



Stoomopwekking 2.0

Promotieboekje

Jan Koopmans

Omslag: De Uitbarsting Van De Berg St. Helens
Bron: nl.ripleybelieves.com

Colofon

Copyright © 2021: www.steamsave.nl
Vormgeving: Jan Koopmans
Illustraties: www.steamsave.nl
Druk en bindwerk: www.arsprintmedia.nl
ISBN: 978-90-830138-8-6
Derde druk: september 2024

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Redactie en uitgever zijn zich volledig bewust van hun taak om zo volledig en betrouwbaar als mogelijk is om de uitgave in dit boek juist weer te geven. Niettemin kan er geen aansprakelijkheid aanvaard worden voor eventuele in deze uitgave voorkomende onjuistheden. Het wordt op prijs gesteld om aanvullingen, onjuistheden en verbeteringen aan ons te melden.

Voorwoord

Als ik voor de eerste maal in gesprek raak met mensen en vertel dat ik affiniteit met stoom heb kijken ze me vreemd aan om vervolgens te concluderen dat de laatste stoomlocomotief toch allang verdwenen is?

Als ik hun vervolgens meedeel dat stoom heden ten dage nog volop wordt toegepast verandert hun blik in ongeloof. Bij nadere uitleg dat stoom er onder andere voor zorgt dat we verlichting in huis hebben ontstaat een totaal onbegrip.

U als lezer van dit boek weet wel beter.

Toegegeven, stoom wordt niet meer op zo een grote schaal toegepast als vroeger, echter is niet weg te denken uit de hedendaagse samenleving. Zo wordt stoom inderdaad toegepast om het op stoomturbines te laten expanderen om hiermee een generator aan te drijven voor de opwekking van elektriciteit. Echter daarnaast wenden bijvoorbeeld voedingsmiddelenbedrijven stoom aan voor hun kook-, indamp- en bakprocessen, papierfabrieken om het proceswater te verdampen door middel van met stoom gevoede walsen van de papiermachine, ziekenhuizen en farmaceutische bedrijven voor sterilisatie doeleinden, de procesindustrie om diverse processen te transformeren zoals destilleren en fractioneren, wasserijen voor het wassen, reinigen en drogen met stoom, enzovoort.

Waarom wordt hiervoor stoom aangewend? Omdat stoom een aantal unieke eigenschappen bezit. Van belang zijn hierbij te noemen:

- De beschikbaarheid aan water (voor de opwekking van stoom);
- Het zeer snelle transport (25-40 m/sec.) via leidingen naar de eindverbruikers. Vanwege de druk van de opgewekte stoom komt hier geen pomp aan te pas. Tevens zijn de energieverliezen die hierbij optreden bij correct uitgevoerde aanleg van de installatie minimaal;
- De grote en snelle overdracht van warmte die verkregen wordt tijdens temperatuurverhoging van processen (korte doorlooptijd batchprocessen);
- Het steriele karakter van stoom (toepassing in ziekenhuizen, laboratoria, clean rooms, et cetera.);
- Betrouwbare uitkomsten van energieberekeningen (oververhitte stoom gedraagt zich nagenoeg als een ideaal gas);
- Het door middel van afkoeling van stoom in een afgesloten ruimte realiseren van een vacuüm (toepassing bij o. a. reiniging van verontreinigde vloeistoffen);
- Efficiënte omzetting van thermische energie in mechanische arbeid (stoomturbine bedrijf).

Naast voordelen bezit stoom ook een aantal nadelen. Waarbij met name het hete water onder druk waar stoom van gevormd wordt een groot gevaar kan opleveren. Zoals:

- Een plotselinge fase verandering van heet water onder druk in atmosferische stoom en visa versa geeft afhankelijk van de druk een volume vermeerdering van circa 1400 tot 1600 maal. De snelheid waarmee dit gebeurt kan hevige im- en explosies veroorzaken (letselschades, schade aan apparatuur, ketelhuizen, waterslag in leidingen, etc.);
- Indien stoom en dan met name heet water in contact komt met het menselijk lichaam kan dit tot ernstige brandwonden leiden;
- Stoom bezit een abrasief karakter. Men noemt dit ook wel het snijden van stoom dat kan optreden indien bijvoorbeeld een lekkage bij een pakking niet tijdig wordt onderkent (schade aan appendages en flenzen);

- Opwekking en toepassing van stoom eisen een hoog veiligheidsniveau (opleidingseisen personeel en keuringsregime door onafhankelijke instanties);
- Vanwege het energetisch karakter van stoom vergt een effectieve opwekking en toepassing bijzondere kennis en aandacht.

Na 45 jaar ervaring en werkzaam te zijn geweest bij een drietal stoomketelleveranciers en een drietal kennisinstituten op stoomgebied en het feit dat ik reeds meer dan 15 jaar trainingen verzorg omtrent dit vakgebied, is er bij mij een behoefte aan overdracht van kennis en meer diepgang over stoomopwekking.

Ook de veranderingen in wet- en regelgeving zijn hier debet aan. De Stoomwezen ambtenaar van weleer bestaat al lang niet meer terwijl de machinist met zijn stoom toepassing vanuit de zeevaart als laatste der Mohikanen nog sporadisch in het ketelhuis rondwaart.

Tegenwoordig zijn de meeste ketelhuisen onbemand is kennis van stoom-, condensaat- en waterbehandelingssystemen tanende en wordt er dikwijls onvoldoende aandacht besteed aan het efficiënt opwekken en toepassen van stoom.

In dit boek tracht ik als auteur een helder en duidelijk inzicht te geven omtrent opwekking van stoom in de meest brede zin. Waarbij de opwekking niet alleen ketels en warmteterugwinning betreffen echter ook stooktechniek en waterbehandeling zodat het complete ketelhuis in al zijn facetten aan bod komt.

Ook wordt er aandacht besteed waarop gelet moet worden bij de aanschaf van nieuwe apparatuur, zoals bijvoorbeeld een ketel of stookinstallatie. Dit is meestal een ijkmoment om de meest optimale installatie te kiezen. Actuele gegevens van stoomverbruik, ketelhuis rendement, prijs per ton stoom en emissies zijn essentieel om te kunnen anticiperen op nieuwe duurzame energieuze toepassingen.

Ook aan het veilig gebruik van stoom wordt veel aandacht besteed evenals het adequaat oplossen van storingen, onderhoud en verhelpen van optredende schades van installatiedelen.

Tot slot wordt het duurzaam en efficiënt opwekken en toepassen van stoom nu en in de toekomst uitvoerig behandeld. Gaan we in de nabije toekomst uitbreiding krijgen van elektrisch gestookte stoomvormers, of waterstof als brandstof toepassen of door middel van geothermie stoom maken? Een aspect wordt steeds duidelijker het (Groningse)aardgas tijdperk is binnen afzienbare tijd eindig.

Dit boek is al met al een 'must have' persoonlijk handboek voor diegene die interesse heeft voor stoom. Voor zowel de startende operator, de ervaren specialist als de engineer/facility manager is er voldoende diepgang te vinden in dit boek. Ook voor opleidingsinstituten kan dit boek een welkome aanvulling zijn.

Ik wens u veel uitbreiding van kennis op het brede terrein van stoomopwekking.

Maasbracht, maart 2022

Jan Koopmans

Leeswijzer

Afbeelding/Tabel 2-8 – wil zeggen: Afbeelding/Tabel in Hoofdstuk 2 met volgnummer 8

Idem voor (6.2) - Formule in Hoofdstuk 6 met volgnummer 2

[B] - Norm en voorschrift zie bijlage D

[2] - Geraadpleegde literatuur zie bijlage D

Overzicht betekenis van enkele benamingen in NL en B (Vlaams)

NL	B (Vlaams)
Monster	Staal
Generator	Spiralen ketel
Ketel	Generator
Waterontharder	Verzachter
Terugwinning	Recuperatie
Wethouders	Schepenen
Concessiedruk	Zegeldruk
Steekflenzen	Pannen
Certificaat	Attest
Huisbrandolie	Mazout
Fabrikant/vervaardiger	Constructeur
Organisatie	Organisme
Vergunningverlener	Bestendige deputatie
Wet	Decreet/ Ordonnantie
Onderdelen	Wisselstukken
Reparaties	Herstellingen

Inhoudsopgave

1.0	Stoom en zijn hoedanigheden	1
1.1	Het stoom/water kringloopproces.....	1
1.2	Stoomvorming.....	3
1.3	Stoom-watertabellen	5
1.4	h-p-t diagram	8
1.5	Reduceren	13
1.6	Oververhitte stoom.....	14
1.7	'Natte' stoom	14
1.8	Onderkoelde stoom	17
1.9	<i>Het begrip energie</i>	18
1.10	<i>Verdampingswarmte</i>	20
1.11	<i>Expansiestoom</i>	21
1.12	<i>h-s diagram</i>	23
1.13	<i>Superkritische stoom</i>	27
2.0	Energiebronnen	29
2.1	Energiebronnen en -dragers	29
2.2	Emissies.....	30
2.2.1	Broeikasgassen.....	30
2.2.2	Verzuring.....	31
2.2.3	Ozonlaag aantasting.....	31
2.2.4	Geluidemissie	31
2.3	Energiebronnen.....	32
2.3.1	Aardgas	32
2.3.2	Biogas	36
2.3.3	Procesgas	36
2.3.4	Kolen	36
2.3.5	Biomassa	37
2.3.6	Kernenergie.....	37

2.3.7	Olie	39
2.3.8	Bio-olie	40
2.3.9	Geothermie	40
2.3.10	Windenergie	42
2.3.11	Zonne-energie	43
2.3.12	Waterkracht	44
2.3.13	Kernfusie	45
2.4	Energiedragers	47
2.4.1	Waterstofgas	48
2.4.2	Elektriciteit	49
2.4.3	Restwarmte	50
2.5	Emissies verminderen	51
2.5.1	Waterdamp	51
2.5.2	Koolstofdioxide	51
2.5.3	PAKS	53
2.5.4	Stikstofoxide	53
2.5.5	Zwaveldioxide	54
2.5.6	Koolmonoxide	54
2.5.7	Geluidemissies	54
2.5.8	Lozingen op riolering of oppervlaktewater	55
2.6	Toekomstige energievoorziening	55
2.7	Toekomstige stoomopwekking	60
3.0	Stoomopwekkers en warmteoverdracht	63
3.1	Brandstof gestookte stoomketels	63
3.1.1	Cilindrische ketels	64
3.1.2	Stoomgeneratoren	70
3.1.3	Waterpijp ketels	72
3.2	Afgassen ketels	76
3.3	Stoomvormers	79
3.3.1	Elektrisch stoomvormers	79

3.3.2	Medium gevoede stoomvormers.....	80
3.4	Constructiedetails en toebehoren	81
3.4.1	Constructiedetails cilindrische ketel	81
3.4.2	Ketel toebehoren cilindrische ketels.....	89
3.4.3	Constructiedetails stoomgenerator (spiraal ketel)	92
3.4.4	Ketel toebehoren stoomgenerator	93
3.4.5	Constructiedetails waterpijp ketel	93
3.4.6	Keteltoebehoren waterpijp ketel	97
3.4.7	Ketel drukdeel	97
3.5	<i>Warmteoverdracht</i>	101
3.5.1	<i>Geleiding</i>	102
3.5.2	<i>Straling</i>	103
3.5.3	<i>Convectie</i>	104
3.5.4	<i>Warmtestromen</i>	106
3.5.5	<i>Berekeningsvoorbeeld A</i>	109
3.5.6	<i>Temperatuurverloop stoomopwekking</i>	116
4.0	Energietoevoer voor stoomopwekkers.....	119
4.1	Brandstof gestookte energie toevoer	119
4.1.1	Verbrandingsproces	119
4.1.2	Verbrandingstechnieken	128
4.2	Overige energie toevoeren	141
4.2.1	Kernenergie	141
5.0	Energiebesparing en toebehoren.....	145
5.1	Energiebesparing	145
5.1.1	Warmteterugwinning uit de rookgassen	146
5.1.2	Energiebesparing uit condensaat koeling	162
5.1.3	Spuiwarmteterugwinning.....	164
5.1.4	Isolatieverlies verminderen.....	167
5.1.5	Overige energiebesparings maatregelen	169

5.2	Toebehoren.....	169
5.2.1	Condensaattank	170
5.2.2	Ontgasser	171
5.2.3	Spuitank	177
5.2.4	Stoomverdeler	178
5.2.5	Condensor	179
5.2.6	Schoorsteen	181
6.0	WKK en 'rotating equipment'	183
6.1	WKK toepassingen	183
6.1.1	Energievoordeel WKK-toepassing.....	185
6.1.2	WKK-applicaties	191
6.1.3	STEG installaties	191
6.1.4	WKK met water als brandstof	192
6.1.5	Inzetbaarheid WKK.....	194
6.2	Stoomturbines	195
6.2.1	Stoomturbine uitvoeringen.....	196
6.2.2	<i>Rankine cycle</i>	211
6.2.3	Constructiedetails stoomturbine	214
6.2.4	Regeling en beveiliging stoomturbine.....	217
6.3	Gasturbines.....	219
6.3.1	Gasturbine uitvoeringen.	219
6.3.2	Werking gasturbine	220
6.3.3	<i>Brayton/Joule cycle</i>	224
6.3.4	Constructiedetails gasturbine	229
6.3.5	Regeling en beveiliging van de gasturbine	229
6.4	Ventilatoren	234
6.4.1	Ventilator uitvoeringen	234
6.4.2	<i>Ventilator theorie</i>	236
6.4.3	Ventilator regelingen	239
6.4.4	Constructiedetails ventilatoren.....	243

6.5	Pompen	244
6.5.1	Pomp uitvoeringen.....	245
6.5.2	<i>Pomp theorie</i>	246
6.5.3	Pomp regeling	247
6.5.4	Constructiedetails pompen	248
6.6	Overige werktuigen voor stoomopwekking.....	248
6.6.1	Zuigermachines voor WKK- toepassing.....	248
6.6.2	Warmtepompen.....	249
6.6.3	Thermocompressor	252
6.6.4	<i>Energieomzetting</i>	252
7.0	Regelingen en metingen bij stoomopwekking.....	255
7.1	Regelkring	255
7.2	Regelfuncties.....	257
7.3	Communicatie regelfuncties	259
7.4	Regelingen.....	259
7.4.1	Drukregelingen.....	260
7.4.2	Niveau regelingen	263
7.4.3	Ketelwater kwaliteit regeling	269
7.4.4	Temperatuur regelingen	273
7.4.5	Brandstof/lucht verhoudingsregelingen	275
7.4.6	Ketelvolgorde en 'stand-by' regelingen	282
7.5	Meetapparatuur.....	286
7.5.1	Drukmeters	287
7.5.2	Peiltoestellen	289
7.5.3	Temperatuurmetingen.....	292
7.5.4	Debietmeters	295
7.6	Appendages	302
7.6.1	Afsluiters	305
7.6.2	Terugslagkleppen	312
7.6.3	Filters.....	314

7.6.4	Condenspotten.....	315
7.6.5	Vlaminspectie kijkglas	316
8.0	Beveiliging van de stoomopwekking.....	317
8.1	Risico's bij stoomopwekking	317
8.2	Beveiligingen	318
8.2.1	Regelgeving beveiligingen stoominstallatie	319
8.2.2	Beveiligingen stoomtoestellen	322
8.2.3	Beveiligingen stookinstallaties	335
9.0	Waterbehandeling	357
9.1	Watersamenstelling	357
9.2	Suppletiewater	359
9.2.1	Ontharding	360
9.2.2	Ontzouting	365
9.2.3	IJzer en mangaan verwijdering.....	370
9.3	Ketelvoedingwater	371
9.3.1	Chemicaliën dosering.....	373
9.3.2	Condensaat behandeling.....	375
9.4	Ketelwater.....	376
9.5	Richtlijnen water en stoom.....	377
9.6	Monsternamen en analyse.....	387
9.6.1	Monsterkoeler.....	387
9.6.2	Monsternamen.....	388
10.0	Exploitatie van de stoomopwekking	392
10.1	Eerstmalige in bedrijfname	392
10.1.1	Bestaande ketels van voor de PED (prePED).....	393
10.1.2	Ketels die vallen onder de PED.....	394
10.1.3	Inspectie stookinrichting.....	400
10.1.4	Toegestane emissies	403
10.2	Eerstmalige stoomleverantie	406

10.2.1	Ketelreiniging en opstart procedure koude ketel	406
10.2.2	In bedrijf name stoomopwekker	408
10.2.3	Uit bedrijf name stoomopwekker	409
10.3	Periodieke keuring en inspectie	410
10.3.1	Periodieke keuring druklichaam opgesteld in NL	411
10.3.2	Periodieke controle druklichaam opgesteld in B (Vlaanderen).....	413
10.3.3	Functie en controle test	415
10.3.4	Periodieke inspectie stookinstallatie	416
10.4	Toezicht	417
10.4.1	Dagelijks toezicht	417
10.4.2	Wekelijks toezicht	419
10.5	Rendement van de stoominstallatie	424
10.5.1	Isolatieverlies	424
10.5.2	Spuiverlies	426
10.5.3	Schoorsteenverlies	428
10.6	Exploitatie stoomopwekking	447
10.6.1	Uitbesteden of zelf doen	448
10.6.2	Exploitatieoverzicht	448
10.7	Storingen oplossen	452
10.7.1	Storingsanalyse	452
10.7.2	Optredende storingen	454

Bijlage A Stoom- en watertabellen

Bijlage B Mollierdiagram

Bijlage C Symbolenlijst (alfabetisch)

Bijlage D Literatuurlijst

Register (alfabetisch gerangschikt)

SAMPLE

1.0 Stoom en zijn hoedanigheden

In dit hoofdstuk worden de kenmerkende eigenschappen van stoom toegelicht. Hierin wordt het stoomproces omschreven dat uit een kringloop bestaat waarbij water wordt omgezet in stoom en vervolgens in condensaat. Door zijn eigen druk wordt stoom gedistribueerd naar de verbruikers en condensaat geretourneerd naar de condensaat-tank of ontgasser zonder dat er een pomp aan te pas komt. Druk en temperatuur van stoom zijn aan elkaar gekoppeld en zijn naast energiegegevens en specifieke eigenschappen van stoom, terug te vinden in de stoomtabellen. Het h-p-t diagram wordt uitvoerig behandeld waarin onder invloed van druk, temperatuur en warmte-inhoud de eigenschappen van stoom nader worden toegelicht. Ook de diverse hoedanigheden waarin stoom kan voorkomen worden behandeld.

Voor meer diepgang wordt er in cursieve tekst in vervolghoofdstukken het begrip energie behandeld en de natuurkundige wetten die hieraan ten grondslag liggen. Daarbij worden de begrippen die in de voorgaande hoofdstukken zijn toegelicht onderbouwd met berekeningen. Tevens wordt het begrip entropie geïntroduceerd en het thermodynamisch proces aan de hand van het Mollier diagram besproken. Tot slot wordt het fenomeen superkritische stoom behandeld.

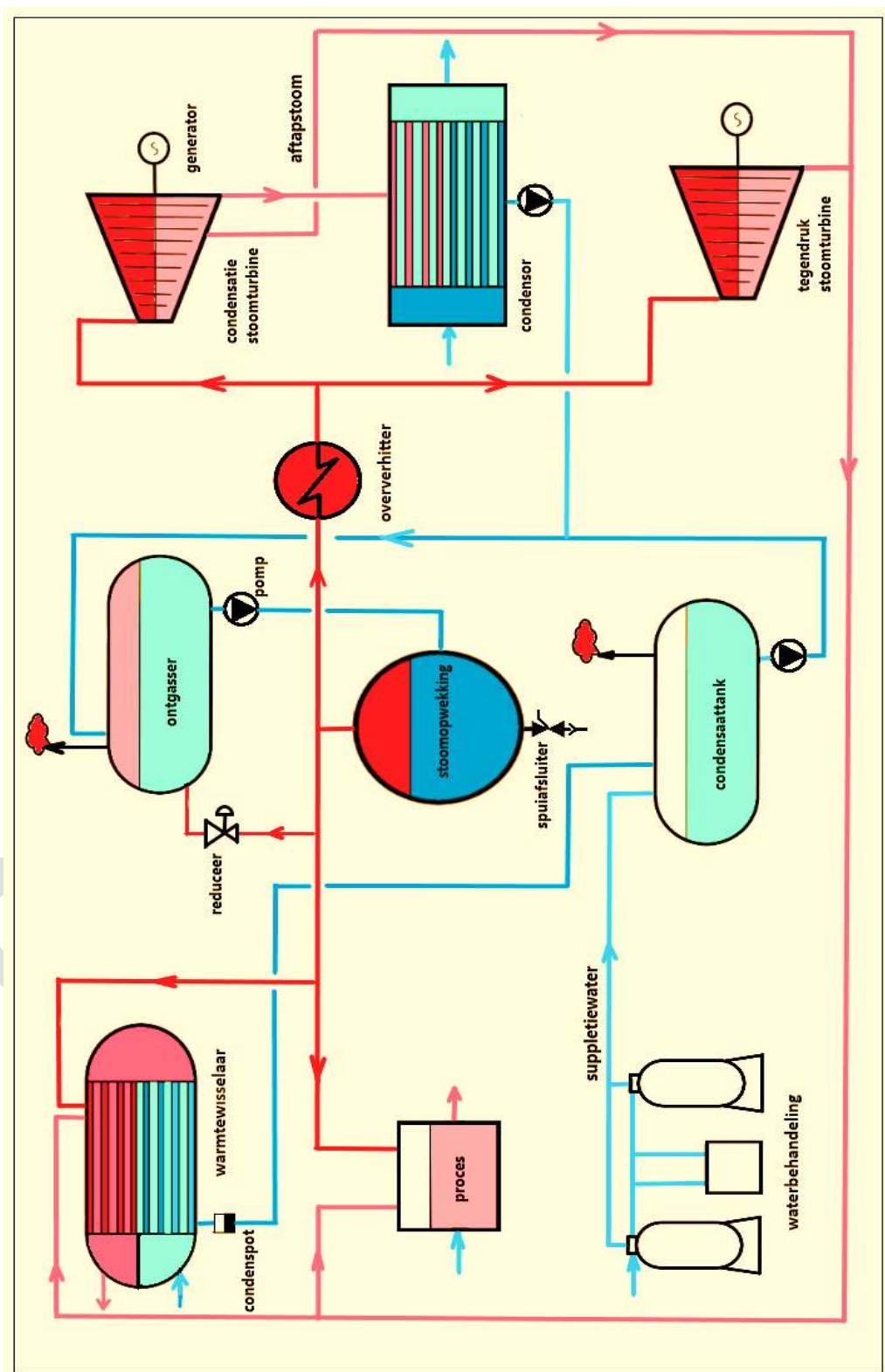
1.1 Het stoom/water kringloopproces

Water kent onder atmosferische condities (1013,25 mbar) drie aggregatietoestanden namelijk de:

- Vaste vorm als ijs bij een temperatuur van minder dan 0,01°C;
- Vloeibare vorm als water bij een temperatuur van 0,01°C tot aan 100°C;
- Gas vorm als waterdamp oftewel stoom bij een temperatuur vanaf 100°C.

Stoomopwekking en –toepassing verloopt via een kringloopproces, zie **Afbeelding 1.2**.

Opwekking vindt plaats in een stoomopwekker waarbij de stoom grofweg voor twee doeleinden gebruikt kan worden. Namelijk voor het verwarmen van processtromen of het door middel van stoom opwekken van mechanische energie in stoomturbines. Dit laatste noemen we ook wel een thermodynamisch proces. Het verwarmen van processen vindt grotendeels plaats in warmtewisselaars. Het gevormde condensaat wordt hierbij zoveel mogelijk geretourneerd naar het ketelhuis. Door verliezen en/of door het feit dat het condensaat niet geschikt is voor hergebruik moet er in alle gevallen suppletiewater worden toegevoegd. Dit is ook het geval wanneer stoom rechtstreeks geïnjecteerd wordt in processtromen.



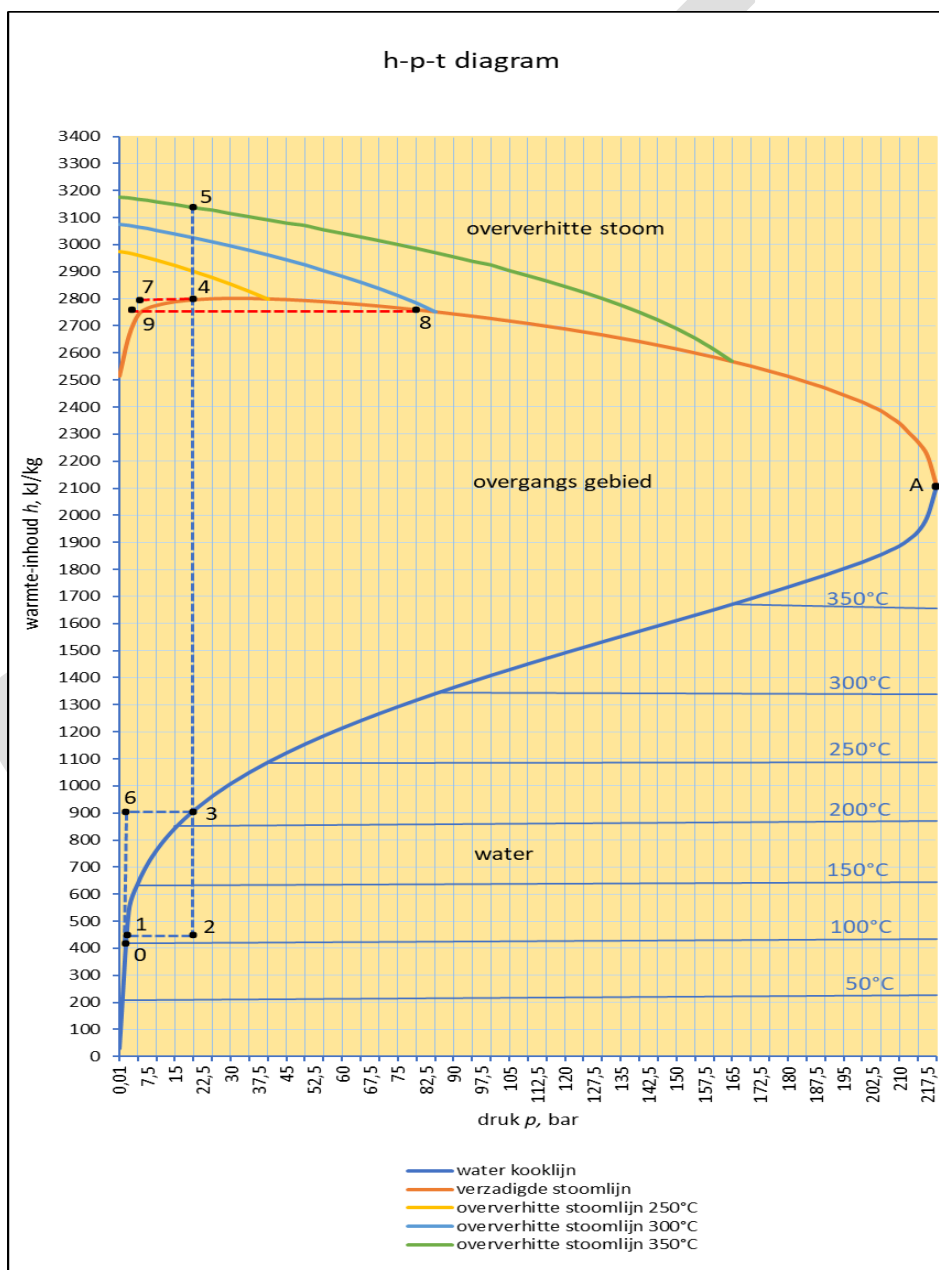
Afbeelding 1.2

stoom/water kringloopp proces

Bron: steamsave

1.4 h-p-t diagram

In dit diagram wordt de warmte inhoud (h) in kJ/kg, de druk (p) in bar en de temperatuur t in °C weergegeven met de toestandsveranderingen van water en stoom, **Afbeelding 1-3**. Laten we als voorbeeld het stoom opwek proces doorlopen dat zich voltrekt in een stoomopwekker.



Afbeelding 1-3

h-p-t diagram

Bron:steamsave

2.0 Energiebronnen

In dit hoofdstuk worden de diverse energiebronnen en energiedragers onder de loep genomen waarmee we stoom kunnen opwekken. Energieopwekking mag zich momenteel verheugen in enorme aandacht. Kranten, tijdschriften en audiovisuele presentaties staan er bol van. De in-steek hierbij is de opwarming van de aarde, schadelijke emissies voor de leefomgeving en het opraken van fossiele brandstoffen. Zowel de huidige toegepaste energiebronnen als ook de duurzame en toekomstige technieken komen in dit hoofdstuk aan bod. Emissies die optreden bij het verstoken van fossiele brandstoffen worden behandeld.

Naast fossiele brandstoffen zoals gas, olie en kolen zullen ook duurzame energiedragers zoals waterstofgas en elektriciteit opgewekt door zonnewarmte, windenergie en waterkracht aandacht krijgen.

Echter ook geothermie, brandstofcellen en kernenergie en -fusie zullen de revue passeren. Tevens worden diverse vormen van biobrandstoffen besproken. Tot slot een blik gericht naar de toekomstige energiebronnen en -dragers die kansrijk zijn voor stoomopwekking.

2.1 Energiebronnen en -dragers

De primaire energiebronnen kunnen we onderscheiden in drie groepen.

De eerste groep zijn energiebronnen opgeslagen in de aardbodem. Hiertoe kunnen we de fossiele brandstoffen rekenen zoals olie, gas en kolen die bij verbranding warmte leveren. Echter ook aardwarmte waarbij met behulp van geothermie uit warmtereservoirs energie kan worden onttrokken. Ook uranium en thorium worden gedolven om er middels een proces van kernsplit-sing energie mee te produceren.

De tweede groep zijn de potentiële energiebronnen die op het aardoppervlak voorkomen zoals biomassa in de vorm van hout en andere plantaardige producten. Ook bruinkool dat in dagbouw wordt gedolven behoort hiertoe.

De derde en laatste groep zijn energiebronnen die in de leefomgeving aanwezig zijn zoals zon-windenergie en waterkracht.

Als secundaire energie kunnen we elektriciteit en waterstof noemen. Echter dit zijn energiedra-gers die door een van de genoemde bronnen opgewekt kunnen worden. Ook restproducten af-komstig van processen zoals biogas van zuiveringsinstallaties, afgassen van chemische- en petro-chemische processen, et cetera zijn afgeleiden van de eerdergenoemde drie groepen.

2.2 Emissies

Onder duurzame energie verstaan we energie die niet opraakt zo lang als de mensheid op aarde leeft. We noemen dit ook wel hernieuwbare energie.

Duurzaamheid wil ook zeggen dat de leefomgeving ook voor toekomstige generaties niet wordt benadeeld door het gebruik van deze energie.

Bij het verbranden van fossiele brandstoffen ontstaan emissies die schadelijk zijn voor de leefomgeving op aarde. Bij de conversie naar stoom worden vaak fossiele brandstoffen toegepast. De hierbij gevormde rookgassen bevatten schadelijke elementen die niet bijdragen aan duurzaamheid wanneer die naar de leefomgeving worden afgevoerd.

Zo kunnen ook bij het opwekken van stoom emissies aan geluid schade toebrengen aan mens en dier en dus niet bijdragen aan duurzaamheid.

2.6 Toekomstige energievoorziening

Welke energiebron(nen) en -dragers gaan we in de toekomst toepassen? Hoe gaat de energietransitie eruitzien? **Tabel 2-3** geeft inzicht in mogelijkheden met daaraan verbonden consequenties. Opm. *Stookwaarde in kg van betrokken brandstof.*

Energiebronnen en -dragers	Stookwaarde	CO ₂ -emissiefactor	CO ₂ -voetafdruk	Voorraad bij huidig gebruik	Dichtheid
Eenheid	MJ/kg	T/MJ	T/MJ	jaren	kg/m ³
Aardgas	38,1	56,6	59,73	50	0,83
Biogas (stortgas)	25	0*	12,93	∞	1,3
Steenkool (stoomkolen)	31,4	98,3	121,5	220	1325
Biomassa (chips)	15,1	0*	n.a.	∞	160
Kernenergie (²³⁵ U)	81 · 10 ⁶	0	34	150	18.950
Olie (hbo)	42,7	74,3	96,7	40	840
Biodiesel (B 100)	37	0*	63,9	∞	900
Geothermie	-	0	0	∞	-
Windenergie	-	0	0	∞	-
Zonne-energie	-	0	0	∞	-
Waterkracht	-	0	0	∞	-
Kernfusie (deuterium-tritium)	59 · 10 ⁷	0	0	∞	0,09
Waterstofgas	120	0*	0*	∞*	0,09
Elektriciteit	-	0*	0*	∞*	-

* mits duurzaam opgewekt

Tabel 2-3

Energiebronnen en -dragers

Bron: steamsave

3.0 Stoomopwekkers en warmteoverdracht

In het voorgaande hoofdstuk 2 hebben we kunnen constateren dat de uitvoering van de stoomopwekker sterk afhankelijk is van de toegepaste energiebron of energiedrager. Het hoeft niet altijd een traditionele ketel te zijn die met brandstof wordt gestookt, het kan immers ook een stoomvormer zijn die elektrisch wordt verwarmd of door middel van aardwarmte al dan niet in combinatie met een warmtepomp. Daarom dat we het over een stoomopwekker hebben in plaats van een stoomketel.

Naast brandstof gestookte ketels, omvormers en warmtepompen zullen we in dit hoofdstuk ook aandacht besteden aan afgassen ketels die vaak in combinatie met stoomopwekking in een WKK (warmte/kracht koppeling) uitvoering opereren. Verder zullen de constructiedetails en materiaaltoepassingen van de stoom opwekkers behandeld worden. Afhankelijk van de toepassing worden de uitvoeringsdetails van zowel de vlampijp, de stoomgenerator als de waterpijp ketel uitvoerig omschreven.

Om de begrippen zoals omschreven in dit hoofdstuk nader onder de loep te nemen is het onderdeel warmteoverdracht in cursief letterstijl, voor de geïnteresseerde lezer, toegevoegd. De warmteoverdracht begrippen zoals geleiding, straling en convectie worden nader toegelicht en aan de hand van voorbeelden met formules berekend.

3.1 Brandstof gestookte stoomketels

Een eerste onderscheid kunnen we maken op basis van de druk en de stoomcapaciteit. Uit het oogpunt van stoomdruk kennen we de volgende onderverdeling:

- Lagedruk stoom tot 0,5 bar(g);
- Middel druk stoom vanaf 0,5 tot 20 bar(g);
- Hogedruk stoom vanaf 20 bar(g).

Als uitvoering kunnen we de stoomketels als volgt onderverdelen:

- Cilindrische ketels;
- Stoomgeneratoren;
- Waterpijpketels.

De ketels zijn allen voorzien van één of meerdere branders of stookinrichtingen voor het verstoken van (aard- of bio) gas, (bio)olie of in de toekomst waterstofgas. Ook zijn er biomassa gestookte ketels.

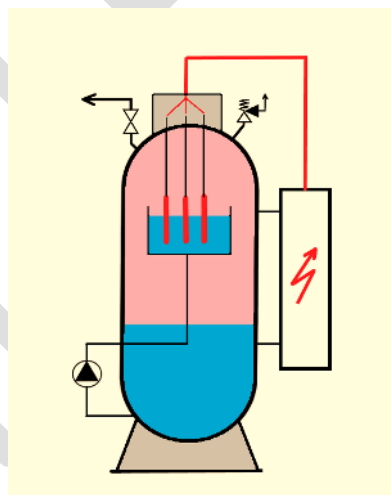
3.3 Stoomvormers

Stoomvormers zijn opwekkers waarin geen warmte wordt ontwikkeld door verbranding van brandstof of toevoer van rookgassen echter energie wordt toegevoerd van andere secundaire warmtebronnen. We onderscheiden hierbij elektrische stoomvormers en stoomvormers die warmte van andere media krijgen toegevoerd. Stoomvormers bestaan uit het algemeen uit een horizontaal of verticaal stalen vat dat aan beide kopkanten is voorzien van omgehaalde bodems uitgevoerd als hoge druk of korfboogbodem. Deze laatstgenoemde is dieper gewelfd en meer voor hogere drukken bestemd.

3.3.1 Elektrische stoomvormers

Dit zijn cilindrische tanks die gedeeltelijk gevuld zijn met ketelwater met een bovenliggend stoomkussen, zowel in horizontale als verticale uitvoering. In het ketelwater zijn afhankelijk van het vermogen elektrische weerstandselementen gemonteerd of hoogspanningselektroden bij de grotere vermogens. Ook kan er energie opgewekt worden door middel van elektrische golven zoals in een magnetron plaats vinden. Als stoomvormers voor de kleinere capaciteiten tot 1

ton stoom per uur worden deze bij laboratoria, ziekenhuizen en 'cleanrooms' reeds meerdere jaren toegepast. Voor industriële toepassingen, zie schematische voorstelling **Afbeelding 3-20** en **3-21** voor een uitvoeringsvorm. Inwendig is deze stoomvormer voorzien van een waterreservoir waarin stoom wordt geproduceerd van water waarin zout is opgelost. Dit waterreservoir wordt op peil gehouden met een circulatiepomp. Deze elektrisch gevoede stoomketels kunnen capaciteiten bereiken van 90 ton stoom per uur. Voordeel van elektrische stoomvormers is dat deze zeer snel operationeel kunnen zijn. In het licht van de energietransitie en om de onbalans in het landelijke elektriciteitsnet tussen vraag en aanbod zullen deze wellicht hun toepassing gaan vinden in de toekomst. Voorwaarde hierbij is wel dat het elektrische transportnet hiervoor geschikt is of voor geschikt wordt gemaakt (zwaardere kabels.)



Afbeelding 3-20 Elektrische stoomvormer
Bron: steamsave



Afbeelding 3-21 Elektrisch stoomvormer
Bron: PARAT Halvorsen AS

4.0 Energietoevoer voor stoomopwekkers

In hoofdstuk 3 hebben we kunnen constateren dat de energietoevoer voor een stoomopwekker niet altijd een stookvoorziening hoeft te zijn. Het kan ook elektriciteit zijn of (rest)gassen van andere processen. De meest toegepaste energietoevoer voor stoomopwekking is nog altijd het verbranden van brandstoffen, waarbij met name aardgas veelvuldig wordt toegepast. De technieken en brander uitvoeringen hierbij worden uitvoerig onder de loep genomen. Naast aardgas en olie voor brander installaties worden in dit hoofdstuk ook waterstofbranders behandeld. Ook het verbranden van biomassa krijgt aandacht waarbij ook wervelbedtechnieken behandeld worden. Tot slot worden medium gevoede stoomvormers en kernsplitsing onder de loep genomen.

4.1 Brandstof gestookte energie toevoeren

Hieronder vallen alle toevoeren van energie die door middel van verbranding van een brandstof warmte overdragen aan het ketelwater om hiermee stoom op te wekken. Als brandstoffen zullen we specifiek behandelen: gas (aardgas en waterstofgas), olie (hbo) en biomassa (hout).

4.1.1 Verbrandingsproces

De volgende onderwerpen zullen besproken worden om een dieper inzicht te krijgen in de correcte werking van een brander installatie:

- Ontstaan en instandhouding van een vlam;
- Vlamgeometrie;
- Rookgassamenstelling;
- NO_x-emissie;
- Wobbe-index

4.1.1.1 Ontstaan en instandhouding van een vlam

Een vlam kan alleen ontstaan indien aan de volgende drie voorwaarden is voldaan. Namelijk de aanwezigheid van:

- Brandbare stof;
- Zuurstof;
- Ontsteking/warmte

Dit noemen we ook wel de branddriehoek. Zo zijn er in het verleden grote branden op olievelden gedoofd door het wegnemen van de zuurstof door het maken van explosies waardoor er een tekort aan zuurstof optrad en het vuur doofde.

In **Tabel 4-1** zijn de verschillende eigenschappen van een aantal brandstoffen vastgelegd.

Specifieke eigenschappen brandstoffen	Aardgas-G-gas (laag calorisch)	Waterstofgas	Olie (hbo)	Biomassa (pellets-A1)
LEL (lower explosive limit), %	5	4	0,6	-
UEL (upper explosive limit), %	16	75	6,5	-
Ontstekingstemperatuur, °C	650	565	210	-
Zelfontbrandingstemperatuur, °C	670	560	256	250-350
Ontstekingsenergie, mJ	0,29	0,02	0,24	
Stookwaarde, MJ/m ³	31,65	10,78	41,9*	15,3**
Calorische bovenwaarde, MJ/m ³	35,17	12,74	44,8*	17,8*
Stoichiometrische lucht-hoeveelheid, m ³ /m ³	8,53	2,2	± 10,2*	3,6 *
Dauwpunt, °C	± 57	± 71	± 47	± 58
CO ₂ maximum, %	11,72	0	15,2	20,7
Verbrandingssnelheid, m/s	0,4	2,8	0,3	-
Wobbe-index, MJ/m ³	43,79	40,67	n.v.t	n.v.t
Dichtheid, kg/m ³	0,83	0,09	840	160

* in kg van de betrokken brandstof

**hout met een watergehalte van circa 15%

Tabel 4-1 Specifieke eigenschappen brandstoffen

Bron: steamsave

5.0 Energiebesparing en toebehoren

Naast opwekkers en energie toevoeren wordt er in het ketelhuis equipment geïnstalleerd om het kringloopproces van stoomopwekking te completeren en warmte te recupereren. Brandstof gestookte ketels zijn allen voorzien van een schoorsteen voor afvoer naar de omgeving van de rookgassen. Om het rendement van de ketels te verhogen kunnen er economisers en/of rookgaskoelers en – en condensors en luvo- installaties of retarders in de rookgassenstroom gemon-teerd worden. Ook recuperatie van de warmte aanwezig in het spuiwater wordt behandeld.

Om het retourcondensaat te accumuleren en het suppletiewater te ontgassen worden er con-densaattanks en ontgassers in het ketelhuis opgesteld. Vaak is de temperatuur van het retour-condensaat te hoog en zijn er mogelijkheden om deze warmte in het stoom opwek proces te stoppen.

Indien meerder opwekkers staan opgesteld wordt de opgewekte stoom door middel van een opgestelde stoomverdeler verder gedistribueerd naar de afnemers. Tot slot wordt functie en uit-voering van de toebehoren zoals condensaat tanks, ontgassers, spuitank en de condensor bij toe-passing van een stoomturbine bedrijf behandeld.

5.1 Energiebesparing

Hierbij moeten we aan toestellen denken die de restwarmte van rookgassen, spuiwater en con-densaat overdragen aan het stoom opwekproces of aan andere bedrijfsprocessen. Ook met het optimaal isoleren van installaties en leidingen en het zorgdragen voor een correcte verbranding kan energie bespaard worden. Energiebesparende maatregelen hebben tot doel om brandstof te besparen en de voor de leefomgeving schadelijke emissies te reduceren. In de Europese Unie moeten bedrijven die:

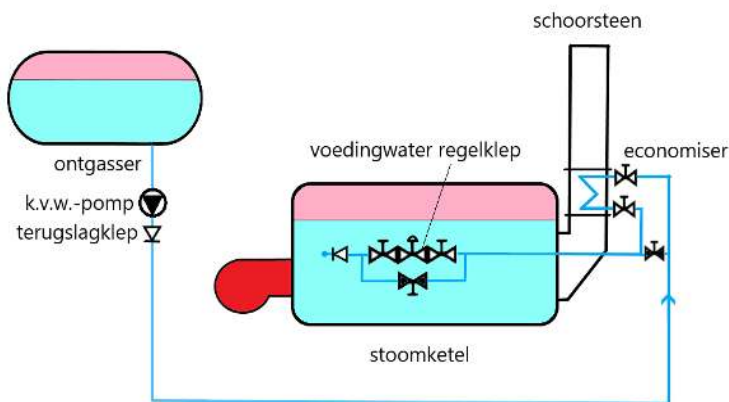
- Meer dan 250 FTE in dienst hebben, of;
- Jaaromzet $\geq$ 50 miljoen, of;
- Jaarlijkse balanstotaal $\geq$ 43 miljoen.

een energieaudit (laten) uitvoeren conform de EED (Energy Efficiency Directive). Hierin is be-paald dat besparingsmaatregelen met een TVT (Terug Verdien Termijn) van < 5 jaren verplicht zijn om uit te voeren. Energiebesparingsmaatregelen, BBT (Best Beschikbare Technieken) en tevens de koppeling aan subsidies zijn vastgelegd voor:

- NL in het Kenniscentrum InfoMil
- B (Vlaams gewest) in de Emis (Energie- en milieu informatiesysteem Vlaams gewest) en de VITO (Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek).

5.1.1 Warmteterugwinning uit de rookgassen

Het grootste verlies bij stoomopwekking is de warmte aanwezig in de rookgassen die via de schoorsteen afgevoerd wordt. Deze verliezen treden op bij brandstof gestookte ketels. Economisers, ook wel eco's genoemd, worden gemonteerd tussen de ketel en de schoorsteen. Zie **Afbeelding 5-1** voor cilindrische stoomopwekkers. Economisers bestaan uit pijpen die met



Afbeelding 5-1

Economiser

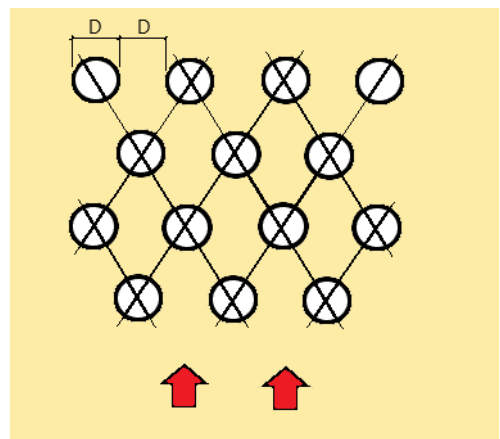
Bron: steamsave

180° bochten met elkaar zijn verbonden. Van deze pijpenrij worden pakketten gemaakt door deze met elkaar te verbinden. De verbindingsbochten bevinden zich buiten het rookgas kanaal-gedeelte. Zie **Afbeelding 5-2**. K.v.w. intrede vindt bovenin plaats zodat de rookgassen in tegen(kruis)stroom optimaal hun warmte kunnen overdragen aan het ketelvoedingwater. De pijpenrijen zijn onderling verspringend uitgevoerd voor een optimale warmteoverdracht. Zie **Afbeelding 5-3**. Op deze wijze wordt bij middeldruk ketels een rendementstoename van gemiddeld 5% bereikt.



Afbeelding 5-2 *Economiserpakket*

Bron: Standard Fasel



Afbeelding 5-3 *Positie pijpen*

Bron: steamsave

6.0 WKK en 'rotating equipment'

Toepassing van WKK (Warmte Kracht Koppeling) in de vorm van gelijk- en tegendruk stoomturbines die gevoed worden met oververhitte hogedruk stoom en die tevens elektriciteit opwekken. Gasturbines en -motoren waarvan de warmte van de rookgassen wordt toegevoerd aan afgassen ketels en waarbij tevens elektriciteit wordt opgewekt passeren de revue. Met name waterstof gestookte gasturbines voor opwekking van stoom die tevens voorzien in eigen elektriciteitsbehoefte kunnen kansrijk gaan worden. Ook in combinatie met stoomopwekking met elektrische gevoede ketels. Ook de combinatie van stoom- en gasturbines (STEG) installaties worden behandeld.

'Rotating equipment' zoals pompen voor het condensaat en ketelvoedingwater te verplaatsen en in druk te verhogen en ventilatoren voor toevoer van de verbrandingslucht worden toegelicht. Tot slot warmtepompen die lagedruk stoom kunnen opwaarderen waarbij ook aandacht voor stoom recompressie en thermo compressoren met voorbeeldberekening.

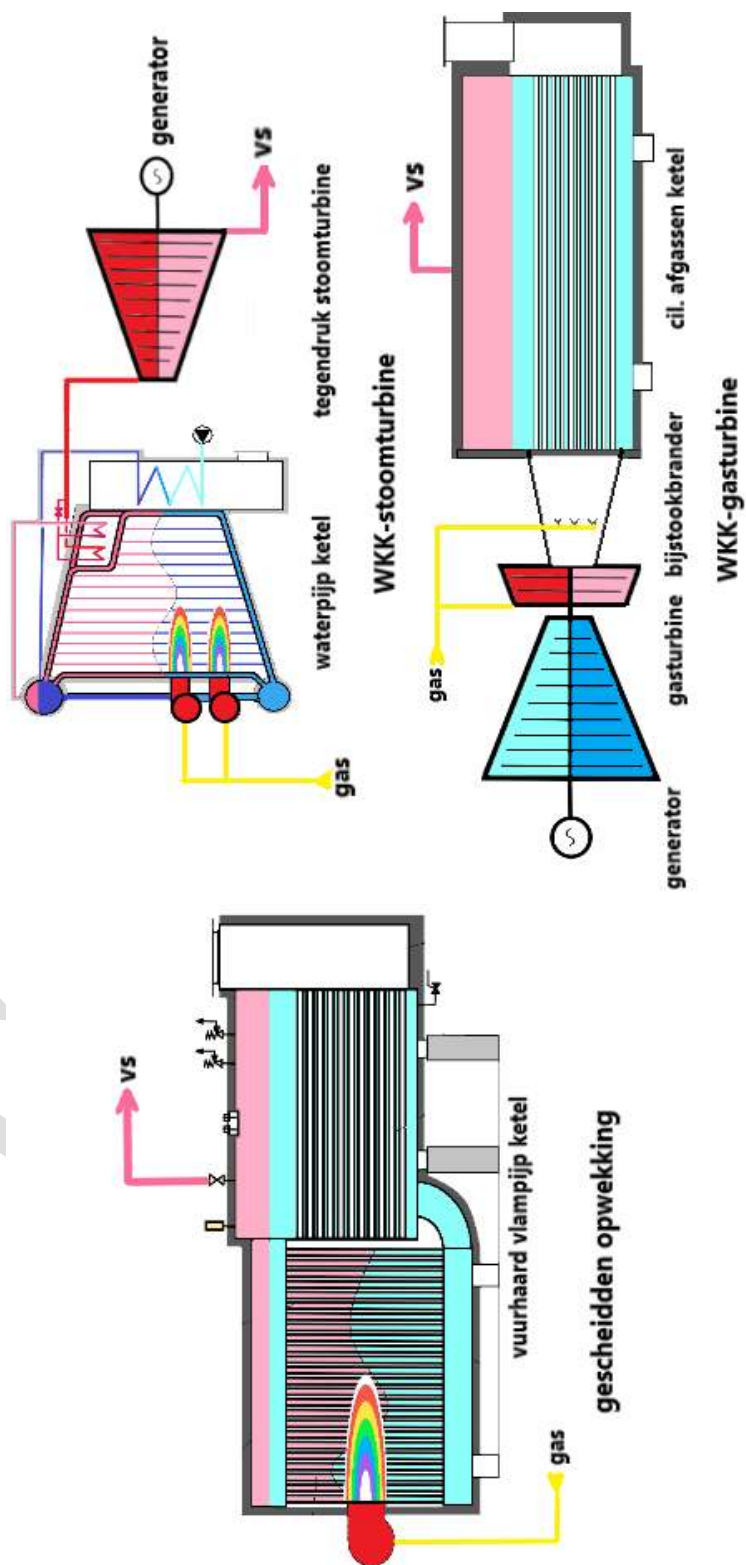
De diverse rendementen en theorieën betreffende 'rotating equipment' worden in cursieve tekst behandeld voor meer diepgang.

6.1 WKK toepassingen

Het gelijktijdig opwekken van stoom en elektriciteit heeft uit energetisch oogpunt een voordeel. Ten opzichte van separate opwekking is een gem. rendementsvoordeel van gemiddeld 5-10% te behalen. In **Afbeelding 6-1** zijn de configuraties opgesteld voor zowel separate als gecombineerde (WKK) opwekking.

Bij separate opwekking wordt stoom zelf opgewekt en elektriciteit ingekocht. Bij WKK wordt de elektriciteit al dan niet gedeeltelijk zelf opgewekt door middel van een stoomturbine die gevoed wordt door een stoomketelinstallatie. Een andere mogelijkheid is om met behulp van een gasturbine stroom op te wekken en stoom te genereren met een afgassen ketel die door de uitlaatgassen van de turbine gevoed wordt. Beide systemen hebben voor- en nadelen. Wel hebben beide systemen een energetisch voordeel t.o.v. separate opwekking.

Stroom opgewekt in elektriciteitscentrales en in wind- en waterturbines en zonnepanelen heeft een landelijk gemiddeld rendement van 56,4%. Dit op basis van het integraal berekende rendement in 2018 door het CBS. Waarbij het aandeel van de met brandstof gestookte centrales is berekend op basis van de stookwaarde (LHV). Bijna de helft van de energie die hiervoor gebruikt wordt bestaat voor een groot deel uit het koelen van de afgewerkte stoom om er wederom ketelvoedingwater van te maken. Bij zelfopwekking met een tegendruk stoomturbine wordt de stoom na de turbine gebruikt voor procesdoeleinden. De turbine werkt hierbij als een stoom reduceer waarbij gelijktijdig elektriciteit wordt opgewekt. Bij de gasturbine worden de gevormde rookgassen aangewend om stoom van te produceren in een afgassen ketel.



Afbeelding 6-1

WKK toepassing

Bron: steamsave

7.0 Regelingen en metingen bij stoomopwekking

De machinist die verantwoordelijk was om het ketelhuis operationeel te houden door dagelijks permanent toezicht is door de automatisering van het stoom opwekproces grotendeels uit het ketelhuis verdwenen. Het proces van stoomopwekking is heden ten dage nagenoeg volledig geautomatiseerd en wordt veelal vanuit controle ruimten op beeldschermen gemonitord. De diverse soorten regelingen van het waterniveau, de stoomdruk en -temperatuur, ketelwaterkwaliteit en brandstof/luchtverhoudingsregelingen van brandstof gestookte ketels worden uitvoerig behandeld.

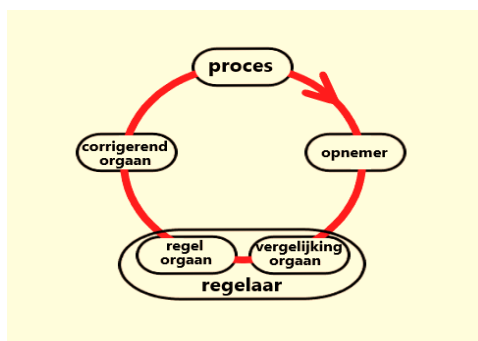
Ook het monitoren van verbruiksgegevens van stoom, gas, suppletie en ketelvoedingwater worden toegelicht. Samen met het meten van de rookgassamenstelling met bijbehorende temperaturen wordt er op deze wijze een optimaal rendement en onderhoudsarm opereren van de stoomopwekking gewaarborgd.

7.1 Regelkring

Een stoom opwekproces wordt bewaakt door middel van een regelkring. Dit is een gesloten loop van meten en regelen om processen te controleren om volgens een vooraf opgesteld patroon te laten verlopen.

De regelkring start met het meten van een proces. Zie **Afbeelding 7.1**. Dit gebeurt door het meten van een natuurkundige grootheid zoals druk, temperatuur, lengte, geleidbaarheid, et cetera. Het meetinstrument is een opnemer ook wel transmitter genoemd die de status van de grootheid meet in een bepaalde eenheid. In chronologie van de eerdergenoemde grootheden kan dit een pressostaat zijn die de stoomdruk meet in bar(g), een PT-100 element die de temperatuur meet van de oververhitte stoom in °C, een niveauelektrode die de positie van het niveau meet van het ketelwater in mm, of een geleidbaarheid elektrode die de geleidbaarheid van ketelwater meet in $\mu\text{S}/\text{cm}$. Deze transmitters geven een signaal door van de actuele waarde van de grootheid naar een regelaar ook wel 'controller' genoemd. Deze regelaar bestaat uit een vergelijkingsorgaan en een regelorgaan. Het vergelijkingsorgaan vergelijkt de actuele grootheid met de gewenste (ingestelde) waarde.

Dit laatste wordt ook wel het 'set-point' genoemd. Voldoet de gemeten waarde aan de gewenste waarde dan hoeft de regelaar niet in actie te komen en voldoet het proces aan de vooraf opgestelde eis. Wordt er echter een afwijking geconstateerd dan ontvangt de regelaar een signaal en zal deze vervolgens een corrigerend orgaan in het proces aansturen om er zorg voor te dragen dat uiteindelijk het proces verloopt volgens het vooraf opgestelde patroon.



Afbeelding 7-1 Regelkring

Bron:

7.2 Regelfuncties

Om een regelkring dusdanig te laten functioneren dat het proces aan de verwachting voldoet zijn er regelfuncties noodzakelijk. Deze regelfuncties bepalen de (toelaatbare) afwijkingen, grilligheid en snelheid waarbij optredende procesverstoringen gecorrigeerd worden.

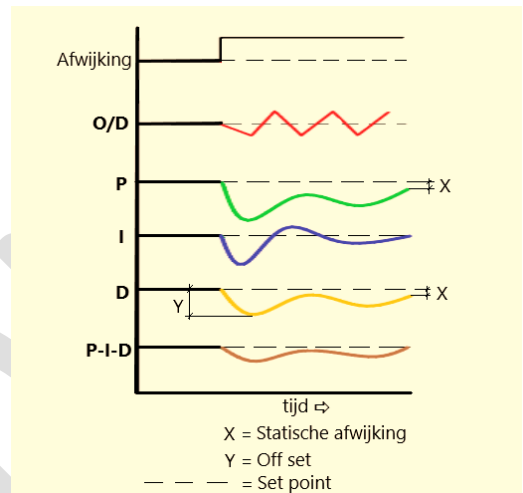
We onderscheiden de volgende regelfuncties:

- Aan/uit (O/D-actie)
- Proportioneel (P-actie)
- Integrerend (I-actie)
- Differentiërend (D-actie)

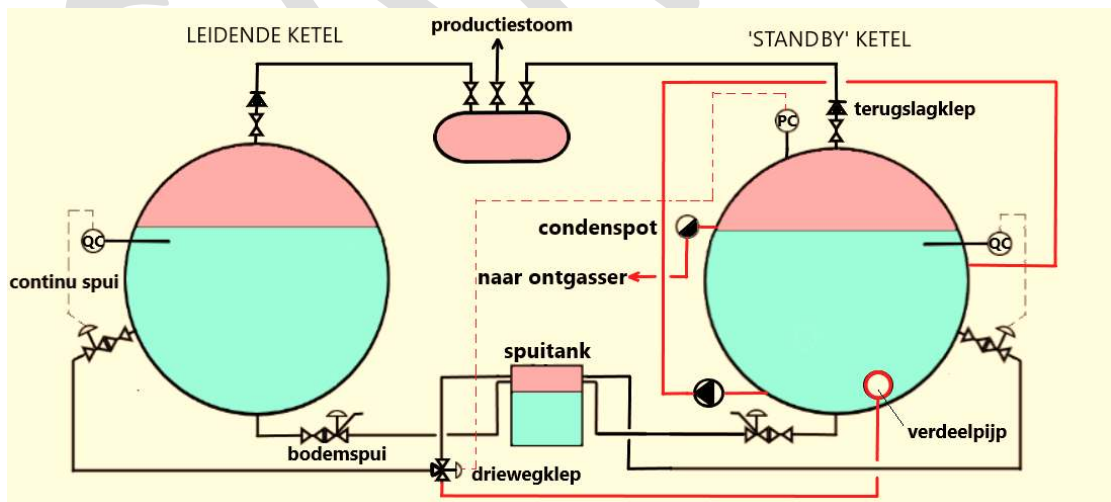
Zie **Afbeelding 7-4** voor de diverse regelfuncties.

De regelfuncties kunnen we het beste omschrijven aan de hand van een proces. Laten we als voorbeeld een niveau regeling nemen van een stoomopwekker. Indien er een afwijking ontstaat omdat ten gevolge van stoomproductie het niveau in de ketel daalt dan zal in eerste instantie bij de aan/uit (Open/Dicht) regeling geen actie plaats vinden. Deze zal namelijk pas in actie komen als het niveau te ver is gedaald. Vervolgens zullen in dit geval de ketelvoedingwaterpompen gestart worden om het niveau te herstellen. Echter hierbij zal er meer in de ketel gepompt worden als dat het 'set point' vereist. Dit is een nadeel van een O/D regeling. Het 'set-point' zal nooit bereikt worden maar blijft als een zaagtand hierom heen regelen.

Afbeelding 7-32 toont een 'stand-by' ketelregeling via de spui.



Afbeelding 7-4 Regelfuncties Bron: steamsave



Afbeelding 7-32

'Stand-by' regeling via spui

Bron: steamsave

8.0 Beveiliging van de stoomopwekking

Het belangrijkste van elke stoomopwekking is dat deze boven alles veilig is. Stoom en met name heet water onder druk vereist een hoge mate van beveiliging. Voeg daar nog aan toe het brand- en explosiegevaar dat het verstoken van brandstoffen met zich mee kan brengen en het zal u niet verbazen dat stoomopwekkers hoog scoren op de lijst van potentieel gevaarlijke toestellen. Voorgeschreven beveiligingen om gebrek aan ketelvoedingwater en te hoge stoomdruk en -temperatuur te voorkomen worden behandeld. Ook de diverse beveiligingen vanuit de brandstofvoorziening passeren de revue. Wet- en regelgeving zowel in Europees verband als van zowel in NL als in B(Vlaanderen) opgestelde stoomopwekkers en stookinrichtingen worden behandeld.

8.1 Risico's bij stoomopwekking

Aan de opwekking van stoom zijn risico's verbonden.

Dit kan persoonlijk letsel zijn door aanraking van ongeïsoleerde verwarmde delen of lekkages van pakkingen of door scheurvorming van heetwater en stoom toestellen.

Ernstig letsel met mogelijke dood tot gevolg kan het gevolg zijn van het bezwijken van stoomtoestellen zoals ketels, verdelers, leidingen, etc. Dit vanwege een optredende druk en/of temperatuur die hoger is dan de ontwerpconditie, waarbij beveiligingen niet hebben ingegrepen.

Ook door een slechte materiaalconditie vanwege corrosie, scheurvorming, slijtage en constructiefouten kunnen toestellen bezwijken. De materiaal conditie staat vaak in relatie tot de kwali-



Afbeelding 8-1

Geëxplodeerde stoomketel

Bron: Gooi- en Eemland

teit van de waterbehandeling. Ook kan door foutieve bediening van afsluiter organen een plotselinge faseverandering in leidingen optreden met mogelijke leidingbreuk tot gevolg omdat leidingen niet meer in positie blijven. **Afbeelding 8-1** toont de resten van een stoomketel die op 2 november 1998 is ontploft bij een voedingsmiddelenbedrijf in de omgeving van Hilversum.

8.2.2 Beveiligingen stoomtoestellen

Bij de opwekking van stoom zijn de volgende beveiligingen van toepassing:

- Drukbeveiligingen;
- Niveaubeveiligingen;
- Temperatuur beveiligingen.

Beveiligingen kunnen tevens naar uitvoering (primair of secundair) ook naar aantal afhankelijk zijn van het toezicht tijdens bedrijf van de stoomopwekking. Zie voor het overzicht in **Tabel 8-1**.

		Beveiligingen stoomopwekkers						
		stoomketels NL			stoomketes B (Vlaanderen)			
		RTOD	WBDA	KB 1991	KB 1991	KB 1991	KB 1999	
		O-0200	EN-12952	NBN I 01-002	TRD 604	TRD 604	EN-12952	
			EN-12953				EN-12953	
Bewakingsvorm		beperkt	onbewaakt	onbewaakt	8 h*	24 h	72 h	onbewaakt
max. pressostaat	aantal	1	1 ^a	1 ^a	1 ^h	1 ^a	1 ^a	1 ^a
veiligheidsklep	aantal	2	2	1	2	2	2	1
afblaas capaciteit	%	50	50	100	100	100	100	100
min. klepdoorlaat	mm	25	25	15	18	15	15	15
openingsdruk afwijking	%	3 ^f	3 ^f	3 ^f	0,1 bar	5	5	3 ^f
drukstijging	%	15	15	10	10	10	10	10
LW-elektrode ⁱ	aantal	1	2 ^a	2 ^a	2	2 ^a	2 ^a	2 ^a
HW-ektrode ⁱ	aantal	-	-	c	d	1	1 ^a	1
max. temperatuurbeveiliging	aantal	-	a, b	j	2 ^g	2 ^g	2 ^g	2 ^{a, g, j}
aut. geleidbaarheidregeling	aantal	-	-	c	-	-	1	g
aut. condensaat controle	aantal	-	-	c	-	1	1	e
aut. hardheid controle	aantal	-	-	c	-	-	1	g

^a fail safe uitvoering

^b vereist op vuurgang, indien $860 \cdot q_s + 0,2 \cdot D_g = > 530$

waarin: q_s = hoogste plaatselijke warmtestroomdichtheid, W/mm² en D_g = gem. diameter vuurgang, mm.

^c afhankelijk van voorschrift fabrikant (risico analyse)

^d bij toepassing van oververhitter in een vlampijp ketel

^e condensaat vervuiling zien te voorkomen

^f max. 0,1 bar indien afblaasdruk < 5 bar

^g vereist voor stoomgenerator (spiralen ketel)

^h 2 stuks vereist voor stoomgenerator (spiralen ketel)

ⁱ niet van toepassing voor stoomgenerator (spiralen ketel). Voor E- ketel slechts 1 elektrode LW.

^j vereist indien vuurgangdiam. > 1400 mm en warmtebelasting > 12MW.

* voor stoomgenerator (spiralenketel) i.p.v. 8h is dit 1 week

Tabel 8-1

Beveiligingen stoomopwekkers

Bron: steamsave

9.0 Waterbehandeling

Dit behelst in hoofdzaak de behandeling van water dat noodzakelijk is om een veilige, onderhoudsarme en efficiënt stoomopwekking te garanderen. De behandeling van zowel grond- als drinkwater om het geschikt te maken als suppletiewater wordt uitvoerig behandeld. Ionenuitwisselaars om het water te ontharden en te demineraliseren komen uitvoerig aan bod. Zoals ook de membraantechnieken die heden ten dage veel al ingezet worden om hiermede uitstekend behandeld suppletiewater te produceren worden omschreven. Naast deze waterbehandelingsapparatuur wordt ook de conditionering van het suppletie-, ketelvoeding- en ketelwater uitvoerig onder de loep genomen met daarbij ook het spuieregime. Tot slot worden de kwaliteitseisen waaraan de diverse waterstromen moeten voldoen zowel vanuit voorgeschreven normen als van de door de ketelfabrikant opgelegde eisen behandeld.

9.1 Watersamenstelling

Toepassing van stoom is wijd verbreid. Een van de redenen is omdat het water voor de opwekking van stoom ruimschoots voorhanden is. Voor stoomopwekking worden de volgende water-soorten, we noemen dit ook wel ruw water of 'make up' toegepast:

- Drinkwater;
- Grondwater;
- Oppervlaktewater;
- Industriewater.

Drinkwater is zeer geschikt voor stoomopwekking. De drinkwaterbedrijven gebruiken grond- en rivierwater dat wordt gezuiverd en deel onthard. Tientallen jaren geleden was de hardheid erg verschillend afhankelijk van het wingebed. Van oudsher zijn er in Nederland nog altijd veel wasserijen en papierfabrieken gelokaliseerd op de Veluwe vanwege het zachte water aldaar. Het drinkwater in NL heeft een gemiddelde hardheid van 8 °DH terwijl dit in B (Vlaanderen) tweemaal zo hoog is.

Grondwater wordt door bedrijven die zelf putten hebben geslagen onttrokken en voor stoomopwekking toegepast. Echter hierbij moet dit water veelal vooraf ontdaan worden van verontreinigingen zoals organische verbindingen, ijzer en mangaan om het geschikt te maken voor verdere behandeling.

Oppervlaktewater bevat naast organische verbindingen ook biologische verontreinigingen en moet derhalve vooraf gefilterd worden. Dit water wordt hoofdzakelijk toegepast voor condensor koeling bij elektriciteitsopwekking.

Industriewater voor stoomopwekking heeft meestal een hoge kwaliteit en is over het algemeen ontdaan van eerdergenoemde hardheden en verontreinigingen en heeft een demi kwaliteit. In industriële agglomeraties zoals bijvoorbeeld de Botlek en Antwerpen wordt dit o.a. toegepast.

9.2 Suppletiewater

Suppletiewater is behandeld ruw water dat veelal is ontdaan van zijn hardheid en in vele gevallen ook van de resterende zouten. Dit zijn beide opgeloste stoffen die in het ruwe water aanwezig zijn. Alleen de gassen waaronder zuurstof komen dan nog in het water voor. Suppletiewater met condensaat wordt daarom toegevoegd aan de ontgasser die deze eruit verwijderd. Daarnaast kunnen er in grondwater ook niet opgeloste stoffen zoals ijzer, mangaan, zand en dergelijke aanwezig zijn. Deze kunnen veelal door middel van filtratie eruit verwijderd worden.

Als we drinkwater en bronwater nemen als uitgangspunt voor de bereiding van suppletiewater dan treffen we daar in meer of mindere mate de volgende verontreinigingen in aan:

- Hardheid;
- Zouten;
- Mineralen zoals ijzer en mangaan (bronwater).

Voor de bereiding van suppletiewater, om hier vervolgens ketelvoedingwater van te bereiden, moeten genoemde verontreinigingen er groten deels uit verwijderd worden.

De reden is dat hardheid kalkaanslag produceert bij de stoomopwekking in de ketel. Deze kalk, ook wel ketelsteen genoemd, zet zich vast op de stalen delen van de ketel welke thermisch hoog belast worden. Bij de cilindrische ketel is dit de vuurgang en de vlampijpen geplaatst in de



Afbeelding 9-1 Ketelsteen in verdamperpijp Bron: All Pro Plumbing, Inc.

nabijheid van de vlam. Voor de waterpijp ketel zijn dit de verdamperpijpen in de nabijheid van de vlammen gevormd door de brander installatie. Deze kalkaanslag is een isolator waarbij de ontwikkelde warmte onvoldoende wordt overgedragen. De temperatuur van de stalen wand van vuurgang, vlampijp dan wel verdamperpijp kan hierbij zo hoog oplopen dat de materiaalsterkte sterk vermindert en er vervormingen en scheuren kunnen optreden met alle gevolgen van dien. Zie **Afbeelding 9-1**. Het is daarom dat fabrikanten en inspectieorganisaties dan ook 2 mm steenafzetting als

maximale grenswaarde beschouwen. Zie voor de invloed van kalkaanslag tevens Hoofdstuk 3.5.5.2. Naast dat het rendement van de ketel verslechtert kan kalk in het ketelwater tevens gaan zweven en hierbij verstoppingen opleveren in doorlaten van tubelures en appendages.

10.0 Exploitatie van de stoomopwekking

Hierbij worden een aantal onderwerpen behandeld die onontbeerlijk zijn voor een energiezuinig, onderhoudsarm en veilig opereren van de stoomopwekking.

De eigen verantwoordelijkheid die bij de eigenaren/gebruikers van toepassing is wordt door onafhankelijke inspectie- en keuringsorganisaties periodiek op handhaving gecontroleerd. De opgelegde bedrijfs- en bedieningsvoorschriften van de ketelfabrikant dienen nauwlettend opgevolgd te worden. Aan de hand van voorbeelden wordt de prestatie op het gebied van het rendement van een stoomketel uitvoerig berekend met ook energiebesparingen.

Ook de toegestane emissie aan NO_x voor zowel in NL als in B(Vlaanderen) opgestelde stookinstallaties wordt omschreven.

Bediening, toezicht en noodzakelijk onderhoud van de ketelinstallatie worden uitvoerig behandeld waarbij aandacht voor analyse van de water- en stoomkwaliteit. Tevens verdient het oplossen van storingen ook de nodige aandacht.

Aan de hand van monitoring en gebruiksgegevens wordt er een exploitatieoverzicht behandeld van de stoomopwekking. Hierbij wordt op basis van het jaarverbruik aan energie en de daarbij de behorende stoomopwekking het ketel- en het ketelhuisrendement als ook de emissies aan CO₂ en NO_x in kaart gebracht.

Tot slot worden berekeningen voor de exacte schoorsteenverliezen met meer diepgang behandeld in cursief geschreven tekst.

10.1 Eerstmalige in bedrijfname

Stoomketels moeten vooraf een keuring op de plaats van opstelling ondergaan voordat deze stoom mogen gaan leveren aan de afnemers. Deze keuring moet door een onafhankelijke instantie worden uitgevoerd. We moeten hierbij een onderscheid maken tussen bestaande ketels die voor de totstandkoming van de PED in bedrijf zijn genomen en ketels die daarna operationeel zijn geworden. Vaak maakt de stoomketel deel uit van een complete stoominstallatievoorziening met andere drukvaten, stoomleidingen naar de productie, etc. In het PED-jargon noemen we dit een samenstel. In onderstaand overzicht beperken we ons tot de stoomketelunit, stoomvaten en stoomleidingen.

Daarnaast moeten de brandstof gestookte ketels ook een inspectie ondergaan en dient er een officiële emissie meting uitgevoerd te worden.

10.3 Periodieke keuring en inspectie

Nadat de ketel voor de eerste maal in bedrijf is genomen zal deze tijdens zijn verdere levensduur periodieke keuringen en inspecties moeten ondergaan. Ook hierbij is een onderscheid te maken in keuringen van het keteldruklichaam en inspecties van de instrumentele beveiligingen

en de stookinstallatie. De keuring van het druklichaam wordt ook wel de inwendige keuring genoemd. Hiervoor moet de ketel zowel water- stoom- als rookgaszijdig inspecteerbaar zijn.

De volgende maatregelen en werkzaamheden zijn hierbij van toepassing:

- De ketel leeg, afgekoeld en gereinigd zijn;
- De ketel of drum moet veilig betreden en geïnspecteerd kunnen worden;
- Alle aansluitleidingen op de ketel zoals van stoom, gas, water, spui en dergelijke voorzien van een deugdelijke afsluitvoorziening. Het meest veilig zijn hiervoor het toepassen van bril- of steekflenzen. Zie **Afbeelding 10-6**. Ook kunnen aan- en afvoerleidingen ontkoppeld worden en voorzien worden van een blindflens. 'Block & bleed' afsluiters kunnen eveneens toegepast worden. Dit zijn twee blokafsluiters waartussen een aftapafsluiter is gemonteerd. Tijdens de inwendige keuring zijn beide blokafsluiters gesloten en staat de aftapafsluiter open. Zie hiervoor **Afbeelding 10-7**. **Vertrouw nooit op alleen één afsluiter die dicht staat!**



Afbeelding 10-6

Flenzenbord

Bron: LOTO-systems

- Vóór het betreden van besloten ruimten dienen de van toepassing zijnde veiligheidsregels in acht genomen te worden. Een gasmeting vooraf, ventilatie, het dragen van PBM's (Persoonlijke beschermingsmiddelen) en een mangatwacht zijn de meest essentiële voorwaarden hierbij. Vaak is er met name bij de grotere bedrijven een werkvergunning noodzakelijk.

- Voor de inwendige keuring moeten alle appendages gedemonteerd zijn van de ketel met inbegrip van de veiligheidstoestellen. Alleen de (hoofd) stoomafsluiter(s) hoeven niet gedemonteerd te worden van de ketelinstallatie. De veiligheidstoestellen dienen door een gecertificeerd bedrijf conform de PRD 3.2 voor NL en voor B (Vlaams deel) door een erkend organisme of gespecialiseerde onderhoudsdienst conform KB 1999 te worden beproefd. Een meetbrief of attest maakt deel uit van de testresultaten. Zie hiervoor ook Hoofdstuk 8.2.2.1.2.



Afbeelding 10-7 Block & bleed valve
Bron: Hanwel B.V.



Jan Koopmans is sinds jaren actief op het brede terrein van energieopwekking met toepassing van stoom als middelpunt. Hij is achtereenvolgens werkzaam geweest bij leveranciers en fabrikanten van stoomketels bij Standard Fasel, Hagoort en

ECO Ketelservice. In de functie van verkoop, engineering en projectmanagement voor ketelhuizen in binnen- en buitenland. Ook als adviseur voor stoomapplicaties bij Krachtwerktuigen, KWA, KW2 en Bureau Veritas. Vanaf 2010 geeft hij training aan ketelhuisoperators voor de opleiding tot Vakbekwaam Persoon Stoominstallatie (VPS) georganiseerd door het Stoomplatform. Sinds 2019 heeft hij een eigen adviesbureau: steamsave.

