaarden per mestsoort

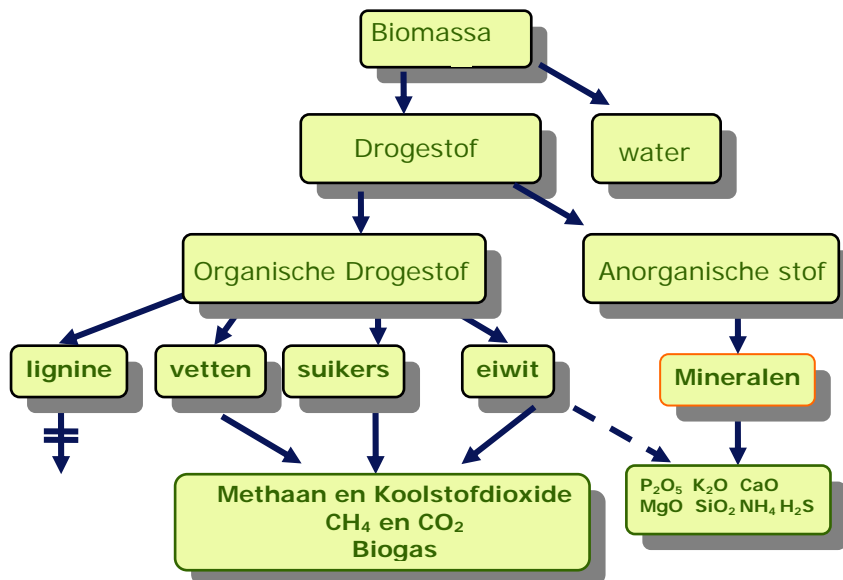
De meest gangbare mestsoorten (hulpgrondstoffen) om mee te vergisten zijn vleesvarkens-, zeugen- en rundveemest. Deze zijn ook de meest beschikbare mestsoorten. Daarnaast is het drogestofgehalte van deze soorten mest niet zo hoog. Aan deze stromen mest kunnen weer andere producten, zoals kippenmest, bermgras, maïs en plantaardig vet worden toegevoegd, die de biogas opbrengst aanzienlijk verhogen.

Biochemische achtergrond

Deze paragraaf behandelt de biochemische achtergrond van het vergistingsproces. Aan het vergistingsproces neemt een groot aantal verschillende micro-organismen deel. Dit proces kenmerkt zich door anaërobe omstandigheden, dat wil zeggen dat het proces zich afspeelt in een zuurstofloze omgeving. De micro-organismen zetten complex, organisch materiaal om in CH₄, CO₂, H₂O, H₂S en NH₃.

Het vergistingsproces kan worden opgedeeld in vier fasen. Deze zijn:

1. Hydrolyse
2. Fermentatie (zuurvorming, Acidogenese fase)
3. Acetogenese
4. Methanogenese



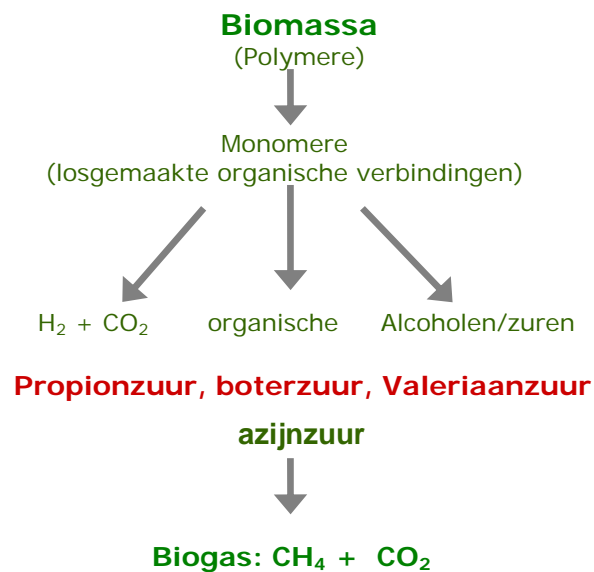
Figuur: Biogas uit biomassa

Hydrolysefase

Verzuringfase of Acidogenesefase

Acetogenefase

Methanogenefase



Figuur: Anaërobe afbraakketen

Hydrolyse

In de eerste fase van het proces (de hydrolyse) worden complexe, niet opgeloste biopolymeren (dit zijn vetten, eiwitten en koolhydraten) omgezet in minder complexe, opgeloste verbindingen door inwerking van extracellulaire enzymen. Deze enzymen worden gevormd door fermentatieve bacteriën die deze opgeloste stoffen door de celwand en membraan kunnen opnemen, Dit kunnen ze niet bij onopgeloste biopolymeren.

Koolhydraten worden ook wel sachariden genoemd. Zij bestaan uit opgeloste mono- en disachariden en niet opgeloste polysachariden. De mono- en disachariden kunnen al wel in de bacteriecel worden opgenomen, daarom is de hydrolyse alleen voor de polysachariden. Hieronder volgen enkele voorbeelden van sachariden:

Monosachariden:

- druivensuiker (D-glucose);
- vruchtensuiker (D-fructose).

Disachariden:

- moutsuiker (maltose);
- biet-/rietsuiker (sacharose);
- melksuiker (lactose).

Polysachariden:

- amylose (zetmeel);
- chitine;
- (hemi-)cellulose.

Eiwitten bestaan uit lange ketens van aminozuren. De extracellulaire enzymen knippen de ketens tot losse aminozuren. Een kenmerk van aminozuren is de aanwezigheid van een NH₂-groep en een carboxylgroep (COOH). Een voorbeeld van een aminozuur is alanine.

Vetten zijn opgebouwd uit een glycerolmolecuul en drie hogere vetzuren.

Voorbeelden hiervan zijn palmatinezuur en stearinezuur).

Acidogenese

Na het omzetten de niet-opgeloste biopolymeren in minder complexe, opgeloste verbindingen, volgt de acidogenese ofwel de verzuringfase. In de cellen van de fermentatieve bacteriën worden

opgeloste organische verbindingen omgezet in een reeks eenvoudige verbindingen. Een aantal producten die daarbij vrijkomen zijn:

- vluchtige vetzuren;
- alcoholen;
- waterstofgas (H_2);
- koolzuurgas (CO_2);
- ammoniak (NH_3).

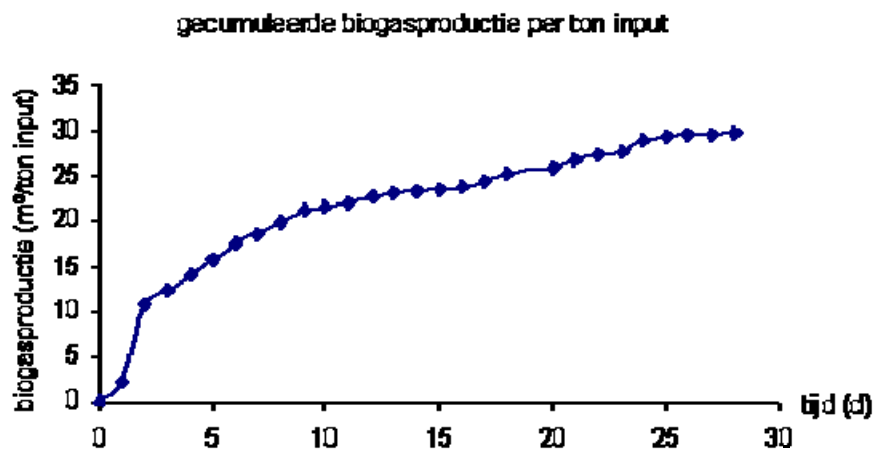
Deze producten hebben door hun samenstelling een verzurende invloed op de omgeving. Daarom wordt de fermentatiefase ook wel de zuurvormende fase genoemd.

Acetogenese

Hierbij vindt biochemische omzetting plaats van de in de fermentatiefase ontstane organische stoffen. Naast azijnzuur (CH_3COOH), koolzuurgas (CO_2) en waterstof (H_2) ontstaat er ook nieuw celmateriaal.

Methanogenese

In deze fase worden azijnzuur, waterstof en koolzuurgas omgezet in biogas. Dit biogas bestaat voornamelijk uit methaangas (CH_4) en koolzuurgas. Deze fase wordt ook wel de methaanvormende fase genoemd.



Figuur: biogasproductieverloop van slib

Productieproces biomassa tot bio-energie

Biomassa aanvoer

De aanvoer kan door middel van pompbediening en evt. met een shovel plaatsvinden, waarbij de pomp gebruikt wordt voor de vloeistoffen en de shovel voor de vaste stoffen. Pompen is de makkelijkste methode, het is zo dat de bestaande silo in de stal gepositioneerd kan worden waarbij de mest verzameld wordt en door middel van pomptechniek in de vergistinginstallatie wordt gebracht. Vaste stoffen en dergelijke zullen met een shovel, voorlader of lopend band systeem aangevoerd worden.



Figuur: Aanvoer biomassa

Biomassa opslag

Vloeibare bedrijfseigen biomassa kan worden opgeslagen in de hierboven genoemde silo.

Voor biomassa die afkomstig is van derden is er echter een andere factor van belang namelijk leveringsintervallen.

Om de aangeleverde vaste biomassa op te slaan zijn er een drietal mogelijkheden:

- Sleufsilos waarbij men met een shovel cq. voorlader opereert als transportlijn tussen de opslag en installatie;
- Staande silo, waarbij men door middel van een vijzel de biomassa uit de opslag haalt en deze vervolgens via de bovenstaande transportmethode naar de installatie vervoert;
- Opslagloods, hierbij dient deze echter wel een onderdruk systeem te hebben met een biofilter waardoor er geen emissies naar buiten toe kunnen treden.



Figuur: Biomassa opslag



Biomassa aanvoer

Biomassa kan afhankelijk van eigenschappen en hoeveelheid op verschillende manieren worden ingevoerd het rechtstreeks zijn of met een voorbewerking.

Natte biomassa stromen zoals drijfmest en spoeling wordt met een pomptechniek ingevoerd.



Figuur: Verpompen van biomassa



Figuur: Mengen van biomassa

Terwijl vaste biomassa eerst gemengd wordt met natte biomassa in een voormenger zodat deze verpompbaar is, of deze wordt afzonderlijk van de natte biomassa in de vergister gebracht.



Figuur: Vaste-stof vergister

Biomassa voorbewerking

Soms is het noodzakelijk dat biomassa voordat deze in de vergister gebracht wordt een voorbewerking dient te krijgen.



Figuur: Maïs als biomassa-input



Figuur: Vermengen biomassa

Dat kan komen doordat biomassa te grof is, gesteriliseerd dient te worden of dat er ongewenste residuïen kunnen zijn in een biogas installatie.

Grove stoffen zoals maïs, stro, hooiachtige producten die zullen eigenlijk niet groter moeten zijn dan 3cm. Hoe kleiner de biomassa delen zijn des te makkelijker kunnen de bacteriën zich er aan "vast" grijpen aan de organische stof.



Figuur: Sterilisatie biomassa

Sterilisatie is soms noodzakelijk wanneer er producten aanwezig zijn in de biomassa die bacteriën bevatten die gedood moeten worden, sterilisatie is ook noodzakelijk bij het gebruik van slachtafval waar volgens de richtlijnen een sterilisatiestap dient te worden gebruikt. Volgens de destructiewet dient er 20 minuten bij 3 bar op 133 graden te worden gesteriliseerd ook zal het eerst verkleind worden naar delen van 5 cm.



Figuur: Pomptechniek(incl. steen/gruis afvanger)

Ook als er vervuiling in zit zoals plastic en zand dan kan in sommige situaties zijn dat eerst die producten dmv zeef techniek waarbij de installatie wordt beschermd door alle ingaande biomassa te filteren in een grove zeef met een maaswijdte van circa 100 mm². Door grote vervuilingen zoals hout, ijzer, injectienaalden, stenen, enz. uit de biomassa te halen, hierdoor worden de gevoelige delen van de vergistinginstallatie beschermd. Denk hierbij aan pompen en mengvijzels.



Figuur: Afvoer Slib

Tevens kan er soms ook een filtratie plaatsvinden in de installatie zelf zoals bijvoorbeeld bij slibproducten.

De technische installaties

Inleiding

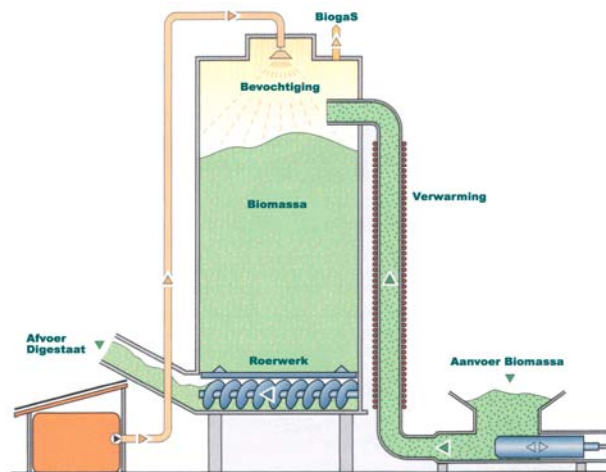
Een vergistinginstallatie is een technisch geheel waarin gebruik wordt gemaakt van natuurlijke processen om uit biomassa, energie te halen. Vergisten is het anaëroob afbreken van organisch materiaal door bacteriën. Via vergisting of fermentatie van de organische stof in de biomassa wordt biogas gevormd, dat na (biologische) ontzwaveling uiteindelijk verbrand kan worden in bijvoorbeeld een gasmotor (warmtekrachtkoppeling). Hierbij wordt duurzame energie in de vorm van thermische en elektrische energie geproduceerd. Dit stelt de veehouder in staat voor een groot deel in zijn eigen energiebehoefte te voorzien en eventueel energie te leveren aan het energienet of andere verbruikers. We onderscheiden 2 soorten vergisting:

1. natte vergisting
2. droge vergisting

Bij natte vergisting wordt de biomassa ondergedompeld in vloeistof en anaëroob (zuurstofloos in een afgesloten ruimte) vergist.

Bij droge vergisting, wordt de biomassa in ruimte opgeslagen en het evaluent er steeds over heen wordt gespoten waardoor de biomassa vergist.

Deze optie zal niet verder worden behandeld in dit hoofdstuk.



Figuur: voorbeeld opstelling droge vergisting

Typen natte vergistinginstallaties

Vergisters zijn in twee hoofdtypen in te delen: propstroomsystemen (batchsystemen) en doorstroom systemen. De doorstroomsystemen kunnen vervolgens nog ingedeeld worden in vergisters met constante inhoud en vergisters met variabele inhoud.



Figuur: Liggende vergister die in het verleden ook als propstroomvergister gebruikt werd. (deze kan echter ook als doorstroom vergister gebruikt worden)

Propstroomvergister

De propstroomvergister (ook wel batchsysteem genoemd) werkt volgens het "all in - all out"-principe. Dit wil zeggen dat de verse mest die het eerste de vergister ingaat, er ook als eerste vergiste mest weer uitkomt.

Hiervoor wordt in de regel een liggende vergister genomen. Bij traditionele propstroomvergisters werd de mest aanvankelijk niet gemengd. Hierdoor traden problemen op met drijf- en bezinklagen. Moderne propstroomvergisters worden daarom partieel geroerd met een langzaam lopende as met bladen in een horizontale tank. Door deze manier van mengen is er wel een verticale menging en geen horizontale. De verblijftijd in de vergister is dus nog steeds van vrijwel alle mest gelijk.

Propstroomvergisters hebben doorgaans een verblijf tijd van circa 20 dagen bij rundveemest en 15 dagen bij varkensmest.

De propstroomvergister als doorstroom vergister is een vergister waarbij mest aan de reactor wordt toegevoegd en er digestaat uit de reactor verdwijnt volgens het "first in-first out" principe. Deze reactor geeft de hoogste biogasopbrengst omdat alle mest even lang in de reactor verblijft, waardoor alle mest een even lange verblijf tijd heeft. De mest dient semi-continu toegevoegd te worden. Dit wil zeggen dat de reactor de mest in porties krijgt toegediend. Het is hierbij aan te bevelen om de reactor minimaal 1 keer per dag te voeden. Hoe frequenter de reactor binnen een etmaal wordt gevoed, hoe constanter het te vergiste mengsel en dus zo min mogelijk schommelingen voor de micro-organismen. De pH en de temperatuur blijven bij frequent toevoegen beter constant, dit is voordelig voor het vergistingsproces. In de reactor dient de mest geroerd te worden.

Het is bij dit type reactor noodzakelijk om een vooropslag van mest te hebben om een constante aanvoer van mest te garanderen. Daarnaast is er ook een opslag nodig voor het digestaat. Deze digestaatopslag is niet noodzakelijk als het digestaat na vergisting direct verder wordt verwerkt. Het is echter wel aan te bevelen om een buffer te hebben waarin het digestaat opgevangen kan worden als een storing optreedt in het verdere verwerkingstraject. Bij dit type reactor dient een klein deel van het digestaat teruggepompt te worden naar het begin van de reactor omdat het digestaat de methaanvormende bacteriën bevat. Dit is noodzakelijk om het gistingsproces, door enting met methaanvormende bacteriën voor aan in de reactor snel op gang te krijgen. Ook is zinvol om in de digestaatopslag het geproduceerde biogas op te vangen om zo de rentabiliteit van de vergister te verhogen. Het is echter zeer belangrijk dat het digestaat gescheiden wordt opgeslagen van de verse mest. Een propstroomvergister is geschikt voor biomassa met een drogestofgehalte tot 15%-20%. Het vergistingsproces bestaat uit 2 delen, namelijk de voorfermentatie en de nafermentatie. De biogasopbrengst bij een propstroomvergister, met dezelfde input, is 10% hoger als bij volledig gemengde reactoren.

Liggende vergisters kunnen ook als doorstroomvergister worden gebruikt.

In de reactor vindt minimale menging van biomassa met verschillende verblijftijden plaats. De biomassa gaat met een constante snelheid door de liggende vergister. Door het niet mengen van mest met verschillende verblijftijden, komt de tijd die een volume pakketje erover doet van het begin tot het eind, overeen met de totale verblijf tijd van de mest in de reactor. De afbraak keten zal zich hierbij in etappes van voor naar achteren plaatsvinden.

In het begin van de vergister zitten nog weinig methaanbacteriën, aan het eind heel veel. Door de geringe menging en door een klein deel van de vergiste mest weer terug te pompen naar het begin van de vergister, worden er ook methaan bacteriën in de verse mest gebracht. De biogasproductie komt hierdoor sneller op gang en is minder gevoelig voor veranderingen in samenstelling en processtoringen.

Voordelen +

Hogere biogasopbrengst t.o.v. staande vergisting systemen met even lange verblijftijd van de mest. Door het teruggpompen van digestaat naar het begin van de reactor komt de biogasproductie sneller op gang, waardoor deze minder gevoelig is voor veranderingen in de mestsamenstelling en processtoringen. Sterk drijvende biomassa kan het systeem beter verwerken.

Nadelen -

Een deel van het digestaat dient teruggevoerd te worden naar het begin van de vergister. Er is een vooropslag van mest en een naopslag van digestaat nodig.

Relatief hoge investering, vooral in roerwerk en pompen. Of de investering daadwerkelijk hoog is,

Zand en slib is eenvoudig te verwijderen
Systeem kan hogere drogestof % verwerken
Het digestaat bevat minder ziektekiemen.

hangt veel af van het rendement van de vergister. Dit geldt natuurlijk in principe voor iedere vergister.
Veel slijtage door groot aantal bewegende delen.
Externe gasopslag nodig
Minder stabiele ontzwaveling mogelijk

Volledig geroerde staande vergister met constante inhoud

De volledig geroerde vergister met constante inhoud is een systeem waarbij de verse mest volledig wordt vermengd met bijna vergiste mest. Niet alle mest heeft dus een even lange verblijftijd in de reactor. Bij dit type vergister verlopen de zure gisting en de methaanvergisting in dezelfde reactor, waardoor er nooit de optimale condities heersen voor beide processen. De gasopbrengst is daarom nooit maximaal. Het gehele proces speelt zich af in één reactor.

Een volledig geroerde vergister kan vloeistoffen vergisten met een drogestof percentage van maximaal 10%. In dit type reactor heeft de mest (afhankelijk van de mestsoort) een optimale verblijfduur van ongeveer 20 à 25 dagen bij mesofiele vergisting waardoor de vergister ook dienst kan doen als tijdelijke opslag. Een veel grotere verblijftijd heeft geen zin omdat daarna geen significante hoeveelheid gas meer wordt gevormd. Bij de reactor met constante inhoud blijft de inhoud van de vergister ongeveer op hetzelfde niveau. Deze reactor kan gezien worden als een vat waarbij er een deel van het digestaat uitloopt, als er een hoeveelheid verse mest wordt toegevoegd. Er is dan ook nog een opslag nodig voor het digestaat. Vooral bij dit type vergister is het aan te bevelen om het biogas, dat in de digestaatopslag ontstaat door nagisting, op te vangen om zo de rentabiliteit van de installatie te verhogen. Hierbij is het zaak om het digestaat gescheiden van de verse mest op te slaan.

Voordelen +

De vergister kan dienst doen als tijdelijke opslag van mest door de langere verblijftijd, tot wel 20 à 25 dagen bij mesofiele vergisting.

Als er reeds een opslagsilo voor de mest aanwezig is, kan deze in veel gevallen omgebouwd worden tot een volledig geroerde vergister.

Op het systeem kan goede biologische ontzwaveling toegepast worden

eventueel gas buffer is eenvoudig te plaatsen op de silo

Compact gecombineerd systeem van vergister, ontzwaveling en gasbuffer mogelijk

Nadelen -

Volledig geroerde vergisters kunnen stoffen vergisten met maximaal 10% droge stof.

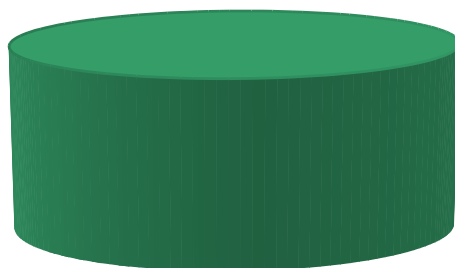
De gasopbrengst is niet optimaal, omdat de mogelijk aanwezig is dat vers ingebrachte biomassa dezelfde dag de vergister kan verlaten waardoor niet alle mest even goed vergist is.

Er is veel proceswarmte nodig om de mest op temperatuur te houden. Tevens dient 1/3 van de mest altijd in de vergister te blijven, aangezien een deel van de methaanvormende bacteriën moeten in de vergister blijven om het vergistingsproces opgang te houden.

Reactor is niet kiemvrij, omdat niet uitsluitend vergiste mest bij het digestaat kan zitten.

Sterk drijvende biomassa is veel energie nodig om deze onder het vloeistof niveau te houden

Grotere hoeveelheden zand en slib moeilijker te verwijderen

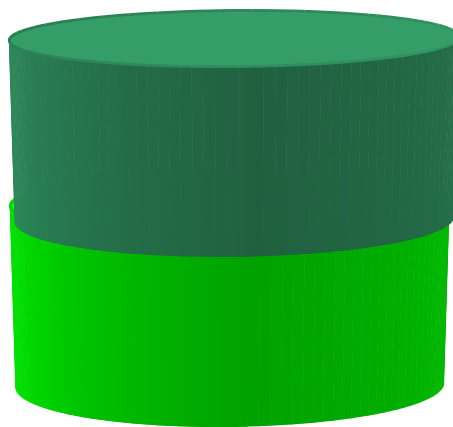


Volledig geroerde vergister met variabele inhoud

De volledig geroerde vergister met variabele inhoud, is een vergister waarbij de verse mest volledig wordt vermengd met bijna vergiste mest. Niet alle mest heeft dus een even lange verblijftijd in de reactor. Bij dit type vergister verlopen de zure gisting en de methaanvergisting in dezelfde reactor, waardoor er nooit de optimale condities heersen voor beide processen. De gasopbrengst is daarom nooit maximaal. Het gehele proces speelt zich af in één reactor.

Een volledig geroerde vergister kan maar vloeistoffen vergisten met een drogestof percentage van maximaal 10%. Bij de volledig geroerde vergister met variabele inhoud neemt echter het niveau van de vloeistof in de vergister steeds toe. De vergister dient tevens als opslag van het digestaat, er is dus geen navergister nodig. Doordat het digestaat in de vergister blijft, heeft deze vaak een behoorlijk grote inhoud. De verblijf tijd van de mest kan wel oplopen tot 5 maanden doordat de vergister tevens als opslag dienst doet. Bij het uitrijden van het digestaat gaat er biogas uit de mest verloren, die nog niet optimaal vergist is.

Daarnaast mag het digestaat nooit allemaal uit de vergister worden gehaald, de methaanvormende bacteriën verdwijnen uit de vergister en het vergistingsproces stopt.



Voordelen +

De vergister kan dienst doen als tijdelijke opslag van mest door de langere verblijftijd, welke wel kan oplopen tot 5 maanden.

Als er reeds een opslagruimte voor mest aanwezig is, kan deze omgebouwd worden tot een vergister.

Nadelen -

Volledig geroerde vergisters kunnen stoffen vergisten met maximaal 10% droge stof.

De gasopbrengst is niet optimaal, omdat niet alle mest even ver vergist is. Het is wel te verwachten dat de biogasopbrengst bij dit type vergister enkele procenten hoger is dan bij de volledig geroerde vergister met constante inhoud, doordat de mest bij dit type reactor verder is uitgest. Slechts een klein gedeelte van de mest heeft maar een kortere verblijf tijd gehad als eigenlijk nodig was.

Er is veel proceswarmte nodig om het proces op temperatuur te houden. . 1/3 van de mest dient altijd in de vergister te blijven, omdat anders alle methaanvormende bacteriën verdwijnen, waardoor het proces stopt.

Combinatiesystemen (tweetrapsvergister)

Het vergistingsproces wordt in twee fasen (tweetrapsproces) doorlopen, namelijk: voorfermentatie en nafermentatie. In de eerste fase wordt de mest opgewarmd, gehydrolyseerd en verzuurd. In een tweede silo, speelt de methaanvormende fase zich af. Het grootste gedeelte van het biogas wordt geproduceerd in het tweede gedeelte. Voordeel van deze methode is het creëren van een verbeterde leefomgeving door het scheiden van deze twee groepen bacteriën. Elk van de bacteriën soort heeft

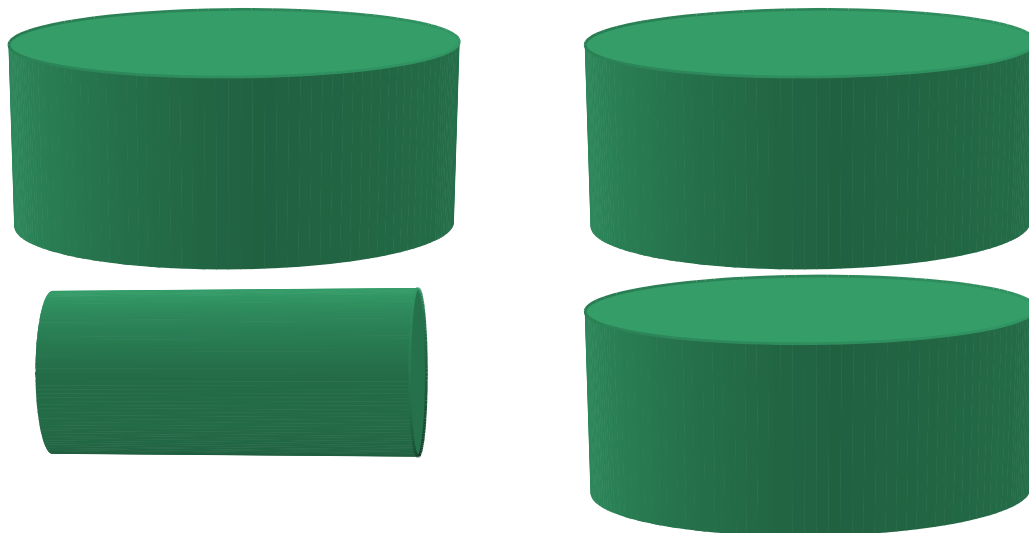
een optimale pH en verblijftijd. Hierdoor kan de biomassa beter werken dan in een gemengd systeem waarbij de temperatuur en verblijftijd afwijken van het optimum.

Omdat bij een liggende vergister alle mest een nagenoeg gelijke verblijf tijd heeft en voor de bacteriëngroepen een optimale pH en verblijftijd heersen vanwege het twee fasen systeem, produceert in theorie een liggende vergister 10% meer biogas dan een volledig geroerd systeem. Liggende vergisters kunnen vloeistoffen tot maximaal 15% d.s. verwerken, ook is het beter mogelijk om drijvende (bv Stro) en zinkende stoffen (zand Slib) in liggende vergister te vergisten, omdat drijvende stoffen altijd in het vloeistof niveau bevind, en zand en slib relatief eenvoudig te verwijderen is. Wel is externe gas opslag noodzakelijk.

De laatste jaren worden steeds vaker combinaties toegepast van staande vergisters en opslag van vergiste mest in een silo met gasopslag. Deze silo fungeert als navergister, het biogas dat na de hoofdvergister nog vrij komt uit het digestaat kan dan alsnog opgevangen worden in een gaszak boven de silo.

Door goede isolatie blijft het warmtegebruik van de vergister beperkt tot 20 - 30% van de totale warmteproductie.

Het elektriciteitsverbruik van de biogasinstallatie zelf bedraagt, bij installaties op boerderijschaal, circa 2,5% per dag.



Voordelen +	Nadelen -
Biomassa eigenschappen worden meer stap gewijs afgebroken	Duurder in aanschaf
Meer specifieke bacteriën in de diverse vergisters	Moet meerdere vergisters managen
Zand en slib kan in het eerste deel van installatie verwijderd worden	Veel pomptechniek noodzakelijk
Sterk opdrijven de biomassa eigenschappen kunnen in het eerste deel van de installatie ontnomen worden	
Meer management mogelijkheden omdat er meer vergisters zijn	
Bij biologie verstoring is slechts een deel van installatie verstoord waarbij het verstoorde deel snel weer opgestart kan worden door de niet verstoorde vergister	
Hogere biogas opbrengst	
Bij storing is slechts een deel van de installatie betrokken	

De ontzwaveling

Het biogas bestaat voor 40 tot 85% uit methaan (CH_4), voor 15 tot 60% uit koolzuurgas (CO_2). Daarnaast zijn er ook nog 0 tot 0,2% waterstof (H_2), 0 tot 0,2% stikstof (N_2), 0 tot 1 % zwavelwaterstof (H_2S) en enkele sporen van vluchtige organische componenten aanwezig. Zwavelwaterstof is schadelijk voor de motor van de warmtekrachtkoppeling en voor het leidingnetwerk. H_2S tast namelijk metalen als ijzer, koper en brons aan. Het is daardoor aan te bevelen om het leidingnetwerk, dat voor de ontzwaveling zit, niet van deze metalen te maken. Om zwavelwaterstof uit het biogas te verwijderen zijn diverse technieken voorhanden.

Sinds enkele jaren wordt biogas biologisch ontzwaveld, dit geschiedt door een kleine hoeveelheid lucht aan het biogas toe te voegen, dit geschiedt in een aparte ruimte of rechtstreeks in de gasopslag. Afhankelijk van de hoeveelheid H_2S in het biogas moet er 2 tot 6 vol. % lucht aan het biogas worden toegevoegd. Wanneer een beperkte hoeveelheid lucht wordt toegevoegd aan het biogas, ontstaat een reactie met de sulfide oxiderende bacteriën (zwavelminnende bacteriën). Uit deze reactie ontstaat als tussen product elementair zwavel, die als vaste stof terug te vinden is in het digestaat.

Wordt er echter teveel lucht toegevoerd, dan verloopt een tweede reactie. Hierbij wordt de elementaire zwavel omgezet tot zwavelzuur. Dit zwavelzuur zal in de mest weer omgezet worden in zwavelwaterstof, zodat er geen verwijdering van deze ongewenste stof heeft plaatsgevonden. Daarnaast wordt biogas in lucht een uiterst explosief mengsel.

Een juiste dosering van de toegevoerde lucht is uiterst belangrijk. De reductie van H_2S is afhankelijk van de temperatuur, bacterie hecht oppervlakte, luchtvochtigheid, de reactietijd, de hoeveelheid en de plaats van luchttoevoer. Bij goede omstandigheden kan er een reductie plaatsvinden tot een concentratiedaling onder de 50 ppm.

Een goede ontzwaveling is noodzakelijk voor behoud van een WKK men zal zwavel waarden altijd op nemen in garantiebepalingen

Deze methode kan vrij eenvoudig toegepast worden met goedkope materialen. Een meetinstrument dat het zwavelwaterstofgehalte in het biogas meet, kan indiceren of er iets meer of iets minder lucht aan het biogas toegevoegd moeten worden. Dit toevoegen kan uiterst eenvoudig gebeuren met bijvoorbeeld een simpel aquarium pompje. Deze methode werkt uiterst effectief tegen lage kosten, tegenwoordig is deze methode dan ook het meest toegepast bij mestvergistingsinstallaties op boerderijniveau. Deze heeft dan ook voor het bedrijf Mts. Swart-Agricola de voorkeur.

In het verleden werd ijzerchloride (FeCl_3) gedoseerd in de reactor. Een reductie tot minder dan 100 ppm. is in het verleden gehaald. Deze hierdoor bereikte zuivering is meestal niet voldoende waardoor er een extra nazuivering nodig kan zijn.



Het biogas kan biologisch gezuiverd worden door middel van een vastbedreactor. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een waterscrubbel (adsorptie) in combinatie met een biologische ontzwavelingsunit. Bij dit principe wordt water over een filter gesprengd. In het filterbed komen water en lucht elkaar in tegenstroom tegen. Aan het biogas wordt 4 - 6 vol.% lucht toegevoegd voordat deze de zuivering ingaat. Het filterbed biedt de mogelijkheid voor scrubben en het laten groeien van

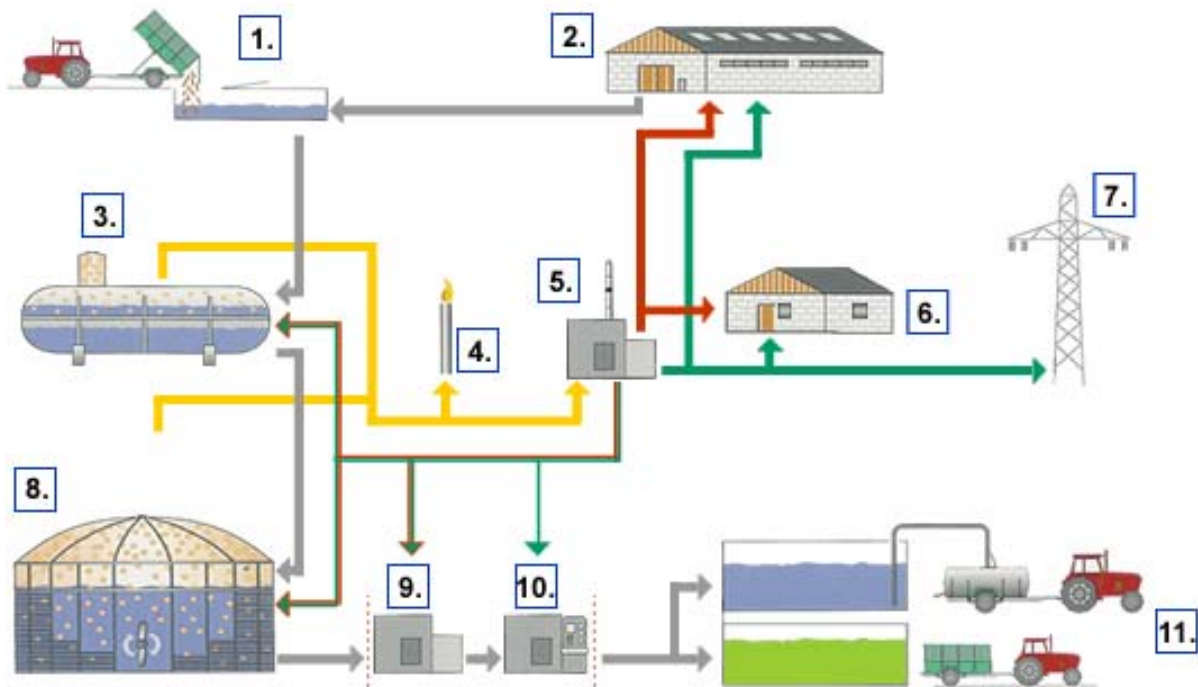
Figuur: biologische ontzwaveling boven een staande vergister

ontzwavelende micro-organismen. Hierbij ontstaat zwavelzuur dat terug te vinden is in het digestaat.

Tenslotte kan er ook gekozen worden om het biogas door een kist met vetvrije roestende ijzerkrullen leiden. Bij deze methode kan de kist met ijzerkrullen geregenereerd worden, waardoor deze steeds opnieuw gebruikt kunnen worden. Nadeel van deze methode is dat er veel warmte vrijkomt bij regeneratie.

De systeemkeuze

De optimale systeemopstelling zal aan de hand van onderstaand schema worden weergegeven.



Figuur: mogelijke systeemopstelling

1. Vooropslag
2. Stal
3. Liggende vergister
4. Gasfakkel
5. Warmte/Kracht koppeling
6. Woonhuis
7. Levering aan het net
8. Navergister met ontzwaveling en gasbuffer
9. Mogelijke sterilisatie
10. Separatie
11. Na-opslag digestaat voor dunne en vaste fractie

Biogasopslag

Het biogas zal opgeslagen dienen te worden, omdat de biogasproductie niet altijd precies overeenkomt met de brandstofbehoefte van de warmtekrachtkoppeling. Het biogas kan worden opgeslagen in een gaszak welke bijvoorbeeld boven in de vergister geplaatst kan worden. Als de elektriciteitsproductie op de pieken in de stroomvraag wordt afgestemd, is er een relatief grote gaszak nodig met een opslagcapaciteit van ongeveer één dag. De grootte van de gaszak hangt dus af van het doel dat wordt nagestreefd met de elektriciteitsproductie. Voor de biogasbuffer wordt echter steeds meer een staande vergister gebruikt met als gecombineerd doel nl. vergister, ontzwaveling en biogasbuffer.



Figuur: Externe dubbele membraan biogas opslag



Figuur: externe trapezium biogasopslag



Figuur: externe biogaszak



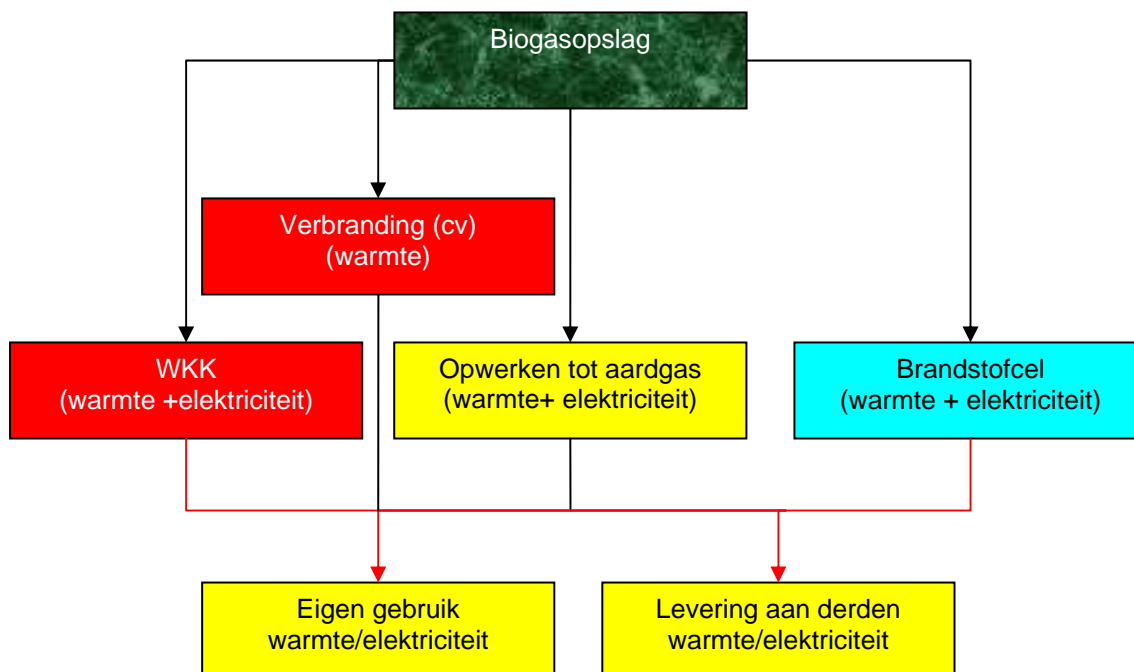
Figuur: vergister/ontzweveling/gasbuffer



Figuur: vergister met gasbuffer

Biogasbenutting

De verschillende manieren die momenteel bestaan of nog in ontwikkeling zijn, staan beschreven in onderstaande schema.



Warmte/Kracht koppeling (WKK)

Bij een warmtekrachtkoppeling wordt het biogas, nadat het ontdaan is van zwavelwaterstof, door een benzine- of een aangepaste dieselmotor geleid. Dit biogas drijft de motor aan. De mechanische kracht van de motor wordt middels een generator omgezet in elektriciteit. Het koelwater van de motor levert daarnaast ook nog thermische energie. Doorgaans hebben de huidige motoren een elektrisch rendement van 32,5% en een thermisch rendement van 55%. De elektriciteit kan (voor een deel) op het eigen bedrijf worden gebruikt. Het overschot kan dan aan het net worden teruggeleverd tegen een vergoeding per kilowattuur (kWh). Ook de warmte kan worden gebruikt. Deze is namelijk voor een deel nodig om het de mest in de vergister op temperatuur te houden. Daarnaast is de warmte ook te gebruiken voor de verwarming van stallen, zoals in de varkenshouderij gebruikelijk is. Mede hierdoor zullen de afzetmogelijkheden van de warmte voor melkveehouderijbedrijven beperkt zijn. Ook kan het digestaat gedroogd worden door de vrijgekomen warmte.

Tenslotte kan de warmte ook bij derden worden afgezet, zoals bij een glastuinbouwbedrijf of een ander soort bedrijf dat warmte vraagt. Voorwaarde is echter wel dat dit bedrijf redelijk dicht in de buurt gelegen is, in verband met de warmteverliezen.

In een enkel geval kan het zo zijn dat er een glastuinbouwbedrijf in de omgeving van de vergister gevestigd is. In dat geval is het ook mogelijk om de CO₂, die vrijkomt bij verbranding van het biogas in de WKK, te leveren aan dat bedrijf.

Indien er geen bestemming voor de warmte gevonden kan worden gaat deze verloren. Dit heeft echter een negatieve invloed op de rentabiliteit van de mestvergisting.

Energiebenutting WKK

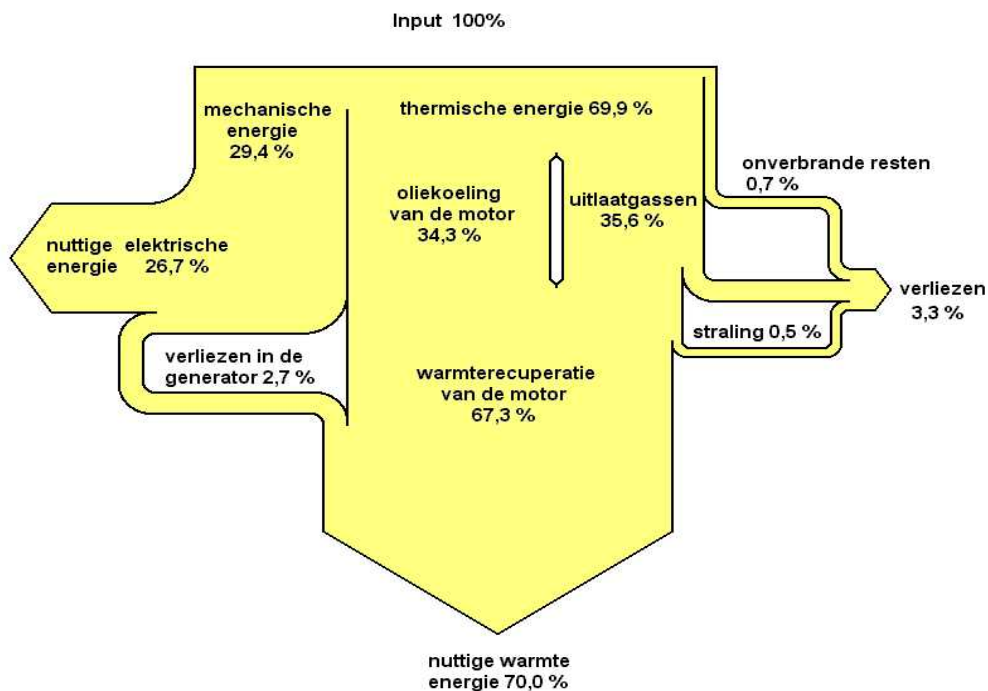
Vuistregel: 1 kg organisch materiaal (koolhydraten) geeft bij vergisting 350 liter methaangas (CH₄ 100%).

Calorische waarde Biogas: 20 tot 30 MJ/Nm³

Zuiver Methaan: 35 MJ/Nm³

Gemiddeld Biogas: 25 MJ/Nm³

25% van de totale energieproductie is nodig voor de verwarming van de biogasdigester.



Figuur: Energiestroom diagram van een totaal-energie-installatie

Energiebalans

Gezien het feit dat de methaangisting gewoonlijk bedreven wordt bij temperaturen van 35°C en meer, is het aangewezen de vergistingstank zo goed mogelijk te isoleren teneinde de warmteverliezen zo sterk mogelijk te beperken.

Als vuistregel gelden dat bij de vergisting van suspensies bij 35°C ca. 20-30% van het geproduceerde gas terug moet worden geïnvesteerd in de opwarming van de reactor.

Een voorbeeld zal dit verduidelijken:

- Stel een suspensie met 80 kg organische stof per m³.
- De suspensie wordt vergist in een reactor bij 35°C.
- De verblijftijd bedraagt 10 dagen.
- Het vergistingrendement (afbraak van organisch materiaal) belooft 60%.
- De productie aan biogas (70% CH₄) correspondeert met 0,5 m³ per kg vergiste grondstof.
- De temperatuur van de grondstof bedraagt 10°C, de buitentemperatuur is ook 10°C.

Nu geldt:

- totale gasproductie per m³ aangeboden grondstof:

$$80 \times 0,6 \times 0,5 = 24 \text{ m}^3 \text{ biogas}$$

- bruto energieproductie per m³ aangeboden grondstof:

$$24 \text{ m}^3 \text{ biogas} \times 25 \text{ MJ/m}^3 = 600 \text{ MJ}$$

- de energie vereist voor opwarming van 1 m³ van 10°C tot 35°C:

$$1,0 \times 4,18 \times 25 = 104 \text{ MJ}$$

- de energie vereist om de warmteverliezen te compenseren:

$$Q = k A (t_i - t_o) \text{ (Joules/sec = Watt)}$$

met:

k = warmtegeleidingcoëfficiënt van de reactorwand;

0,2 W/m². °K voor 20 cm polystyreen isolatie.

A = buitenoppervlak van de tank,

voor h = 10 dgn komt dit op een reactor van 2 m diameter en 3 m hoogte of een oppervlak van 25 m².

t_i = temperatuur in de tank.

t_o = omgevingstemperatuur.

$$Q = 0,2 \times 25 \times (35 - 10)$$

nu is h = tijd dat de vloeistof in de reactor verblijft

= 10 x 86,4 x 10³ sec of het totaal warmteverlies bedraagt:

$$Q \times 10 \times 86,4 \times 10^3 = 108 \times 10^6 \text{ J of } 108 \text{ MJ}$$

- de netto energieopbrengst bedraagt dan:

$$\frac{600 - (104 + 108)}{600} \times 100 = 65\%$$

Het is duidelijk dat de netto energieopbrengst toeneemt naarmate:

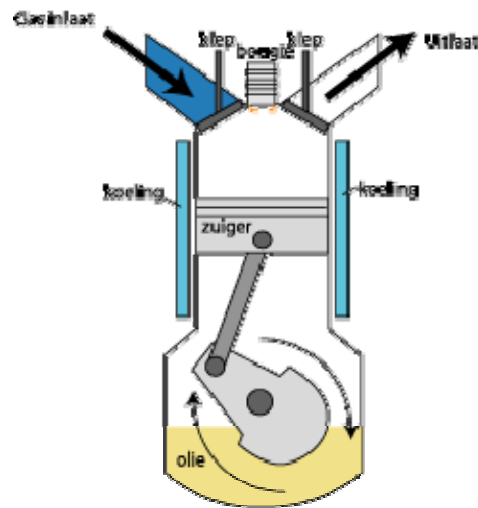
- de reactor groter wordt. Men rekent met warmteverliezen van 2,5 MJ/m³.dag voor reactoren vanaf 100 tot 3000 m³ en van 1,5 MJ/m³.dag voor reactoren groter dan 3000 m³.;
- de verblijftijd in de reactor afneemt, vandaar de noodzaak om het fermentatie en methanogenese proces zo snel mogelijk te doen verlopen. Bij de thermofiele gisting (55°C) belooft de energievraag tot 50% van de productie.



De gasmotor

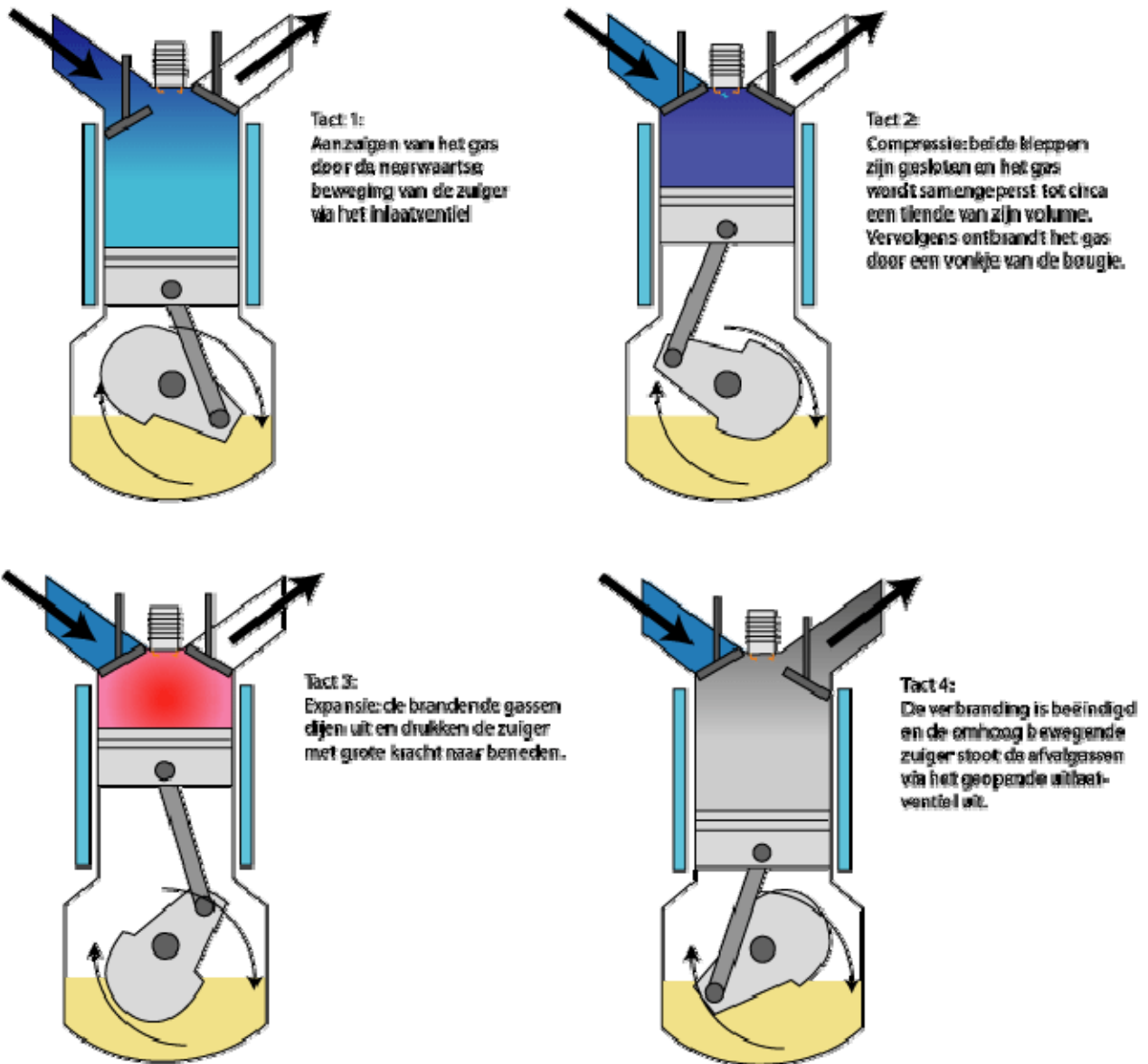
De term gasmotor wordt algemeen gebruikt in de energiewereld, maar is misschien een wat ongelukkige benaming gezien de verscheidenheid aan motoren die met deze term worden aangeduid. Deze term geeft voornamelijk aan dat de machine een gasvormige brandstof gebruikt. Bijna alle gasmotoren

werken volgens het principe van de Ottomotor. De Duitse uitvinder Otto begon in 1861 met de ontwikkeling van "Gaskraftmaschinen". De doorontwikkelde viertaktmotor van Otto is als benzinemotor in enorme aantallen geproduceerd. De keus voor een vloeibare brandstof had natuurlijk vooral te maken met het gebruik in auto's. Voor de historische eerste ritten per auto gebruikte Otto spiritus. Die brandstof was bij elke apotheker gemakkelijk te krijgen. De spiritus werd evenals naderhand de benzine verdampt in de aangezogen verbrandingslucht, zodat het eigenlijk toch een gasmotor is. De bouw van Ottomotoren startte in 1867 bij de Gasmotorenfabrik Deutz in Keulen.



Figuur: Doorsnede gasmotor

De normale gasmotor, zoals die met name in WKK wordt toegepast, werkt evenals de benzinemotor volgens het viertaktprincipe, waarbij een zuiger in een cilinder vier werkslagen kent. Bij de aanzuigslag wordt een mengsel van brandstofgas en lucht aangezogen. De inlaatklep staat dan open. In de compressieslag zijn de kleppen gesloten en wordt het mengsel samengeperst. Vlak voor het eind van deze slag wordt het mengsel met de bougie ontstoken. Het mengsel verbrandt, waarbij druk en temperatuur snel stijgen. In de expansieslag wordt de arbeid geleverd. Daarna wordt het mengsel in de vierde slag van de zuiger bij geopende uitlaatklep afgevoerd naar het uitlaatsysteem. Moderne gasmotoren hebben vaak een turbocharger. De hete uitlaatgassen drijven dan via een expansieturbine een luchtcompressor aan. Daardoor kan de motor aanzienlijk meer vermogen leveren en neemt ook het rendement toe. Bij veel turbogasmotoren worden verbrandingslucht en brandstof gemengd, voordat de lucht door de turbo in druk wordt verhoogd. Daardoor behoudt men een belangrijk voordeel van de gasmotor. Dat is de geringe gasdruk, die nodig is om de motor te laten werken. Gasturbines en turbomotoren zonder mengseloplading hebben een hogere gasdruk nodig, wat vaak het gebruik van een gascompressor nodig maakt.



Figuur: Uitleg werking gasmotor

Het vermogen van de gasmotor wordt geregeld met een smoorklep in de inlaat van de verbrandingslucht.

Door optimalisatie van het ontwerp heeft men het asrendement van een gasmotor steeds verder kunnen opvoeren. De modernste motoren halen bij een aandrijving van een generator een elektrisch rendement van 40% tot 45%. Dat geldt voor motoren met een vermogen van 1000 kW tot meerdere MW. Kleinere motoren halen rendementen van circa 35%. De kleinste in Europa toegepaste gasmotor voor wkk heeft een elektrisch vermogen van 5,5 kW en een rendement van 26%. De genoemde rendementen gelden voor bedrijf bij maximaal vermogen. Bij deellast daalt het asrendement en wordt er naar verhouding meer warmte geproduceerd.

De warmte van het motorkoelwater, de olienkoeler, de uitlaatgassen en de eventuele intercooler bij een turbo kunnen weer benut worden voor verwarming, zodat het totaal energetisch rendement 85 tot bijna 100% kan zijn afhankelijk van de toepassing.

Het rendement aan de as van de motor is wel afhankelijk van de brandstof.



Figuur: Grote WKK-installatie

Brandstofkwaliteit en methaangetal

Moderne gasmotoren zijn ontwikkeld voor aardgas. De hoofdcomponent van aardgas is methaan (CH_4). De klopvastheid van de brandstof wordt dan ook uitgedrukt in een methaangetal, waarbij voor pure methaan het getal 100 geldt. Hoe hoger het methaangetal is, des te klopvaster is de brandstof en des te hoger is de druk waarbij het mengsel spontaan ontbrandt. De motor mag bij een hogere klopvastheid dus een hogere compressieverhouding

hebben. Een hoge compressie is gunstig voor het asrendement van de motor.

Omdat aardgas ook wat hogere koolwaterstoffen bevat, die makkelijker branden, haalt aardgas een methaangetal van ca. 78. Biogas uit waterzuiveringen en afvalstortplaatsen is een mengsel van pure methaan en CO_2 . De CO_2 werkt vertragend op de verbranding, waardoor het methaangetal van biogas zelfs ruim boven de 100 ligt.

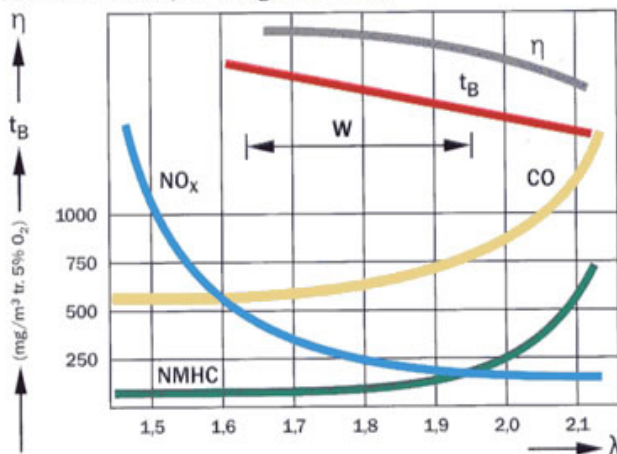
Gassen met waterstof, zoals houtgas, ontsteken erg makkelijk en hebben een laag methaangetal. Motoren voor dergelijke gassen moeten een aanzienlijk lagere compressieverhouding hebben dan motoren voor aardgas en leveren daarmee ook minder kracht per toegevoerde eenheid energie. Ook op LPG of propaan levert de gasmotor op deze punten in t.o.v. een gasmotor op aardgas.

Uiteraard moet de brandstof vrij van waterdruppels en stof zijn. Stoffen, die met name in biogas en stortgas voorkomen zoals H_2S en Cl zijn afhankelijk van de motorfabrikant slechts in geringe concentraties toegestaan. Voor de slijtage veroorzakende siloxanen in deze gassen zijn wassers ontwikkeld.

Emissies

Aardgas en biogas zijn mooie brandstoffen. Ze leveren relatief weinig CO_2 en geen stofdeeltjes. Ook de emissie van NO_x is veel lager dan bij een dieselmotor. Omdat gasmotoren gewoonlijk echter veel uren draaien, heeft de overheid hoge eisen gesteld aan de emissie van NO_x . De gasmotorenfabrikanten hebben twee wegen gevolgd om de emissies te verlagen. De eerste oplossing is toepassing van een driewegkatalysator evenals in de benzinemotor van een auto. De tweede en meest populaire oplossing is het draaien op een arm mengsel. Door een forse overmaat aan verbrandingslucht te gebruiken, daalt de temperatuur bij de verbranding en daarmee wordt de vorming van NO_x ook sterk verlaagd. De reactie tussen stikstof en zuurstof in de lucht komt alleen bij hoge

Emissieverhalten, $W \triangleq$ Mager- λ -Fenster



temperatuur voor. Zogenaamde armmengselmotoren (lean burn) leveren meer kracht per eenheid brandstofenergie dan motoren met driewegkatalysator, die geen overmaat aan verbrandingslucht kunnen gebruiken vanwege de werking van de katalysator.

Voordeel van de motor met driewegkatalysator is dat ook koolmonoxide en onverbrand gas worden omgezet in de katalysator.

In de glastuinbouw worden de rookgassen van gasmotoren gebruikt om de lucht in de kas te verrijken met CO_2 . Dat bevordert tot op zekere hoogte de groei van de planten.

Bij deze CO_2 -bemesting moeten de rookgassen extreem schoon zijn. Daarvoor gebruikt men een katalysator met selectieve reductie en een oxidatiekatalysator. Ureum wordt ingespoten in de hete

rookgassen. Het ureum wordt omgezet in ammoniak, die de NO_x reduceert. Daarmee is een extreem lage emissiewaarde van NO_x haalbaar. CO en koolwaterstofverbindingen worden door de oxidatiekatalysator omgezet, zodat de uitlaatgassen bijzonder schoon zijn.

Bijzondere uitvoeringen

Niet alle gasmotoren werken volgens het principe van de Ottomotor. Er zijn ook grote gasmotoren die werken als een dieselmotor. Het gas wordt dan onder een hoge druk van meer dan 200 bar, op het moment dat de verbranding gewenst is, geïnjecteerd. Een dergelijke motor haalt door een hogere compressie, en het ontbreken van de weerstand van een smoorklep, een hoger rendement dan een Ottogasmotor. Een deel van dit voordeel gaat verloren door de energie die de gascompressor verbruikt.

Sommige dieselmotoren werken wel met een normaal aangezogen mengsel van gas en lucht, maar ontsteken het mengsel door een beetje dieselolie te injecteren. Zogenaamde 'dual fuel' motoren kunnen vanaf een minimum aandeel olie voor ontsteking tot maximaal vermogen met dieselolie werken. Dat is aantrekkelijk als men, op momenten dat aardgas duur of niet beschikbaar is, toch over het volle vermogen wil beschikken.

De ontwikkelingen bij het rijden op aardgas in Duitsland hebben tot hernieuwde aandacht voor de gasmotor geleid. Een interessant ontwikkelingstraject op dit terrein is de DING-motor (Directe Injectie Natuurlijk Gas). Dit is een gasmotor voor vrachtauto's met directe injectie van aardgas volgens het dieselpincipe. Ruhrgas en de technische hogeschool van Dortmund werken aan de bouw van een Mercedes Atego demonstratievoertuig met een DING-motor die aanzienlijke milieuvoordelen zal hebben voor bussen en vrachtvervoer in binnensteden. Deze ontwikkeling kan ook voordeel bieden bij toepassing in wkk.

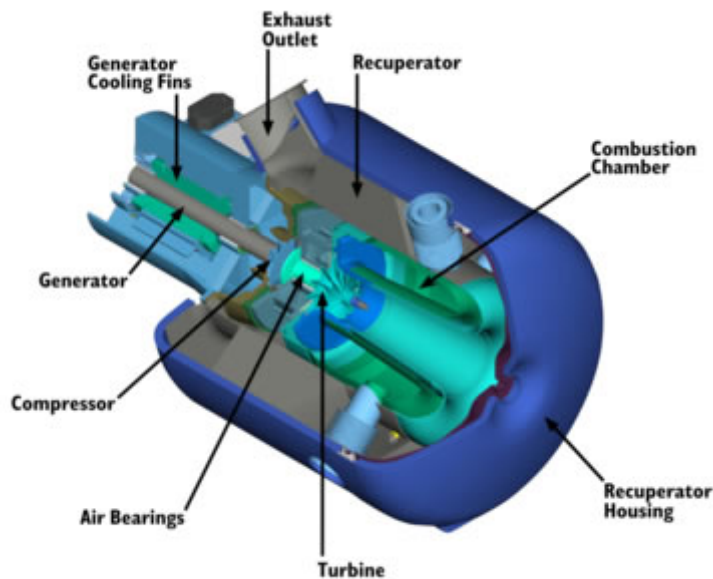


Figuur: WKK transport

Microturbine

De microturbine is een nieuwe ontwikkeling, waarbij gasturbines met heel gering vermogen en een relatief hoog rendement elektriciteit kunnen produceren. Daarbij is de verbranding erg schoon waardoor emissies van schadelijke stoffen als NO_x en CO laag zijn.

In een gasturbine wordt buitenlucht aangezogen en gecomprimeerd. De lucht, die door de compressie al warm is, wordt verder verhit door verbranding van een vloeibare of gasvormige brandstof. De gecomprimeerde en hete rookgassen expanderen in een turbine en leveren daarbij kracht. In de microturbine wordt eenzelfde proces doorlopen. Het probleem van de gasturbine, dat het omzettingrendement erg laag is bij kleine vermogens, is bij de microturbine ondervangen door een combinatie van technieken. Zo wordt de restwarmte in de rookgassen, nadat ze de expansieturbine verlaten hebben, voor een deel gebruikt om de gecomprimeerde lucht verder op te warmen voordat deze de verbrandingskamer ingaat. De warmte, die zo in een zogenaamde recuperator wordt teruggewonnen, helpt mee om kracht te leveren in de expansieturbine. Deze recuperatie van rookgaswarmte is wel wat te vergelijken met het proces in moderne STEG-centrales, waar de rookgaswarmte uit een gasturbine gebruikt wordt om stoom te maken voor extra vermogen in een stoomturbine. De constructie van een recuperator vergt hoogwaardige techniek. De wand moet de warmte van de hete rookgassen overdragen op de verbrandingslucht, waarbij de drukverliezen heel gering moeten zijn en de bouw toch compact. De recuperator moet bestand zijn tegen hoge temperaturen, vermoeiing door uitzetten en krimpen.



Figuur: Doorsnede Microturbine

Bij de microturbine worden compressor, expansieturbine en generator op één as samengebouwd. De generator draait met hetzelfde toerental als de turbine, waardoor verliezen in tandwieloverbrengingen worden vermeden. Het toerental van de generator wordt daarmee wel extreem hoog. De kleine turbinewielen kunnen wel tot 100.000 omwentelingen per minuut komen! Het is duidelijk, dat de ontwikkeling van generatoren hiervoor om moderne technologie vraagt. De wisselstroom van de generator wordt door omvormers eerst omgezet naar gelijkstroom en vervolgens naar een wisselstroom, die past op het elektriciteitsnet. Door gebruik te maken van frequentie-omvormers mag het toerental van de generator ook variëren zonder dat dit problemen geeft voor de koppeling aan het elektriciteitsnet, dat een vaste frequentie heeft van 50 Hz. Daardoor kan de microturbine ook makkelijk in vermogen variëren en daalt het rendement bij deellast minder sterk dan normaal bij een gasturbine. Terwijl bij grotere gasturbines de stroming van de verbrandingslucht in de compressor en de rookgassen in de expansieturbine evenwijdig aan de as is (axiaal) en compressor en expansieturbine meerdere rijen schoepen hebben, is bij de microturbine gekozen voor een radiale stroming. Compressor en expansieturbine zijn elk een wiel met waaivormige schoepen net als de turbo in een automotor. Hierdoor blijft de constructie compact en eenvoudig.

Dankzij een uitgekiend ontwerp van de verbrandingskamer kan een zeer schone en volledige verbranding worden bereikt. Daardoor is de emissie van verbrandingsproducten als NO, NO₂ en CO en van onverbrande brandstofdeeltjes minimaal. Vanwege deze schone verbranding is in Zweden al een praktijkproef opgezet om de rookgassen direct een tuinbouwkas in te blazen, zodat de CO₂ in de rookgassen dienst kan doen als meststof. Dit kan bij gasmotoren alleen na reiniging van de rookgassen in een SCR-katalysator.

De rookgassen van een microturbine hebben door de recuperator een relatief erg lage temperatuur van circa 270 °C. De resterende warmte kan bij wkk-toepassing deels teruggewonnen worden met een warmtewisselaar voor CV/water. Een energetisch aantrekkelijker oplossing is het gebruik van de rookgassen direct in een droger, oven of ketel. Dankzij de zeer grote luchtvermaat bij gasturbines is naverbranding in de rookgassen goed mogelijk.

Momenteel is er een handvol fabrikanten van microturbines, die nog in beperkte aantallen produceren. Verwacht wordt, dat bij massaproductie een gunstige prijs per kW vermogen bereikt wordt. Het elektrisch vermogen loopt momenteel van 30 tot 100 kW voor een microturbine. Het elektrisch rendement ligt in de buurt van 30% bij maximum vermogen. Een microturbine, die op aardgas moet lopen, heeft gas met een druk van ca. 5 bar nodig om toevoer naar de verbrandingskamer te kunnen realiseren. Als er alleen maar gas op lage druk beschikbaar is, dan moet een gascompressor worden gebruikt en daalt het elektrisch rendement wegens het verbruik van de compressormotor. De eerste microturbines zijn inmiddels al in Nederland in bedrijf.

Milieuvoordelen

De microturbine levert in wkk-toepassing een forse energiebesparing op t.o.v. afzonderlijke opwekking van elektriciteit in centrales en warmte in een c.v.-ketel. Dat geldt natuurlijk ook voor wkk met gasmotoren. Het elektrisch rendement van de microturbine is nog wat lager dan van de gasmotor. Bij toepassing in een normale c.v.-installatie is ook het totaalrendement lager, omdat bij de microturbine meer warmte in de schoorsteen verdwijnt door de grote overmaat aan verbrandingslucht. Door die grote luchtvermaat is de temperatuur, waarbij condensatie van waterdamp in de rookgassen optreedt ook een stuk lager dan bij een gasmotor. Daar staat tegenover, dat de microturbine in tegenstelling tot de gasmotor erg geschikt is voor combinaties met drogers, ovens, etc. en in deze situaties evenals bij gebruik van de rookgassen voor naverbranding het rendement optimaal is. De microturbine levert ook zeer schone rookgassen, iets wat met de gasmotor alleen met kostbare katalysatorsystemen mogelijk is. De microturbine levert slechts heel weinig verzurende (NOx) en giftige (CO) stoffen.

De microturbine heeft door het geringe aantal bewegende onderdelen naar verwachting weinig onderhoud nodig. Bij een prijsdaling door massaproductie kan de microturbine een belangrijke bijdrage leveren aan de groei van kleinschalige wkk en daarmee aan de reductie van de emissie van CO₂. Daarbij spelen ook andere voordelen mee zoals weinig onderhoud, compacte bouw, weinig trillingen en eenvoudig te dempen geluidsspectrum.

Aandachtspunten

Het vermogen van een microturbine varieert evenals dat van zijn grotere broers met de aanzuigluchttemperatuur. De compressor kan meer koude lucht verwerken dan warme. Het vermogen ligt daardoor 's winters wel 10% hoger dan in de zomer.

Om het vermogen te halen, moeten verder de weerstanden in het lucht-aanzuigstelsel en in de rookgasafvoer minimaal zijn.

Als er aardgas met voldoende voordruk beschikbaar is kan het gebruik van een gascompressor worden vermeden. Informeer naar de minimum druk, omdat de druk in het gasnet daalt bij hoge afname in koude winterdagen.

Voor een maximale benutting van de warmte is bij gebruik voor CV een watercircuit met lage temperatuur, bijvoorbeeld voor vloerverwarming, voorverwarming van ventilatielucht, voorverwarmen van tapwater, enz. aantrekkelijk. De rookgassen bevatten bij afkoeling tot normale Cv watertemperatuur nog veel warmte.



Organic Rankine Cycle

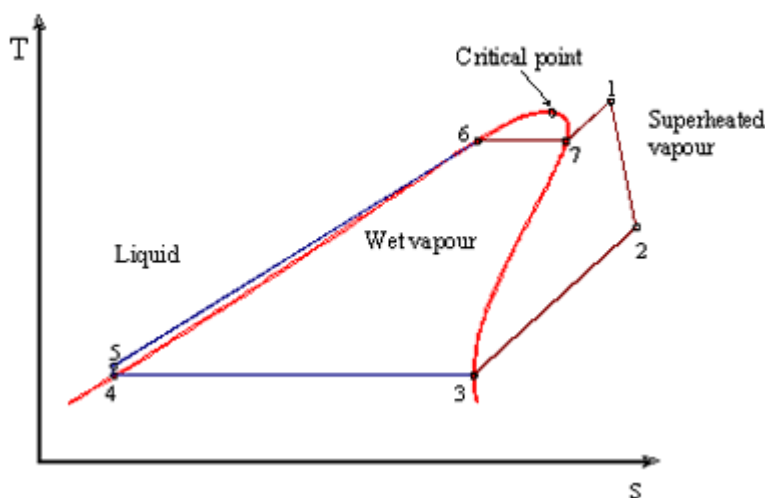
Een Rankine-cyclus is een thermodynamisch proces, dat in veel elektriciteitscentrales gebruikt wordt voor de opwekking van elektriciteit. In deze cyclus wordt in een stoomketel oververhitte stoom (dat wil zeggen verwarmd tot een temperatuur boven het kookpunt bij die druk) onder hoge druk geproduceerd. Deze stoom expandeert vervolgens in een stoomturbine die een generator aandrijft. Daarna wordt de stoom gecondenseerd in een

water- of luchtgekoelde condensor en wordt het condensaat teruggepompt naar de stoomketel. Bij deze water-stoomcyclus is het belangrijk om de stoom te oververhitten om de vorming van condensaatdruppels in de stoomturbine te vermijden.

Door de cyclus uit te voeren met een organische stof, in plaats van met water en stoom, die verdampt en condenseert bij een lagere temperatuur dan water, zijn er belangrijke voordelen te behalen als het proces met lagere temperaturen werkt. De temperatuur waarbij de organische stof een hoge druk bereikt, is afhankelijk van de stof. Daarnaast hebben sommige organische stoffen zulke fysische eigenschappen dat oververhitting niet nodig is. Dat fenomeen is te danken aan het feit, dat deze stoffen bij het expanderen in het superkritische gebied blijven. In dit gebied kan een stof niet in vloeistofvorm bestaan. Ten slotte is bij organische stoffen de verdampingswarmte minder hoog dan bij water (vanwege het ontbreken van waterstofbruggen) en is een groter aandeel van de warmte benutbaar voor opwarming van de vloeistof. Dat is een prettige eigenschap als het om benutting van restwarmte gaat.

Deze eigenschappen maken het mogelijk om een Organic Rankine Cycle te gebruiken om met laagwaardige warmte nog elektriciteit op te wekken. De minimum temperatuur waarbij dit proces nog praktisch mogelijk is, bedraagt ongeveer 80 °C. Uiteraard neemt het rendement toe naarmate de temperatuur van de beschikbare warmte hoger is. Dan is immers ook de exergiewaarde van de warmte hoger. Bij lagere temperatuur kan ongeveer 10% van de warmte omgezet worden in elektriciteit. Bij hogere temperaturen neemt dit toe tot ruim 20%. Dan is het ook mogelijk om de condensor op een hogere temperatuur te houden, zodat de condensatiewarmte nog weer eens benut kan worden voor verwarming van gebouwen. Deze vorm van wkk wordt bijvoorbeeld toegepast in biomassacentrales, waar het ORC-proces technische voordelen biedt bij het ontwerp van de ketel. Bij de ORC kan de vuurhaard op lagere temperatuur gehouden worden dan bij een stoomketel. De vuurhaard wordt gekoeld met thermische olie. Een voorbeeld van een dergelijke toepassing is het project Biostrom in het Oostenrijkse Hard.

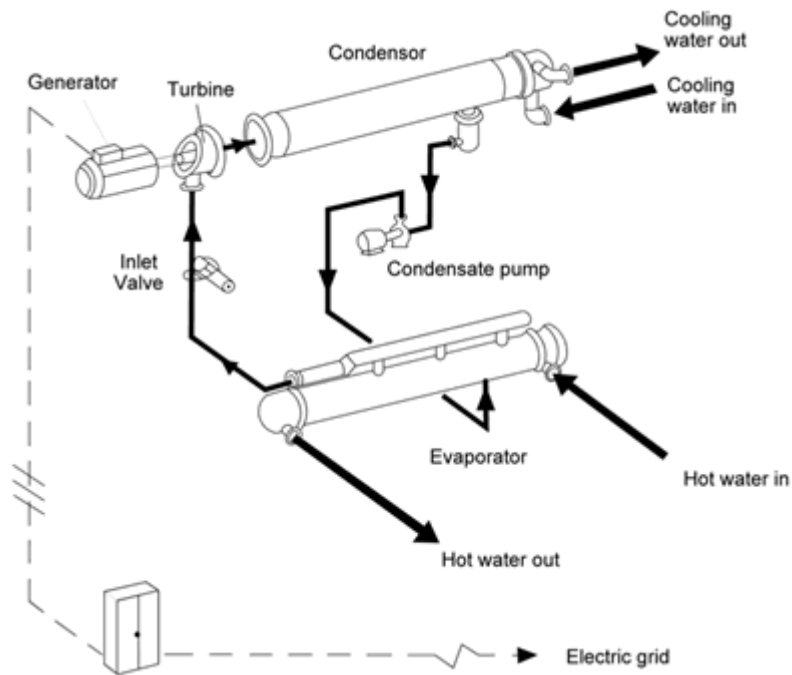
ORC in T-s diagram



- | | |
|--------|----------------------------------|
| 1 -> 2 | Expansie in ORC-turbine |
| 2 -> 3 | Afkoeling gas |
| 3 -> 4 | Condensatie door warmteafgifte |
| 4 -> 5 | Drukverhoging door vloeistofpomp |
| 5 -> 6 | Vloeistofopwarming |
| 6 -> 7 | Verdamping |
| 7 -> 1 | Oververhitting |

Een andere belangrijke toepassing is geothermie. Op verschillende plaatsen in de wereld wekken ORC's groene stroom op met heet water uit de bodem.

De keuze van de organische stof hangt samen met de temperatuur van de restwarmte. Toegepast worden o.a. isopentaan, butaan en ammoniak. Een nieuwe Fins-Nederlandse ontwikkeling is een compacte ORC met een elektrisch vermogen van 150 kW, die toluen gebruikt als werkmiddel. De hermetisch gesloten unit is bedoeld voor hogere temperaturen en kan daardoor een rendement van ongeveer 22% bereiken. Deze ORC kan bijvoorbeeld toegepast worden als "bottoming cycle" op een gasmotor van 800 kW. De hete rookgassen van de gasmotor met een temperatuur in de buurt van 500 °C worden dan gebruikt om het elektrisch rendement van de combinatie gasmotor en ORC te verhogen. Bij koeling van de condensor van de ORC aan de buitenlucht kan dan nog 150 kW extra elektrisch vermogen behaald worden!



Ook hete gassen uit andere bronnen kunnen worden benut. Door deze ORC uit te rusten met een brander kan het apparaat ook dienst doen als een elektriciteit producerende fakkel. Een eerste toepassing is gepland in Groningen, waar stortgas van sterk wisselende kwaliteit met deze technologie nog kan worden benut. De ORC-unit van Tri-O-Gen zal compleet met gasbrander als bedrijfsklare module worden aangeleverd. Daarmee is het een combinatie van fakkel en elektriciteitsgenerator.

Een andere belangrijke recente ontwikkeling is de compacte en bedrijfsklaar geleverde ORC-module, die Ormat ontwikkeld heeft voor het draaien op warm of heet water. Deze ontwikkeling zorgt evenals bij de unit van Tri-O-Gen voor een forse verlaging van aanschaf- en installatiekosten van kleinere ORC-projecten. Daarmee wordt deze techniek veel kosteneffectiever.

Het gebruik van een ORC voor benutting van restwarmte levert schone elektriciteit op, omdat er geen extra fossiele brandstoffen worden verstoekt om deze elektriciteit te produceren. Daarmee levert deze techniek in de toekomst baten op in de vorm van reductie van CO₂ en NO_x.

Als de warmte afkomstig is uit de aarde (geothermie) of uit biomassa, dan produceert de ORC groene stroom, die door de overheid fors wordt gesteund met een bijdrage per kWh in het kader van de MEP-regeling.

Opwerken tot aardgas

Een andere mogelijkheid om het biogas te benutten is het opwerken hiervan tot aardgas. Hierbij dient het biogas ontdaan te worden van koolzuur, water en zwavelwaterstof, zodat het methaan overblijft. Het is echter niet noodzakelijk om alle CO₂ te verwijderen, circa 15 vol.% levert geen problemen op (zie tabel 4, samenstelling aardgas). Vervolgens kan het gezuiverde gas worden geleverd aan het aardgasnet. Om het aardgas te kunnen leveren aan het net dient dit onder hoge druk te gebeuren. Daarnaast moet er ook een geur aan het gas worden toegevoegd om zo een eventueel lek op te kunnen sporen. Deze apparatuur vraagt een erg grote investering. Daarnaast is er in de winter een vele grotere vraag naar aardgas dan in de zomer. Hierdoor heeft het aandeel gas van de vergister een veel te grote invloed op de totale hoeveelheid aardgas in de zomer. Schommelingen in de kwaliteit van het aardgas hebben een te grote invloed op het aardgasnet. Het opgewekte aardgas kan aan het net worden geleverd of het kan (voor een deel) zelf worden benut. Het is zelfs mogelijk om het biogas in een geiser te verbranden om zo bijvoorbeeld te zorgen voor verwarming bij de biggen.

Bestanddelen	Aardgas (vol. %)	Biogas (vol. %)
CH ₄	90	50 – 85
CO ₂	1 – 10	15 – 50
N ₂	<1	0 – 0,2
H ₂ S	<1	0 – 1
H ₂ O	<1	0 – 0,2
Vluchtige organische componenten	-	Nihil
Alkanen	<10	Nihil

Tabel: Samenstelling aardgas t.o.v. biogas



Figuur: biogas opwerking tot aardgas kwaliteit

Brandstofcel

Biogas kan ook omgezet worden in elektriciteit door gebruik te maken van een brandstofcel. In een brandstofcel wordt waterstofgas met lucht door elektrodes geleid. Hierdoor vindt een chemische reactie plaats waarbij water wordt gevormd en elektrische energie vrij komt. Er vindt echter geen explosieve reactie plaats zoals in een verbrandingsmotor.

Het voordeel van gebruik van een brandstofcel is het hoge elektrische rendement: maximaal ca. 55% elektrisch en 35% thermisch. Het thermische rendement is mede afhankelijk van de temperatuur waarop de warmte beschikbaar moet komen. Voor toepassing op het veehouderijbedrijf is een temperatuur van ongeveer 80°C voldoende. Dan kan een warmterendement van 35% gehaald worden. De geproduceerde warmte kan vrijwel volledig op het veehouderijbedrijf benut worden. Wanneer de warmtebehoefte van de vergister in de winter hoger is dan de standaard leverantie van de brandstofcel, kan de cel bijgesteld worden. Het warmterendement kan dan worden opgevoerd ten koste van het elektrische rendement. Zo kan ervoor gezorgd worden dat aan de warmtebehoefte van de biogasinstallatie steeds wordt voldaan. Er zijn diverse typen brandstofcellen. Deze typen onderscheiden zich door de gebruikte materialen van de elektrodes en de werktemperatuur. Voor gebruik met biogas zou een gesmolten carbonaat brandstofcel (molten carbonate fuel cell, MCFC) het beste passen. Bij de MCFC die nu door het ECN te Petten ontwikkeld wordt, hoeft het waterstof niet buiten de brandstofcel afgescheiden te worden, maar gebeurt dit in de brandstofcel zelf. In dit type MCFC is ook CO₂ nodig als katalysator. Biogas bestaat juist uit deze twee gassen. Wel is de MCFC gevoelig voor verontreinigingen in de gassen. Met name de resten van H₂S in biogas zullen daarom verwijderd moeten worden.

Voordelen van brandstofcellen

Schoon en stil

Brandstofcellen worden wel aangeduid als "nul-emissie-technologie". Dat is één van de redenen waarom brandstofcellen al geruime tijd in de belangstelling staan. Ze kunnen worden aangewend om op vrijwel elke locatie elektriciteit te genereren. Stil en zonder uitstoot van schadelijke stoffen. Dus ook

vlak naast bebouwing, of in kwetsbare natuurgebieden. De toepassing in voertuigen kwam in 1990 voor het eerst serieus in beeld toen de staat Californië maatregelen aankondigde om de luchtverontreiniging door personenauto's tot vrijwel nul te reduceren. Dat kan eigenlijk alleen door gebruik te maken van elektrische aandrijving. Elektrische auto's zijn nul-emissie voertuigen bij uitstek. Echter, met accu's kan niet worden voldaan aan de eisen met betrekking tot actieradius. Daarnaast is de tijd benodigd voor "tanken" onacceptabel, en zijn de kosten hoog. Met brandstofcellen uitgeruste elektrische auto's bieden wel perspectieven, en kennen eveneens geen uitstoot van NO_x, SO₂, CO, koolwaterstoffen en deeltjes. Bij lage snelheden wordt het geluid dat auto's maken voornamelijk bepaald door de motor (bij hogere snelheden overheerst het geluid van de banden). Brandstofcelvoertuigen produceren geen motorgeluid. Dit zal bijdragen aan het stiller maken van woonwijken en stadskernen.

Hoger rendement

Met brandstofcellen kan elektriciteit efficiënt worden opgewekt. Doordat ze nabij bebouwing kunnen worden toegepast, kan de restwarmte efficiënt worden ingezet, waardoor het totaalrendement toeneemt. Vergelijken met conventionele technieken zoals zuigermotoren en gasturbines is een hoger rendement vooral mogelijk bij betrekkelijk gering vermogen (lager dan enkele MW) en/of bij sterk wisselende belasting. Gasturbines en zuigermotoren hebben geen goed deellastrendement. Brandstofcellen wel. Zo kunnen met name auto's zuiniger worden aangezien automotoren vrijwel altijd in deellast werken. Afhankelijk van de toepassing (stedelijk vervoer of snelweg) en te gebruiken brandstof (waterstof of eventueel benzine maar dan in combinatie met een reformer) kan het brandstofverbruik met 50% afnemen. Een belangrijk voordeel in het licht van de CO₂-problematiek en energiebesparing.

Brandstofdiversificatie

Omdat brandstofcelvoertuigen niet zijn aangewezen op aardolieproducten, neemt de voorzieningszekerheid toe. Waterstof zal in de toekomst worden geproduceerd door elektrolyse van water. De hiervoor benodigde elektriciteit wordt opgewekt met windenergie, zonne-energie of waterkracht. Ook kunnen bio-brandstoffen worden ingezet. Vóór dat op deze wijze op grote schaal waterstof beschikbaar komt, kan in combinatie met een reformer ook gebruik gemaakt worden van bijvoorbeeld aardgas. Zelfs productie uit benzine, aan boord van een auto, behoort tot de mogelijkheden.

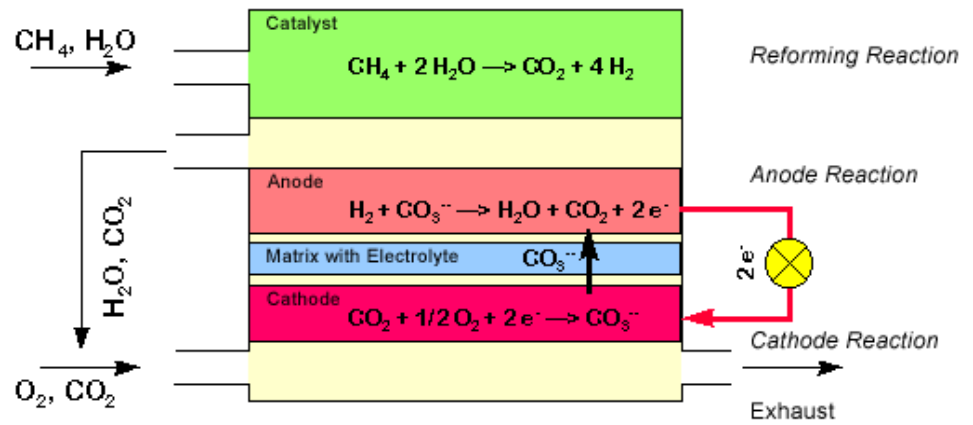
Transitietechnologie

De energievoorziening van de toekomst zal in steeds grotere mate afhankelijk zijn van hernieuwbare energiebronnen zoals wind, zon, waterkracht en biomassa. Vervoer en opslag van op deze wijze opgewekte energie zullen voornamelijk plaatsvinden in de vorm van H₂. De brandstofcel is dé technologie bij uitstek voor verder gebruik van deze H₂. Met de invoering van brandstofcel wordt derhalve de transitie ingezet van onze huidige, op fossiele brandstoffen gebaseerde maatschappij, naar de maatschappij van de toekomst, gebaseerd op hernieuwbare energiebronnen.

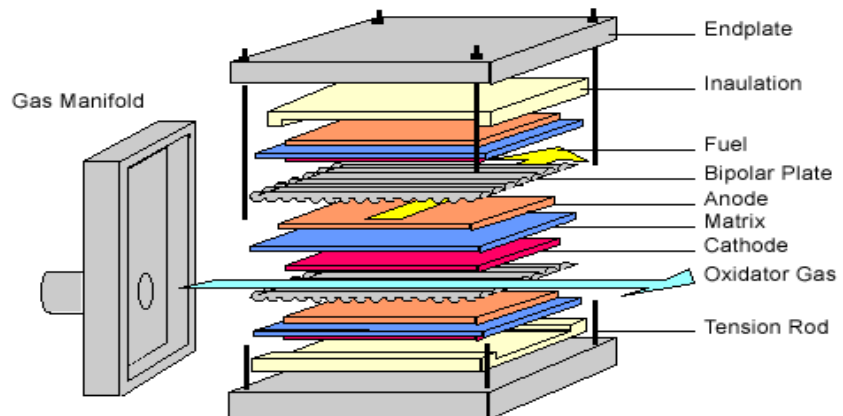
"Enabling Technology"

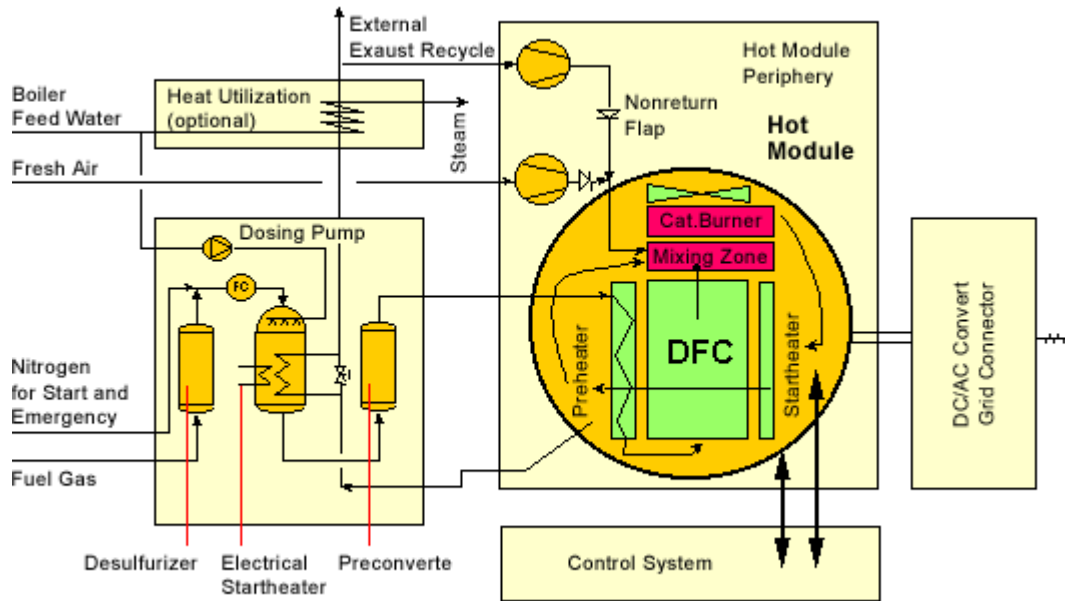
Zonder brandstofcellen was de reis van de Apollo naar de maan niet mogelijk geweest. Geen andere techniek was in staat om de voor deze reis nodige elektrische energie zó efficiënt op te wekken. Ook nu nog bieden brandstofcellen unieke toepassingsmogelijkheden. Een voorbeeld is de toepassing in auto's. Daar bieden ze dé mogelijkheid bij uitstek voor een geheel nieuw ontwerp. Automobiellbouwers als General Motors voorzien een toekomst waarin elektrische en hydraulische functies als sturen en remmen door servomotoren zijn overgenomen. In zo'n ontwikkeling past een technologie die direct, zonder dynamo, elektrische energie in grote hoeveelheden beschikbaar maakt. Daarnaast is de vormgeving van de brandstofcel niet opgelegd door de aanwezigheid van een krukas, drijfstangen en cilinders met zuigers. De brandstofcel is modulair en kan vrijwel elke vorm aannemen. In combinatie met servobesturing ontstaat een ontwerpvrijheid die veel groter is dan die welke de ontwerpers vandaag de dag wordt gegund. Ook elders kunnen brandstofcellen een doorbraak betekenen.

Figuur: functioneren brandstofcel



Figuur: opbouw brandstofcel





Figuur: Gesimplificeerde Process Flow Diagram

Affakkelen

Indien het biogas door omstandigheden niet kan worden omgezet in warmte en elektriciteit dan dient het biogas verbrand te worden in een fakkelininstallatie. Echter is het ook mogelijk om C.V. ketels te plaatsen die de dag capaciteit aankan, op deze manier heeft men nog een warmte benuttingmogelijkheid.

Een tweede verbrandingsmogelijkheid is noodzakelijk omdat het methaan uit het biogas een belangrijke bijdrage levert aan het broeikaseffect en dus niet zomaar in de lucht terecht mag komen.



Figuur: gesloten affakel installatie

Digestaat bewerking

De vergiste biomassa, die uit een installatie komt wordt ook wel digestaat genoemd en kunnen meerde bewerkingen ondergaan. Dit doordat het product heel homogeen en dun is. Uitvergiste mest bezinkt zeer snel. Hiermee kunnen de verschillende scheidingstechnieken heel goed uit de voeten.



Figuur: Decanter

Het scheiden van de digestaat in een vloeistof en vaste fractie, kan gebeuren door:

- Schroefpers
- Centrifuge(decanter)
- Zeefbocht



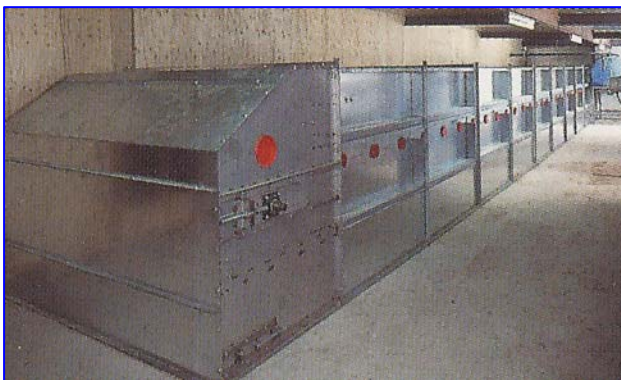
Figuur: Schroefpers



Figuur: Zeefbocht

Indien men de digestaat op een hoger niveau wil reduceren, kan men gebruik maken van indrogings-indampingstechnieken.

Indroging kan plaatsvinden door middel van een trommeldroger of torenkolom waarbij door middel van warme lucht vocht wordt opgenomen in de relatieve luchtvochtigheid.



Figuur: Biomassa droogtafel

Daarnaast kan men gebruik maken van een indampingstechniek. Hierbij wordt de biomassa op kookpunt gebracht waardoor het water verdampt, en vervolgens condenseert. Dit systeem is relatief duur systeem.



Figuur: Omgekeerde osmose



Figuur: Vloeistof indamper

Naast de twee bovenstaande technieken is het mogelijk door middel van ultrafiltratie te gaan scheiden waarbij het mogelijk is om verschillende vloeistofstromen te gaan realiseren. Waarbij tevens omgekeerde osmose wordt toegepast.

Echter zijn er ook enkele gecombineerde systemen mogelijk.

Digestaat opslag

Biomassa zal na de vergisting en evt. bewerking voordat het toegediend wordt op de landbouwpercelen of worden verkocht aan afnemers dienen te worden opgeslagen. De manier van eindopslag is afhankelijk van diverse factoren deze zijn:

- Product, vloeistof of/en vast
- Volume;
- Frequentie.

Bij de factor frequentie is men vaak afhankelijk van diverse mestwetbepalingen, beperkingen van transportbewegingen, en opnamecapaciteit afnemers.



Figuur: droge digestaat



Figuur: vloeistof fractie



Figuur: Perceel opslag

Afzet

Kwaliteit en beschikbaarheid

De afzet van de afgewerkte biomassaströmen (digestaat) is sterk afhankelijk van de kwaliteit van het eindproduct. In deze studie wordt voor het grootste deel uitgegaan van dierlijke mest als input en dus van de output. Dierlijke mest kan op diverse wijzen verwerkt worden tot een afzetbaar product. De afzetvormen kunnen onder andere zijn: stapelbare mest (dikke fractie, hoog percentage drogestof en fosfaat), gehygiëniseerde mest (al dan niet gemengd tot compost), gecomposteerde mest (gecontroleerd), mestkorrels (of na directe droging of na compostering) of als organische meststof op maat.

Dunne fractie met een verhoogd stikstof aandeel.

De beschikbaarheid van het af te zetten eindproduct is belangrijk. Afzet is slechts mogelijk indien een continue stroom beschikbaar is.



Figuur: Scheidingsfractie gereed voor afvoer



Figuur: Afvoer digestaat