

design your future

Beheer huurketelpark - Duurzaamheid in de stoomtechnologie

Elias Maes en Robbe Dhulster

Industriële wetenschappen en technologie

Bachelor in de elektromechanica afstudeerrichting
klimatisering

Campus Kortrijk

Academiejaar 2018-2019



katholieke hogeschool
associatie KU Leuven

design your future

Management of rental boiler park - Sustainability in steam technology

Elias Maes en Robbe Dhulster

Industriële wetenschappen en technologie

Bachelor in de elektromechanica afstudeerrichting
klimatisering

Campus Kortrijk

Academiejaar 2018-2019

Voorwoord

Geachte lezer,

Wij, Robbe Dhulster en Elias Maes, stellen met trots ons eindwerk voor dat is opgemaakt bij het bedrijf Callens te Waregem.

We volgden de opleiding: professionele bachelor elektromechanica optie klimatisering. Tijdens onze eindwerkperiode onderzochten we twee concrete studies in opdracht van technisch directeur Ivan Saelens die eveneens voor de nodige begeleiding zorgde. Zoals u later kunt lezen, deden we studie naar meebepaald de huurketels en naar de verschillende energiebesparende maatregelen bij stoominstallaties.

We kijken alvast terug op een zeer fijne afwisselende eindwerkperiode, waar we enorm veel bijleerden door de jarenlange ervaring van Dhr. Ivan Saelens. We hopen dat u als lezer evenzeer geboeid wordt door de stoomtechnologie en misschien bepaalde hoofdstukken in de toekomst nuttig kunt gebruiken als naslagwerk.

Vooraleer we u veel leesplezier toewensen, willen we in het bijzonder nog onze familie bedanken voor de steun, en het voltallige team van de dappere Calliërs voor hun inzet en wijsheid.

In het bijzonder bedanken we ook nog:

- De heer Ivan Saelens (technisch directeur)
- De heer Carl Coussement (interne begeleider Callens)
- De heer Stefaan Carlier (begeleidende docent)
- De heer Steven Haelewijn (Automation engineer Callens)
- De heer Koen Bultynck (Automation engineer Callens)

We excuseren ons alvast voor mochten we personen vergeten zijn te vermelden.

Veel leesplezier,

Robbe Dhulster en Elias Maes

4 april 2019

Callens Waregem

Inhoud

Voorwoord	4
Lijst met illustraties	7
Inleiding	10
1 Het eindwerkbedrijf	11
2 Beheer huurketelpark	12
2.1 Inleiding	12
2.2 Opbouw huurketels	12
2.2.1 Brander	13
2.2.2 Soorten brander uitvoeringen	13
2.2.3 Bouw van de brander	14
2.2.4 Branderkop	15
2.2.5 Ontsteking	16
2.2.6 Vlambeeld	17
2.2.7 Vlamdetectie	18
2.2.8 Ketel	19
2.3 Waterbehandeling	20
2.3.1 Waterbalans	22
2.3.2 Doseran van sulfiet	23
2.3.4 Problemen door slechte waterkwaliteit	24
2.3.5 Meetmethodes	25
2.3.6 Spuiverliezen	27
2.3.7 Digital monitoring of water quality	29
2.3.8 Wetgeving stoomketel	31
2.4 Piping (P&ID)	32
2.4.1 Berekening	32
2.4.2 Berekening koud waterleiding spuiwat	34
2.4.3 Leidingberekening in Excel	36
2.4.1 P&ID-schema huurketel	37
2.5 Permanente pompcavitatiebewaking	38
2.5.1 Methode volgens NPSH-bewaking	39
2.5.2 Methode volgens verzadigingstemperatuur	41
2.5.3 Pumpmeter - KSB	42

2.5.4 Pompschade Ecofrost.....	43
2.6 Logboek opvolging.....	44
2.6.1 Start van de werken	44
2.6.2 Voorbereiding en aansluiting appendages	45
2.6.3 Montage op trailer	45
2.6.4 Eindafwerking en in dienststelling	46
3 Duurzaamheid in de stoomtechnologie	47
3.1 Inleiding	47
3.2 Onderdelen van het stoomketelhuis geschikt voor warmterecuperatie.....	48
3.2.1 Spuivat.....	48
3.2.2 De ketelopbouw	51
3.2.3 Economiser	51
3.2.4 Rookgascondensor	53
3.2.5 Luvo	55
3.3 Energiebalans	58
3.3.1 Inleiding	58
3.3.2 Energiebalans Masureel	58
3.3.3 Opbouw energiebalans	59
3.3.4 Meetgegevensproblematiek	61
3.3.5 Bespreking loggegevens	63
3.3.6 Opstellen uur verdelingsgrafiek	65
3.3.7 Verklarende grafieken	66
3.4 Rendabiliteitsberekening economiser	72
3.4.1 Economiser 110 °C.....	72
3.4.2 Economiser 120 °C.....	74
Besluit	77
Bibliografie	78
Bijlagen	80
A - Checklist voor werken en onderhoud aan stoomketels	80
B - Technische fiche Pumpmeter (KSB)	85
C – Rapport revisie pompen Ecofrost.....	86

Lijst met illustraties

Figuur 1: Duobloc brander	13
Figuur 2: Monobloc brander	13
Figuur 3: Duobloc brander	13
Figuur 4: Branderbouw weishaupt combibrander	14
Figuur 5: Vlambeeld gas VS. stookolie	17
Figuur 6: Typisch vlambeeld stookolie - Low NOx	17
Figuur 7: Ionisatie-elektrode	18
Figuur 8: Principefiguur ionisatievlamdetectie	18
Figuur 9: Sturing vlambeveiliging	18
Figuur 10: Standard kessel 5 Ton stoomketel	19
Figuur 11: Standard kessel 7 Ton stoomketel	19
Figuur 12: Duplexcontainer watervoeding	19
Figuur 13: Opslagplaats appendages	19
Figuur 14: werking ionenwisselaar	20
Figuur 16: Ontharding	20
Figuur 15: Regeneratie	20
Figuur 17: Principewerking omgekeerde osmose	21
Figuur 18: Waterbalans stoomketel	22
Figuur 19: Sulfietmeting	23
Figuur 20: Watervoedingstank	23
Figuur 21: Putcorrosie t.g.v zuurstof in het ketelwater	24
Figuur 22: Kalkbrokken uit ketel met een te hoge waterhardheid	24
Figuur 23: Verminderde efficiëntie t.g.v. ketelsteen	24
Figuur 24: Vervuilde pijpwand t.o.v. zuivere pijpwand	24
Figuur 25: Kalkafzetting in spiraalwarmtewisselaar	25
Figuur 26: Kalkafzetting bij voedingswateringang	25
Figuur 27: Tabel van waterhardheid	25
Figuur 28: Geleidbaarheidssonde met oppervlaktespuiklep	26
Figuur 29: Corrosiesnelheid i.f.v. de pH-waarde	26
Figuur 30: Magnetietophoping op klepstaal	27
Figuur 31: Vorming van microjets t.g.v. belimplosie	38
Figuur 32: Pompcurve in Excel-programma	39
Figuur 33: Permanente pompbewaking NPSH	40

Figuur 34: Cavitatiebewaking volgens opvolging verzadigingstemperatuur	41
Figuur 35: Pumpmeter KSB	42
Figuur 36: Pumpmeter met frequentiesturing op pomp	42
Figuur 37: Containers 7 ton huurketel	44
Figuur 38: pompgroep.....	44
Figuur 39: 7 ton huurketel op trailer.....	44
Figuur 40: Monobloc brander	44
Figuur 41: Standardkessel op trailer	45
Figuur 42: Pompgroep beschermd tegen las	45
Figuur 43: Duplex waterontharder.....	45
Figuur 44: Monobloc brander	45
Figuur 45: Pompgroep.....	45
Figuur 46: Schouw ketel	46
Figuur 47: Oppervlaktespui met veiligheids.....	46
Figuur 48: Elektrische schakelkast.....	46
Figuur 49: Automatische bodemspui	46
Figuur 50: Gasdebiet voor 7 ton/h stoomproductie	49
Figuur 51: Economiser.....	52
Figuur 52: Relatie rookgastemperatuur en waterdampgehalte	53
Figuur 53: Heatpipe - werkingsprincipe	55
Figuur 54: Toepassing tussenmedium.....	56
Figuur 55: Voedingswater als tussenmedium	57
Figuur 56: LUVO-principe Weishaupt.....	57
Figuur 57: Logo masureel-group	58
Figuur 58: Excel rekensheet voor de energiebalans	59
Figuur 59: Excel-rekenblad	60
Figuur 60: Wervelingen na bluff-body	62
Figuur 61: Vortex stoomdebietmeter (Endress & Hausser)	63
Figuur 62: Uur verdelingsgrafiek i.f.v. totaal afgenomen stoomdebiet.....	65
Figuur 63: Geproduceerd stoomdebiet totaal en per ketel.....	66
Figuur 64: Stoomdebiet 15 ton ketel met bijhorende rookgastemperatuur.....	67
Figuur 65: Stoomdebiet 10 ton ketel met bijhorende rookgastemperatuur.....	68
Figuur 66: Verbrandingsrendement i.f.v. de rookgastemperatuur	68
Figuur 67: Stoomdebiet 10 ton ketel met rookgastemperatuur zonder stilstand.....	69

Figuur 68: Stoomdebietsgrafiek met alles op de 10 ton ketel gedimensioneerd.....	70
Figuur 69: Stoomdebietsgrafiek met alles op de 15 ton ketel gedimensioneerd.....	71

List of illustrations

Figure 1: Pop-up screen start up program	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
Figure 2: Standard shedule input data	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
Figure 3: Results in Excel sheet	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.

Inleiding

Wanneer men denkt aan 'stoom' dan denkt men voornamelijk aan oude industriële toepassingen en meer specifiek aan de stoommachine. De stoommachine heeft dan ook gezorgd voor een immense technische transitie wat uiteindelijk leidde tot de industriële revolutie.

Maar heel wat mensen weten niet dat stoom de dag van vandaag nog steeds veelvuldig wordt toegepast in tal van industriële processen. Van het schillen van aardappelen in de voedingsindustrie tot het drogen van verfstoffen in de textielindustrie. Voor zowat bijna elk thermisch proces kan stoom een oplossing bieden. Net daarom is het dan ook van groot belang om, wat voornamelijk nog omschreven wordt als een 'oude techniek' verder uit te bouwen en energetisch rendabeler te maken. Zo is er de intrede geweest van de economiser en later ook de rookgascondensor waarbij het de bedoeling is om tot in de mate van het mogelijke de restwarmte van de hete rookgassen nuttig te kunnen gebruiken. Voor het voorverwarmen van het voedingswater voor de ketel tot de aanmaak van warm proceswater.

Maar naast het steeds energetisch rendabeler maken van de stoomketels, moet men ook stilaan kijken naar een alternatieve manier om warmte op te wekken. Heden ten dage zijn er al succesvolle projecten waarbij er lokale WKK-installaties draaien op biogas. Of modulerende gasbranders die werken op basis van waterstofgas i.p.v. aardgas. Dit zijn allemaal efficiënte maatregelen die genomen kunnen worden om op een alternatieve manier warmte op te wekken voor de stoomproductie. Dit maakt dat we in het vervolg kunnen spreken van 'duurzame stoom'.

1 Het eindwerkbedrijf

Ons eindwerk hebben we uitgevoerd bij het bedrijf Callens. Dit bedrijf houdt zich in hoofdzaak bezig met de dimensionering en installatie van stoom en thermische olie-installaties. Daarnaast heeft Callens sinds kort zich ook gespecialiseerd in de luchttechniek, voornamelijk dan voor het klimatiseren en ventileren van grote industriële proceshallen.

Callens is tot op heden nog steeds een familiebedrijf met een vergaande ontstaansgeschiedenis. Het bedrijf werd in het jaar 1966 opgericht door Dhr. Willy Callens als een éénmanszaak in de centrale verwarming en sanitaire installaties.

Door de groeiende industriële markt is men in het jaar 1977 officieel gestart met de dimensionering, berekening en installatie van stoomketels, industriële piping en thermische olieketels. In dit jaar liet men de particuliere markt achterwege om volledig gefocust te zijn op industriële stoomtoepassingen.

Door de snelle toenemende groei, verhuisde het bedrijf naar een nieuwe vestiging te Harelbeke. Callens had op dat moment een 40-tal medewerkers in dienst.

In het jaar 2000 werd de leiding van het bedrijf officieel doorgegeven aan de dochter van Dhr. Willy Callens: Annick Callens en haar echtgenoot: Windy Moerman.

In 2001 volgde de overname van EMK door Callens waardoor de bedrijfsnaam veranderde naar Callens&EMK. EMK was een ketelbouwer die dreigde failliet te gaan.

De afdeling van luchttechniek kent zijn oorsprong in 2007. Sindsdien kunnen er naast stoomprojecten ook luchttechnische oplossingen worden aangeboden.

Door de verdere expansie en groei van het bedrijf kwam er in 2008 een definitieve verhuis naar de nieuwe site te Waregem en werd er in 2016 een nieuwe vestiging geopend te Geel (Limburg).

In het jaar 2009 sloot Callens een samenwerkingsverband met de firma Vyncke.

Dit bedrijf houdt zich hoofdzakelijk bezig met de installatie en engineering van gasgestookte WKK-installaties. De samenwerking tussen beide bedrijven resulteerde in: Callens-Vyncke.

In 2018 sloeg Callens ook de handen in elkaar met het Nederlandse bedrijf Optimum, een specialist in geur naverbranding.



2 Beheer huurketelpark

2.1 Inleiding

Callens beschikt over enkele tientallen huurketels die frequent worden verhuurd aan diverse klanten voor verschillende stoomtoepassingen. Doordat het huidige huurketelpark sterk verouderd is, heeft het bedrijf beslist om een zevental nieuwe huurketels op te stellen.

De eerste ketels zouden eind dit voorjaar operationeel moeten zijn.

Ook de steeds stijgende vraag naar verhuurtoepassingen zorgde ervoor dat het huurketelpark dringend moest worden uitgebreid.

Het is onze taak om de hernieuwing en uitbreiding van het huurketelpark op te volgen en de evolutie in opbouw van de nieuwe ketels te bespreken.

We bekijken hierbij o.a. welke leidingen, onderdelen en appendages er geplaatst worden en bespreken kort hun specifieke functie. Daarnaast dimensioneren en berekenen we enkele parameters die nodig zijn om een goed werkende huurketel te verkrijgen.

Als laatste zullen we ook even stil staan bij de waterkwaliteit van het suppletiewater en het op afstand kunnen monitoren en besturen van de huurketels.

2.2 Opbouw huurketels

Callens stelt zijn huurketels steeds zodanig op zodat deze in een standaard container geïntegreerd kunnen worden. Op die manier bekom je een volledige stookinstallatie die zeer compact is en eenvoudig getransporteerd kan worden. Anders dan bij de standaard stoomketels, moeten we bij de huurketels extra aandacht besteden aan o.a. de waterkwaliteit, de piping en de positionering van alle onderdelen, zodat deze voor veelvuldige stoomtoepassingen kan worden geïnstalleerd en indien nodig aan de noden van de klant eenvoudig kan worden aangepast.

Volgende belangrijke onderdelen van de huur stoominstallatie worden verder besproken:

- Brander
- Ketel
- Waterbehandeling
- Piping (P&ID)

2.2.1 Brander

Omdat een huurketel flexibel moet worden opgesteld naar de klant toe, is het van groot belang dat de brandstof eenvoudig gewijzigd kan worden. De huidige industrie heeft meestal wel toegang tot het aardgasnet, maar in bepaalde specifieke gevallen dient de brander aangestuurd te worden met (lichte) stookolie. Men denkt hierbij voornamelijk aan verder afgelegen industrieën en bij plaatsen waarbij de aardgasinstallatie alsook het ketelhuis volledig worden vernieuwd.

Om deze brandstofverandering eenvoudig te kunnen uitvoeren zonder daarbij grote verbouwwerken aan de ketel te realiseren, maakt men gebruik van zogenaamde combibranders. Dit zijn ventilatorbranders die zowel aardgas als stookolie kunnen verstoren. Ze zijn dan ook uitgerust met een gasblok, gasinjector, stookoliepomp, magneetventielen en verstuiers. Door enkel de aansluiting te veranderen en de instellingen van de brander minimalistisch te wijzigen kan men dus eenvoudigweg overschakelen van de ene naar de andere brandstof.

2.2.2 Soorten brander uitvoeringen

De toegepaste branders kunnen ongeacht de gebruikte brandstof onderverdeeld worden in twee categorieën:

- Monobloc
- Duobloc

Als men spreekt van een monobloc brander, dan bedoelen we een geventileerde brander waarbij de ventilator op de brander zelf is gemonteerd. Alle onderdelen bevinden zich in dezelfde behuizing. Bij een duobloc brander is de ventilator gescheiden van de eigenlijke brander. Deze uitvoering wordt toegepast bij grotere brandervermogens, meestal vanaf 10 MW. Het algemene voordeel van een duobloc uitvoering is dat deze m.b.v. een luvo de verbrandingslucht kan voorverwarmen tot een bepaalde temperatuur. Hierdoor worden de rookgassen ietwat gekoeld en is er minder vlamvermogen nodig om de koude luchttoevoer te gaan voorverwarmen. Men spreekt dan van een luchtvoorverwarmer of kortweg LUVO. Een LUVO is uiteraard minder efficiënt dan een watergekoelde economiser, daar de soortelijke warmte met een factor 4,2 verschilt. In het geval van de huurketels werken we steeds met monoblocbranders omwille van de beperkte ruimte



Figuur 2: Monobloc brander



Figuur 3: Duobloc brander

2.2.3 Bouw van de brander

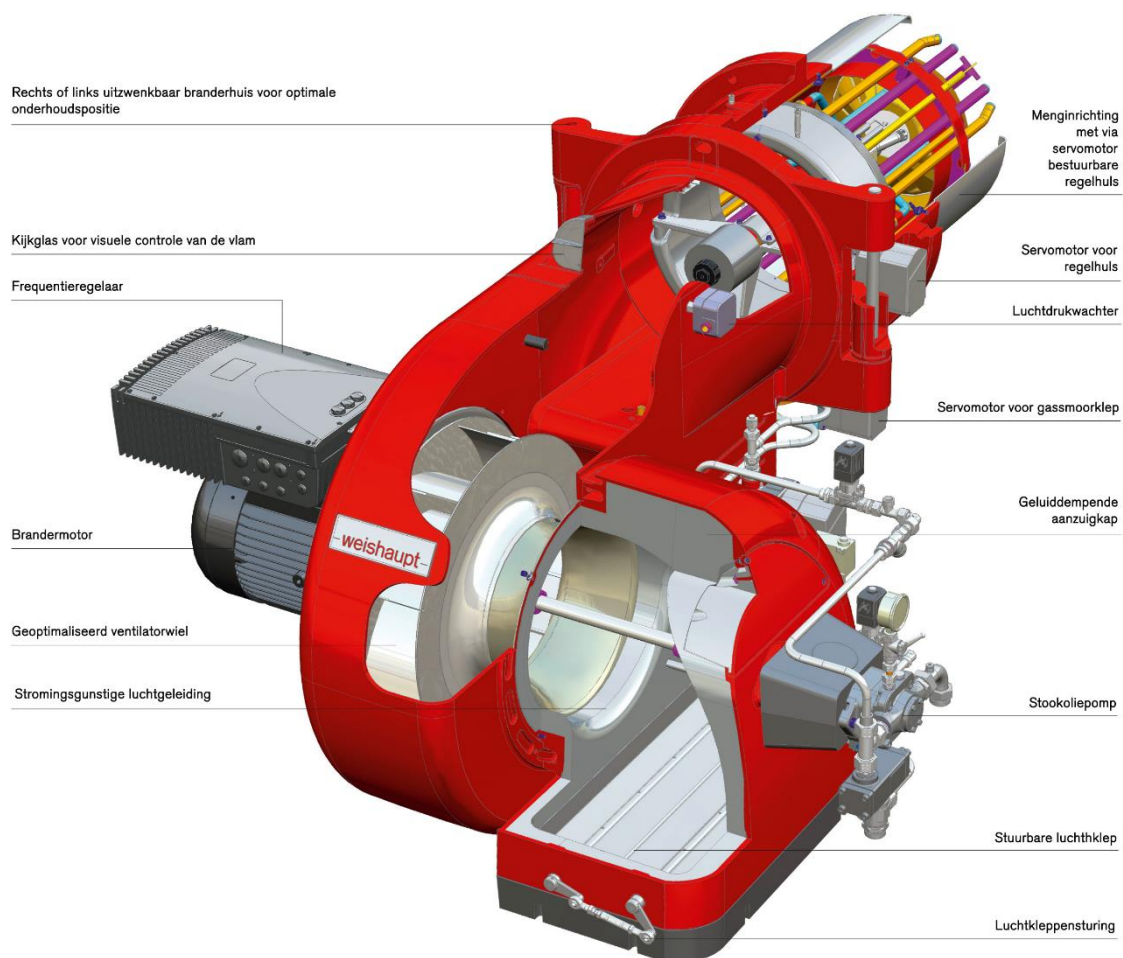
De bouw van de brander is sterk afhankelijk van de gewenste toepassing en het geselecteerde brandervermogen. Hoe groter het gevraagde vermogen, hoe groter ook de branderafmetingen zullen zijn, daar er een grotere ventilator zal moeten worden voorzien om het luchtdebiet te kunnen leveren. In ons geval van combibranders, wordt de brander voorzien van zowel een gasstraat als een stookolie-inrichting om op beide brandstoffen te kunnen functioneren. Hierbij wordt de stookoliepomp rechtstreeks aangedreven door de ventilatormotor van de brander (bij monobloc-uitvoering).

De regeling van het gas en luchtdebiet gebeurt a.d.h.v. lucht en regelkleppen die d.m.v. servomotoren aangestuurd worden.

Op de brander zijn eveneens een luchtdrukpressostaat en een gasblok aangesloten voor de controle van de brandstoftoevoer en het registreren van de luchtdruk.

Omdat bij de constructie van de huurketels de montageruimte eerder beperkt is, worden er uitsluitend monobloc branders geïnstalleerd. Het spreekt dan ook voor zich dat we beperkt zijn in het vermogen van de huurketels. Tot op heden is de grootste uitgevoerde huurketel een ketel met een stoomproductie van 15 T/h.

Voor grotere vermogens is het niet meer mogelijk om de ketel nog veilig en eenvoudig te transporteren.



Figuur 4: Branderbouw weishaupt combibrander

2.2.4 Branderkop

De branderkop is het onderdeel van de brander dat de aangevoerde lucht mengt met de aangesloten brandstof. Deze bestaat uit een verstuivingslijn met verstuiver in het geval van stookolie en een gasdiffusor in het geval van aardgas. Daarnaast bestaat de branderkop nog uit een vlammenhaker of stuwschijf. Deze schijf zorgt voor een mooie turbulente mengeling van de brandstof en de lucht, zodat de vlam mooi aan de branderkop haakt en er een mooi egaal vlambeeld gevormd wordt. Als deze schijf niet aanwezig zou zijn, zou men een verstoorde gele vlam verkrijgen die bijgevolg sterk onregelmatig brandt.

Om de vlam te ontsteken is er eveneens een ontsteekinrichting en vlamdetectie aanwezig op de branderkop (zie: ontsteking/vlambeveiliging).

In het geval van een combibrander moet men ervoor zorgen dat de kop zowel voor aardgas als voor stookolie geschikt is. De vlam moet mooi aan de kop aanhaken en een regelmatig egaal vlambeeld vertonen.

Daarnaast moet men eveneens ervoor zorgen dat de NO_x -vorming onder de opgelegde eisen blijft. Door aanpassing en verbetering van de branderkopconstructie kan men deze NO_x -uitstoot binnen de perken houden.

De meest toegepaste techniek hiervoor is het laten recirculeren van de rookgassen. Hierdoor wordt de vlam gekoeld en wordt de NO_x -productie binnen de perken gehouden. In functie van de toepassing van de brander kunnen verschillende branderkoppen worden toegepast:

Gaszijdige NO_x -reductie	Stookolie en gaszijdige NO_x -reductie
	
Optimale NO_x -reductie gasbranders	Extreem lage NO_x -reductie
	

2.2.5 Ontsteking

Naast de bouw van de branderkop is eveneens de methode van ontsteken sterk afhankelijk van de gewenste vorm van de vlam, vermogen en brandstof. Daar we meestal werken met combibranders moet het ontsteekmechanisme aangepast zijn voor zowel de ontsteking van aardgas als voor stookolie.

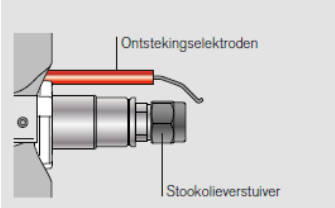
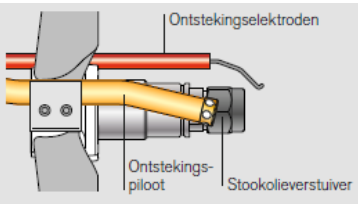
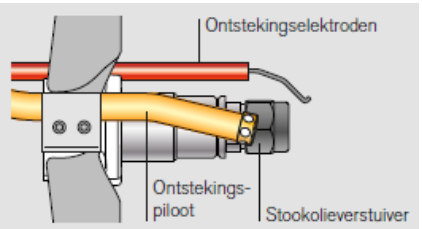
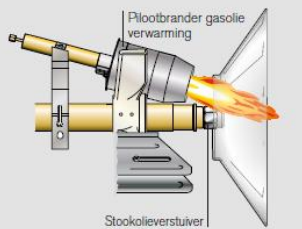
Men kan op verschillende manieren de brandstof gaan ontsteken:

- Directe ontsteking
- Pilootontsteking

Als men spreekt over een brander met directe ontsteking, dan wordt het lucht/brandstofmengsel direct ontstoken a.d.h.v. de hoogspanningselektroden. Deze manier van ontsteken wordt voornamelijk toegepast bij kleinere brandervermogens en specifiek dan voor stookoliebranders.

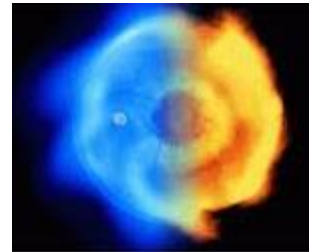
Als men te maken heeft met grotere brandervermogens, dan wordt de ontsteking meestal gerealiseerd d.m.v. een piloot-ontsteking. Hierbij wordt eerst een kleinere brander ontstoken d.m.v. de hoogspanningselektroden, waarna de hoofdvuurhaard op zijn beurt weer wordt ontstoken door de pilootontsteking. Hierdoor bekomt men een stabielere ontsteking in het geval van grotere vlamvermogens.

Indien men te maken heeft met zware stookolie als brandstof, dan kan als onsteekinrichting geopteerd worden om met een voorverwarmde pilootontsteking te werken. Dit wordt onder meer toegepast als er geen aardgas/LPG aanwezig is om de ontsteking te realiseren. Nadat de voorverwarmde pilootbrander is ontstoken wordt, na brandstofvrijgave, de primaire vuurhaard ontstoken.

Standaard ontsteking vloeibare brandstoffen	Standaardontsteking gasvormige brandstoffen
	
Optionele ontsteking vloeibare brandstoffen	Optionele pilootbrander voor zware vloeibare brandstoffen
	

2.2.6 Vlambeeld

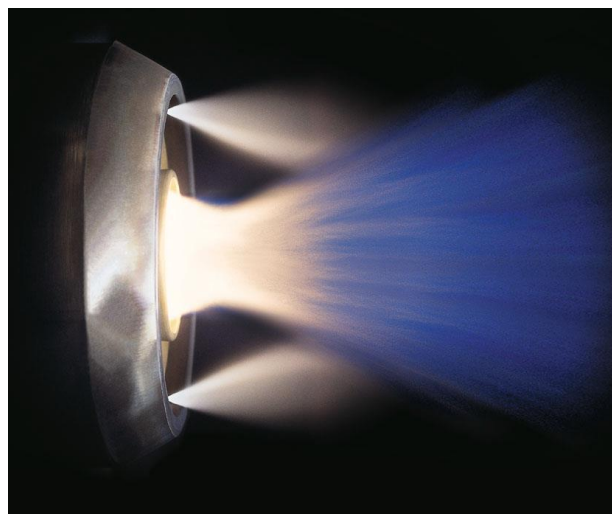
In functie van welke brandstof er juist toegepast wordt om de vlam te vormen, verkrijgen we een verschillend vlambeeld. Indien we werken met stookolie als brandstof, dan zien we een opmerkelijk geel gloeiende vlam. Bij aardgas is dit eerder een blauw transparantere vlam. Doordat de verbranding van stookolie minder efficiënt verloopt, zijn er per volume-eenheid meer roetdeeltjes (CO) in de verbranding aanwezig dan bij de verbranding van aardgas. Het roet licht op door inwerking van de omgevingswarmte en straalt bijgevolg met een typisch geel/oranje vlamkleur. Bij de verbranding van aardgas is de verbranding een stuk efficiënter waardoor er minder roet wordt gevormd en er dus een transparantere blauwere vlam gevormd wordt.



Figuur 5: Vlambeeld gas VS. stookolie

2.2.6.1 NO_x

Naast het zo efficiënt mogelijk verbranden van de brandstof, moeten branders er ook voor zorgen dat de vorming van NO_x wordt voorkomen. Dit wordt namelijk gevormd als men met hoge vlamtemperaturen werkt. Het aanwezige stikstofgas in de lucht (N₂) wordt mee verhit tijdens de verbranding. Gedurende dit proces kan het stikstofgas zich gaan binden met zuurstof waardoor NO_x gevormd wordt. Deze komen terecht in de atmosfeer en reageren in hoger gelegen luchtlagen met het aanwezige waterdamp tot zuren. Deze zuren behoren tot de familie van de salpeterzuren (HNO₃) en kunnen de oorzaak zijn van zure regen. Om de vorming van NO_x te voorkomen, moet men de vlam gaan afkoelen. Dit wordt gerealiseerd door het recirculeren van verbrandingsgassen over de vlam. Deze koelen de vlam af, waardoor de vorming van NO_x daalt.



Figuur 6: Typisch vlambeeld stookolie - Low NO_x

2.2.7 Vlamdetectie

In de aansturing van de brander is het van groot belang om de vlam effectief te kunnen detecteren. Het detecteren van de vlam is een cruciale veiligheidsmaatregel binnen de werkingscyclus van de brander. Als deze detectie niet aanwezig zou zijn, zou een eventuele vlamstoring niet gedetecteerd kunnen worden met alle gevolgen van dien.

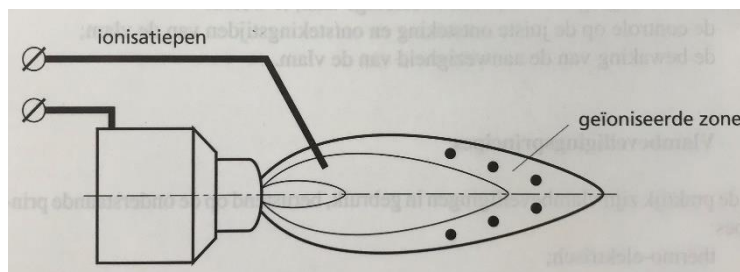
Er zijn meerdere methodes om deze detectie te kunnen realiseren, maar de meest toegepaste methode is deze met het opmeten van de ionisatiestroom van de vlam.

Bij dit type van vlamdetectie wordt de ionisatiestroom van de vlam gemeten. Deze stroom is gebaseerd op de mate van geleidbaarheid en gelijkrichting van de vlam. Aan de ionisatiepien wordt een constante wisselspanning aangelegd. Als er zich een vlam vormt rond de ionisatiepien, zal de geleidbaarheid van de lucht toenemen. De ionisatiestroom zal met andere woorden ook toenemen, daar de ohmse luchtweerstand kleiner wordt. Doordat de vlam een gelijkrichterseffect heeft, zal het wisselspanningssignaal met wisselende stroomwaarden gelijkgericht worden en doorgegeven worden aan de ionisatiepien.

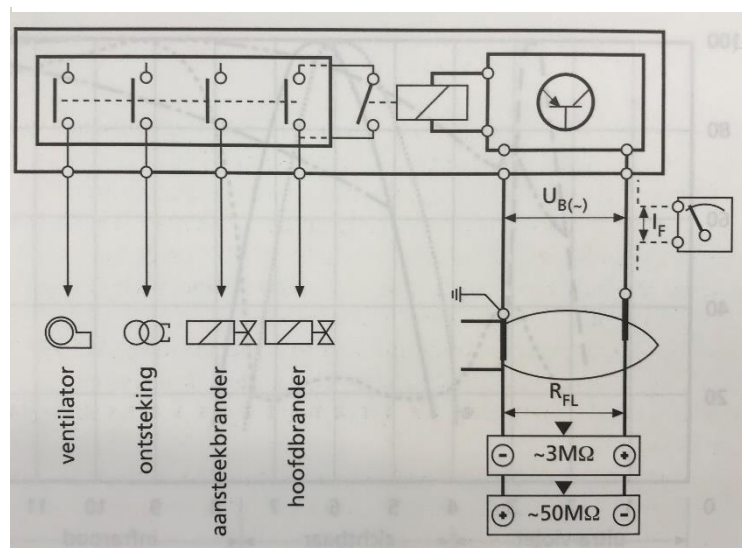
Deze stroom wordt door een elektronische schakeling opgevangen en versterkt zodat deze uiteindelijk een veiligheidscontact (relais, contactor) kan aantrekken en dus de vlamvrijgave aangehouden kan worden. Andersom, indien de vlam zou wegvallen om één of andere reden, zal de ionisatiestroom sterk dalen, de relais zal niet meer aangetrokken worden en de vlambeveiliging zal in storing treden.



Figuur 7: Ionisatie-elektrode



Figuur 8: Principefiguur ionisatievlamdetectie



Figuur 9: Sturing vlambeveiliging

2.2.8 Ketel

Als ketelconstructie voor de huurketels maken we voornamelijk gebruik van ketels van de merken Standardkessel en Viessmann. Voor de grotere huurketeluitvoeringen past men voornamelijk Standardkessel-ketels toe omdat deze zodanig geconstrueerd zijn dat ze in een licht vacuüm kunnen werken (-1 bar(g)). Concreet betekent dit dat er geen aparte vacuümbrekers geplaatst moeten worden, wat ertoe leidt dat er minder lekkage is van stoom. We passen voornamelijk 3-treks vlampijpketels toe, maar er zijn eveneens kleinere vermogens beschikbaar die gebruik maken van een Jumagketel.

Om het transport van de huurketels te vergemakkelijken worden de kleinere ketels volledig ingewerkt in gestandaardiseerde containers. Voor de grotere ketels dient men gebruik te maken van opleggers. Vroeger werden grotere ketels al op opleggers gemonteerd, maar vaak moest daarbij de bijhorende onderdelen (waterbehandeling, brandstofopslag...) apart worden bijgeplaatst. Dit zorgde voor dubbel transport en bijgevolg veel aparte installaties naast de huurketel. Om dit te voorkomen heeft men ervoor gezorgd dat alle voorzieningen nu op één en dezelfde trailer geplaatst kunnen worden. Hierbij wordt helemaal vooraan een zwarte container geplaatst die voornamelijk dienst zal doen als opslagplaats voor alle koppelingen, onderdelen en appendages.

Aan het einde van de trailer wordt dan een duplex containerconstructie gemonteerd die een overkapping zal vormen voor de brander. Daarnaast zal deze container de watervoedingspompen en de watervoedingstank huisvesten. Door alles op deze manier te monteren, beschikt men over een uiterst overzichtelijke installatie met alle reserveonderdelen beschikbaar in de opslagplaats. Dit zorgt uiteindelijk voor een aanzienlijke vergemakkelijking en tijdsreductie van het transport.



Figuur 10: Standard kessel 5 Ton stoomketel



Figuur 11: Standard kessel 7 Ton stoomketel



Figuur 13: Opslagplaats appendages



Figuur 12: Duplexcontainer watervoeding

2.3 Waterbehandeling

De ontharding van het suppletiewater is van groot belang als men geen ketelsteen (kalkophoping) wil bekomen. Het is dan ook belangrijk om steeds het water hiervoor op te volgen en aan te passen indien nodig. Overvloedige kalkophoping heeft namelijk nefaste gevolgen op de installatie. Omdat er in het verleden al heel wat problemen waren over de correcte opvolging van de waterkwaliteit, wil men nu zo veel mogelijk de meetbare parameters van op afstand kunnen monitoren en aanpassen indien nodig.

Het water kan op volgende twee manieren worden volbracht:

- Ionenwisselaar
- Omgekeerde osmose

Ionenwisselaar

Het te ontharden water stroomt door een harsvulling in een druktank (onthardingsflessen).

De hardheidsvormende calcium- en magnesiumionen worden door de harsen opgenomen en ingewisseld door “zachte” natriumionen.

Daarom heet dit systeem een ionenwisselaar.

Het harde water wordt door uitwisseling van de hardheidsvormers omgezet naar zacht water.

Als de uitwisselingscapaciteit is uitgeput, moet het hars met een geconcentreerde zoutoplossing worden geregenereerd.

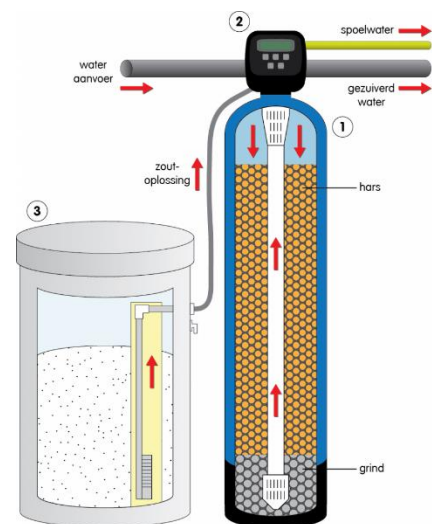
Bij de regeneratie neemt het hars natriumionen vanuit het zoutvat op en geeft de eerder verzamelde calcium- en magnesiumionen aan het spoelwater af. Dit spoelwater is overeenkomstig hard en wordt naar de afvoer geloosd. Deze kan namelijk niet meer nuttig worden toegepast.

Per regeneratie is normaal 120-240g regeneratiezout/ liter hars nodig.

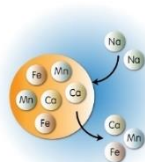
Bij 240g ontstaat het maximale rendement, bij 120g slechts 70% van de capaciteit.

Enkelvoudige installaties regenereren tijd gestuurd altijd op dezelfde, instelbare tijd.

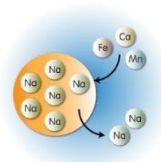
De regeneratie wordt niet dagelijks uitgevoerd, maar alleen als een ingestelde waterhoeveelheid is doorgestroomd en de restcapaciteit voor nog een dag waarschijnlijk onvoldoende is. Tijdens de regeneratie kan gedurende ca. 120 minuten geen zacht water worden afgenomen. Duplex ontharders bestaan uit twee onthardingsflessen en stellen ononderbroken zacht water ter beschikking. Als de ene fles regeneraert, is de andere fles in bedrijf. De regeneratie zorgt in dit geval voor geen onderbreking van de waterontharding.



Figuur 14: werking ionenwisselaar



Figuur 16: Regeneratie

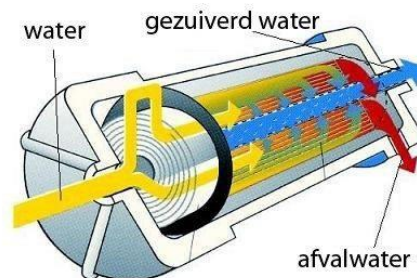


Figuur 15: Ontharding

Omgekeerde osmose

Naast de klassieke ionenwisselaar kan de waterontharding eveneens worden gerealiseerd door het plaatsen van een RO-installatie oftewel een waterbehandelingsinstallatie die werkt volgens het principe van *omgekeerde osmose* (Reverse osmose). Dit systeem omvat een speciale filterbehuizing die bestaat uit een speciaal filtercompartment. Deze filter bestaat uit een semipermeabel membraan. Aan de ene zijde wordt onbehandeld water onder hoge druk over het membraan aangebracht. Simplistisch voorgesteld houdt dit in dat het onbehandeld water onder hoge druk dwars door een zeef met microscopisch kleine gaatjes wordt gedrukt. De minerale deeltjes in het water kunnen hier niet door en worden d.m.v. spuien met het afvalwater weggespoeld. Het gevolg is mineraalvrij water dat geschikt is als suppletiewater voor de stoomketels.

Het grote voordeel van dergelijk onthardingssysteem is dat er op korte tijd grote hoeveelheden aan RO-water kan worden gevormd met een heel lage geleidbaarheid. Hierdoor moet de ketel aanzienlijk minder spuien wat dan weer een grote invloed heeft op het totale energetisch rendement van de stoominstallatie. Ook werkt een RO-installatie permanent en is er geen regeneratie nodig. Wel moeten de filterelementen regelmatig gecontroleerd en gereinigd worden. Ook de kost van de investering in een RO-installatie is aanzienlijk hoger dan dat van een ionenwisselaar.

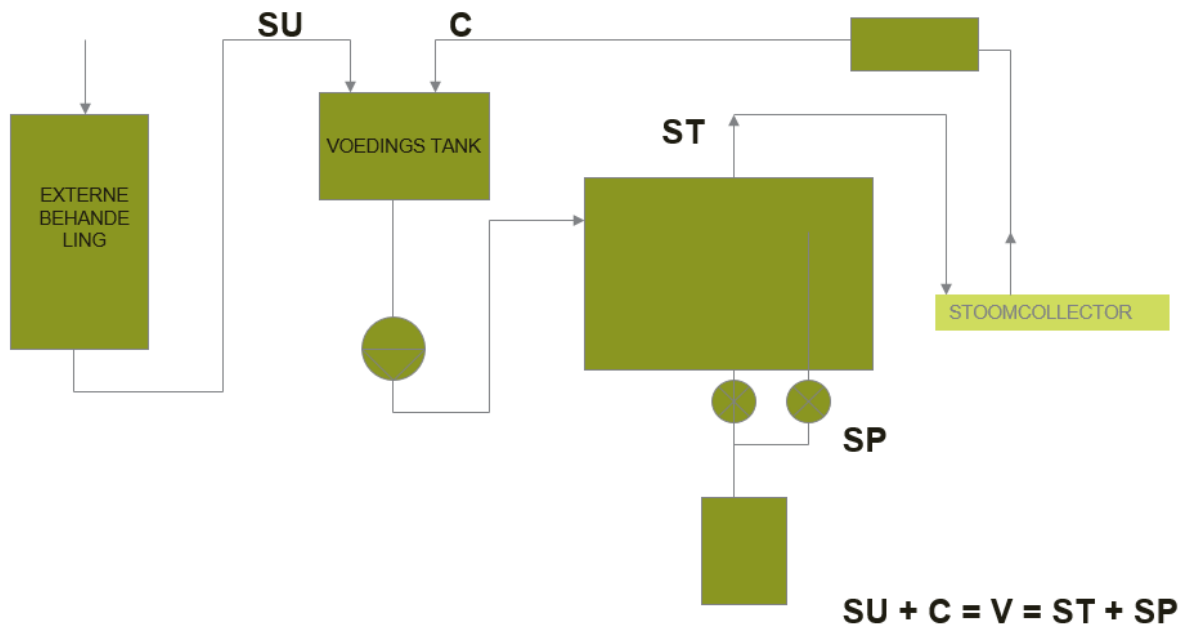


Figuur 17: Principewerking omgekeerde osmose

Momenteel worden in alle huurketeltoepassingen gebruik gemaakt van ionenwisselaars om de hardheid van het suppletiewater te verminderen. Op termijn is dit echter een onthardingstechniek die stilaan minder en minder zal worden toegepast, zeker bij de vaste installaties. Om die reden is men bij Callens dan ook op zoek om eventuele alternatieven voor het ontharden te zoeken of om over te gaan naar geïmplementeerde RO-installaties. Men wil namelijk in de mate van het mogelijke proberen te vermijden dat het onthardingsproces verstoord wordt als de klant vergeet zijn regeneratiezout bij te vullen. Dit heeft namelijk nefaste gevolgen voor de ganse stoominstallatie. Ook worden zo lekken in de zouttanks vermeden, omdat deze heel moeilijk weg te krijgen zijn. Ekopak, de waterbehandelaar waar Callens vaak mee samen werkt, werkt aan een filtertechniek met membranen om dit probleem op te lossen.

2.3.1 Waterbalans

Op onderstaand schema wordt de waterbalans van een stoomketel afgebeeld:



Figuur 18: Waterbalans stoomketel

SU = suppletiewater

C = condensaat

ST = stoomketel

SP = spui

Het ingaande en uitgaande volume van de voedingswatertank is gelijk aan elkaar (wet van Kirchhoff). Een eerste manier om het water te behandelen wordt gerealiseerd door voor de voedingstank, waar het verse water toekomt, een externe waterbehandeling te plaatsen (onthardingsinstallatie). In deze behandeling wordt kalk en vrije mineralen uit het water gehaald. Als dit niet wordt gedaan dan kunnen deze mineralen neerslaan in de ketel. Bij een vlampijpketel zullen deze mineralen zich afzetten op de vlampijpen, bij een spiraalketel zullen deze mineralen zich in de spiraal zelf afzetten. Kalk kan nog worden verwijderd d.m.v. chemisch reinigen, maar dit is een kostelijke behandeling. Mineralen zoals magnesium kunnen echter niet meer worden verwijderd. Daarom wordt er in de ketel altijd een spuivoorziening geïnstalleerd. Echter als het water op voorhand wordt behandeld, zal er minder moeten worden gespuid. Spuien is namelijk een grote verliespost. De investering voor een externe waterbehandeling kan dan op de spui-inrichting worden bespaard. Het is ook heel belangrijk dat het zuurstof uit het water wordt verwijderd, omdat door de aanwezigheid van zuurstof er actieve zuurstofcorrosie kan optreden in de ketel (putcorrosie).

Er zijn 2 mogelijkheden om het zuurstofgehalte in het water te verminderen:

- Doseren van sulfiet (chemisch binden)
- Ontgassingsinstallatie (uitkoken van zuurstof)

2.3.2 Doseren van sulfiet

Er kan sulfiet gedoseerd worden in de voedingstank of in de aanvoerleiding naar de ketel. Sulfiet bevat de eigenschap dat het zuurstof met zich kan binden waardoor het geen schade meer kan aanrichten. Er bestaan speciale strips om het sulfietgehalte te meten in het voedingswater. Een hogere concentratie aan sulfiet betekent dat er meer zuurstof kan gebonden worden. Er zal steeds voldoende aandacht moeten worden besteed aan de correcte dosering van sulfiet. Een te grote hoeveelheid leidt tot een snellere indikking van het ketelwater wat uiteindelijk ervoor zorgt dat er meer spuverliezen zullen optreden. Daarnaast moet een tekort aan sulfiet absoluut worden vermeden, daar er bij geringe zuurstofhoeveelheden in het water al actieve zuurstofcorrosie kan optreden (putcorrosie).

De maximaal toegelaten concentratie aan zuurstof in het water bedraagt 20 ppm.

In het geval van een huurketel treedt er nog een bijkomende problematiek op.

Als er namelijk langdurige stilstand is van de ketel, moet er voor gezorgd worden dat er tijdens stilstand een extra grote hoeveelheid sulfiet wordt gedoseerd. Dit om er zeker van te zijn dat alle zuurstof voldoende met het sulfiet gebonden kan worden.



Figuur 19: Sulfietmeting

2.3.3 Voedingswatertank

De voedingswatertank is het onderdeel van de installatie dat de taak heeft om het retourcondensaat en het suppletiewater op te slaan. Daarnaast wordt er in de voedingswatertank stoom geïnjecteerd om het voedingswater naar de ketel voor te verwarmen. Als men dit niet zou doen, zal men, zodra het koude water in de ketel geïnjecteerd wordt, een plotselinge volumedaling krijgen van de gevormde stoom. Dit komt omdat de



Figuur 20: Watervoedingstank

stoom in contact komt met het koude water, waardoor deze zal beginnen te condenseren en in volume zal afnemen. Men spreekt dan van het inkrimpen van het stoomkussen. Bijgevolg verkrijgt men een sterke daling in de stoomproductie en daarbij horend een dalende piek van de stoomdruk. Men heeft er dus alle baat bij om het voedingswater tot een bepaalde temperatuur voor te verwarmen.

Aangezien er bij de opstelling van de huurketels geen overschot aan plaats is, kunnen we niet gaan werken met een economiser voor het opwarmen van het voedingswater. Dit dient dus te gebeuren d.m.v. stoominjectie in de tank.

Daarnaast zullen er chemicaliën (SO_3^{2-} , NaOH) in het voedingswater gedoseerd moeten worden om de aanwezige zuurstof met elkaar te binden en om de pH-waarde van het water te verhogen zodat er geen zuurcorrosie in de ketel kan optreden.

2.3.4 Problemen door slechte waterkwaliteit

Een vaak voorkomend probleem is putcorrosie. Dit is een corrosievorm waarbij kleine putten gevormd worden in de leidingen en appendages. Putcorrosie komt voor bij metalen die zich beschermen met een oxide laag (RVS). Deze vorm van corrosie ontstaat als er zich nog vrije zuurstofdeeltjes bevinden in het ketelwater. Ze kunnen lokaal de vlampijpen beschadigen (zie: afbeelding 20) of tasten de pijpenwarmtewisselaar van de economiser aan. Ook al is deze in RVS uitgevoerd.

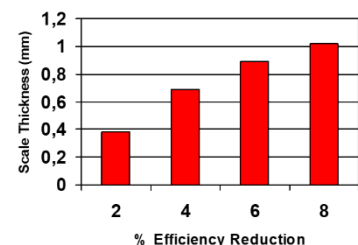


Figuur 21: Putcorrosie t.g.v. zuurstof in het ketelwater

Door een slechte waterkwaliteit (hoge waterhardheid) kan er ook kalksteen of ketelsteen gevormd worden. Door de afzetting op de vlampijpen, ontstaat er een isolerende laag rond deze vlampijpen. Ten gevolge van deze isolerende laag kunnen de vlampijpen hun warmte minder efficiënt afgeven aan het ketelwater. Studies hebben aangetoond dat er bij een afzetting van 1 mm ketelsteen, het rendement van de warmteafgifte met zo'n 8% daalt. De vlampijpen zullen dus minder goed gekoeld worden, wat voor extra belasting en spanning op het materiaal zal zorgen en uiteindelijk ook de oorzaak kan zijn van spanningscorrosie (combinatie van zuurstofcorrosie en spanningen in het metaal).

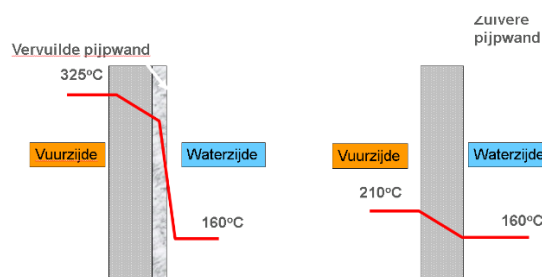


Figuur 22: Kalkbrokken uit ketel met een te hoge waterhardheid



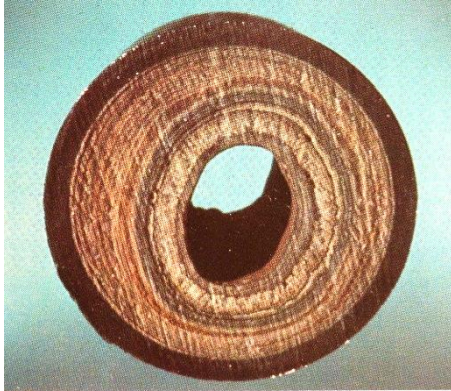
Figuur 23: Verminderde efficiëntie t.g.v. ketelsteen

Op onderstaande afbeelding is het gevolg van minerale afzetting op de vlampijpen aangetoond i.v.m. de keteltemperatuur aan beide kanten van de vlampijp. We merken op dat de temperatuur aan de vuurzijde veel hoger ligt bij afzetting van mineralen omdat deze de vlampijpen als het ware isoleren.



Figuur 24: Vervuilde pijpwand t.o.v. zuivere pijpwand

Bij een vlampijpketel is het nog mogelijk om via de mangaten de ketel te betreden en afzetting op de vlampijpen te bestrijden. Bij een spiraalketel is dit echter niet mogelijk omdat het water hier in de spiraal zelf circuleert. Als de spiraal volledig is toegestopt met kalk zit er niets anders op dan deze volledig te verwijderen of te zuren.



Figuur 25: Kalkafzetting in spiraalwarmtewisselaar



Figuur 26: Kalkafzetting bij voedingswateringang

2.3.5 Meetmethodes

Uiteraard moeten we bepaalde metingen kunnen uitvoeren om de kwaliteit van het water te testen en met behulp van deze testen de nodige maatregelen te nemen. In het geval van de huurketels is het van groot belang deze metingen zeer frequent uit te voeren om eventuele ketelschade te voorkomen. Het is echter de eindklant die instaat voor het meten van bepaalde zaken zoals: sulfietgehalte, hardheid en pH-waarde. Deze metingen kunnen tot op heden niet geautomatiseerd worden en dienen dus handmatig te worden opgevolgd. Er wordt door Callens aan een eventuele opvolgingssoftware gewerkt om in de toekomst deze metingen te automatiseren en te digitaliseren (zie: verder).

2.3.5.1 Hardheid

De eerste meting die we kunnen uitvoeren, is het meten van de hardheid van het water. De hardheid van het water is de hoeveelheid kalk die zich in een wateroplossing bevindt. Er zijn 2 schalen waarmee gerekend wordt, de Franse en de Duitse hardheid.

	1 mmol/l Alkali earth ions	10mg CaO/l German hardness	10mg CaCO ₃ /l French hardness	1mg CaCO ₃ /l = ppm CaCO ₃
mmol/l	1	5.6	10	100
°dH (German hardness)	0.18	1	1.78	17.8
°f (TH) (French hardness)	0.1	0.56	1	10
ppm CaCO ₃	0.01	0.056	0.1	1

Figuur 27: Tabel van waterhardheid

De hardheid wordt gemeten in millimol per liter, 1 millimol komt overeen met 10 mg kalk. In Callens wordt gewerkt met de Duitse hardheid.

Voor het proefondervindelijk bepalen van de hardheid, vullen we een proefflesje met een waterstaal en voegen druppels testvloeistof toe tot het staal groen kleurt. Per druppel dat er toegevoegd wordt en niet verkleurt, heeft het water 1° Duitse hardheid, wat overeenkomt met 10 mg kalk/liter.

2.3.5.2 Geleidbaarheid

De maat van de geleidbaarheid van het water is een maat voor de hoeveelheid mineralen en vrije ionen in het water. De eenheid van geleidbaarheid is microsiemens per cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

De maximumgeleidbaarheid van het ketelwater bedraagt 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Om deze geleidbaarheid van het ketelwater binnen de perken te houden, is het van groot belang om de spuiregeling per installatie goed af te regelen.

Daarnaast dient de bodemspui om het bodemslip in de ketel af te spuien.

De aansluiting waar de geleidbaarheidssonde alsook de oppervlaktespui zijn gemonteerd, bevindt zich op het minimumniveau van de ketel.

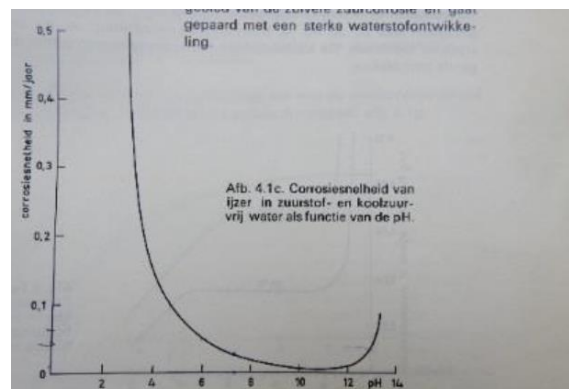
De concentratie aan mineralen en vrije ionen in het ketelwater is hier het grootst, waardoor ook hier de geleidbaarheid het snelst zal variëren.



Figuur 28:
Geleidbaarheidssonde met
oppervlaktespui

2.3.5.4 pH-waarde

De pH-waarde van het ketelvoedingswater, het ketelwater en het retourcondensaat worden apart opgemeten. Dit wordt gerealiseerd a.d.h.v. specifieke teststrips die in functie van een bepaalde pH-waarde een bepaald kleur geven. Daarnaast bestaat er ook een digitale pH-meter om eenvoudigweg en correct de pH-waarde van het water te bepalen. Het is van groot belang dat de zuurtegraad van het ketelwater niet te laag noch te hoog is. Als deze te laag zou zijn, dan hebben we te maken met zuur water wat er op zijn beurt voor zorgt dat zuur en zuurstofcorrosie versneld kunnen voorkomen. Deze corrosie heeft nefaste gevolgen voor de levensduur van de ketel, de leidingen en de appendages. Daarnaast mag de pH-waarde zeker ook niet te hoog oplopen. Dit wordt meestal bekomen nadat er een te grote hoeveelheid aan chemicaliën geïnjecteerd is geweest. Een te grote pH-waarde van het water kan ervoor zorgen dat de waterlijn van de ketel zich zeer onregelmatig gaat gedragen door schuimvorming waardoor chemische primage gevormd kan worden. Dit is het meesleuren van ketelwater met de afgenomen stoom naar de stoomleidingen en de aangesloten toepassingen. Dit water heeft echter geen gunstige eigenschappen en kan het proces negatief beïnvloeden.



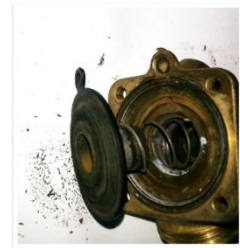
Figuur 29: Corrosiesnelheid i.f.v. de pH-waarde

2.3.5.5 Visuele controles

Aan de hand van de kleur van het ketelwater zijn bepaalde vormen van corrosie herkenbaar, een bruine kleur typeert actieve zuurstofcorrosie, een zwarte kleur typeert een hoge aanwezigheid van magnetiet en een witte kleur toont de aanwezigheid van een hoge concentratie aan kalk. Magnetiet is een corrosievorm die optreedt bij een zuurstofarme omgeving. Het vormt een zwarte beschermende laag aan de binnenkant van de leidingen. Wanneer nu zuurstof intreedt, zoals bij lekkages het geval is, wordt het magnetiet instabiel en komt los van de leidingen. Dit herhaaldelijk loskomen en afzetten zorgt voor een verhoogde concentratie van magnetiet. Dood water (zwart water) is dus helemaal niet zo dood.

De gevolgen van magnetiet zijn:

- Erosie van componenten
- Vastzittende kleppen
- Slibvorming
- Rendementsverliezen



*Figuur 30:
Magnetietophoping op
klepsteel*

De aanwezigheid van schuim in het water wijst er ook op dat er te veel chemicaliën gebruikt worden, er treedt gevaar op van het opschuimen van het ketelwater en het aanzuigen van natte stoom, wat op zijn beurt leidt tot erosie van het leiding werk (chemische primage). Een vetlaag op het ketelwater of nare geuren wijzen erop dat er vervuiling is van het retourcondensaat.

2.3.6 Spuiverliezen

Zoals eerder al vermeld is het spuverlies sterk afhankelijk van welke waterbehandeling er wordt toegepast (ionenwisselaar, RO-installatie). Daarnaast is ook de hoeveelheid suppletiewater van belang. Als er veel retourcondensaat is, zal de geleidbaarheid in het algemeen een stuk lager zijn dan indien men werkt met een beperkte hoeveelheid aan retourcondensaat. Om dit even praktisch voor te stellen schetsen we twee verschillende situaties. Bij de ene situatie maken we gebruik van een klassieke ionenwisselaar en in de andere situatie maken we gebruik van een RO-installatie. We berekenen vervolgens het spuidebiet van de installatie en de daarbij optredende energieverliezen en energiekost.

Met behulp van volgende formule kan het spui-debiet van de ketel worden bepaald:

$$Spuidebiet = \frac{F}{B - F} \times S$$

F = Geleidbaarheid van het ketelvoedingswater

B = Gewenste geleidbaarheid van het ketelwater (5000 μS)

S = Stoomdebiet

Aan de hand van de actueel gemeten geleidbaarheid (F), kan het spuidebiet alsook het energieverlies en de kosten worden bepaald. We bekijken eens de verschillen tussen een klassieke ionenwisselaar en een RO-installatie:

2.3.6.1 Klassieke waterbehandeling



F = 600 μS

B = 5000 μS

S = 5000 kg/u

P stoom = 8 bar (175°C)

Spuidebiet = 682 kg/u (>13%)

Spuiverlies = 131 kW

6000u/j

Gasprijs = 25 €/MWh

Spuikost = 24.250 €/jaar

+ waterkost

+ waterbehandelingskost

+ losingskost

2.3.6.2 RO-waterbehandeling



F = 20 μS

B = 2000 μS

S = 5000 kg/u

P stoom = 8 bar (175°C)

Spuidebiet = 50 kg/u (1 %)

Spuiverlies = 10 kW

6000u/j

Gasprijs = 25 €/MWh

Spuikost = 1.850 €/jaar

2.3.7 Digital monitoring of water quality

Although the past has learned that a good water quality is very important, most of the times it's left behind because a lack of time or because the client thinks it's not their biggest concern. For this problem, we tried to find a solution to convince our clients to manage their water quality. We developed a program with Visual Studio that makes it possible to manage digitally the water quality. With the program we register the measurements and then automatically send it with an excel file to the appropriate person in Callens. We will test the program with the rental park and the service department of Callens. If the results are good, then we will implement the program to every department. Now we will describe the working of the program.

When we start the program, we get a pop-up screen that asks the name of the company.

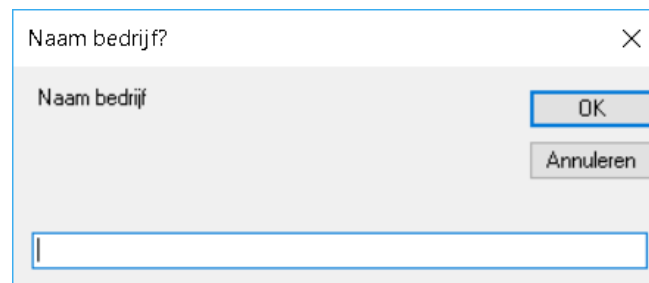

 A small dialog box titled 'Naam bedrijf?' with a close button (X) in the top right corner. It contains a text input field labeled 'Naam bedrijf'. Below the input field are two buttons: 'OK' and 'Annuleren'.

Figure 1: Pop-up screen start up program

When the client enters the name of the company, the program will show the screen underneath. The information about the company will automatically update the Excel's file name. In the program all the measurements can be entered in the appropriate textboxes (hardness, pH, view, conductivity). If we press the button: 'Create Excel', the program will create an Excel file and update it with the given results. The program will ask the client where it wants to save the Excel. Now the Excel file with the measurements is saved.

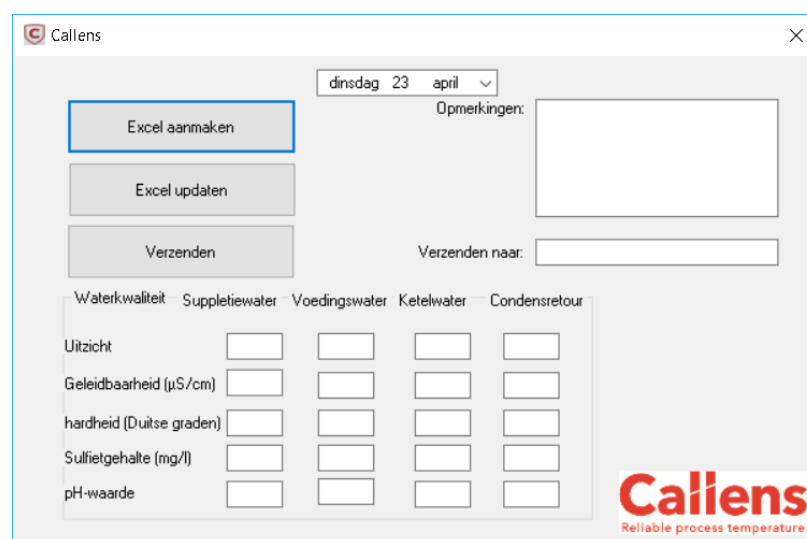

 The main application window titled 'Callens' with a close button (X) in the top right corner. It features a date selector at the top showing 'dinsdag 23 april'. On the left, there are three buttons: 'Excel aanmaken' (highlighted with a blue border), 'Excel updaten', and 'Verzenden'. To the right of these buttons is a text area labeled 'Opmerkingen:' and a text box labeled 'Verzenden naar:'. Below these elements is a table for data entry with five columns: 'Waterkwaliteit', 'Suppletiewater', 'Voedingswater', 'Ketelwater', and 'Condensretour'. The rows include 'Uitzicht', 'Geleidbaarheid (µS/cm)', 'hardheid (Duitse graden)', 'Sulfietgehalte (mg/l)', and 'pH-waarde', each with a corresponding input field. The 'Callens' logo with the tagline 'Reliable process temperature' is located in the bottom right corner.

Figure 2: Standard schedule input data

The client can also choose the date, to follow up the quality over a longer time. If the client wants to update the Excel file, he simply clicks the button 'Update Excel' and the Excel will update automatically. The Excel sheet will look like this:

	23-04-2019		
<u>Suppletiewater</u>		<u>Ketelwater</u>	
Uitzicht	helder	Uitzicht	helder
Geleidbaarheid ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	100	Geleidbaarheid ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	5500
Hardheid (Duitse graden)	1	Hardheid (Duitse graden)	0.5
Sulfietgehalte (mg/l)	2	Sulfietgehalte (mg/l)	6
pH-waarde	6	pH-waarde	7
<u>Voedingswater</u>		<u>Condensretour</u>	
Uitzicht	troebel	Uitzicht	helder
Geleidbaarheid ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2000	Geleidbaarheid ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	50
Hardheid (Duitse graden)	1	Hardheid (Duitse graden)	1
Sulfietgehalte (mg/l)	5	Sulfietgehalte (mg/l)	4
pH-waarde	7	pH-waarde	9

Figure 3: Results in Excel sheet

When the client wants to send the Excel file to Callens, he simply needs to click the button 'send' and fill in the appropriate address. When the client sends the Excel, the program will delete all the data in the Excel. This in case that the Excel won't be too big. With the program, Callens can choose 1 person who is responsible for the data, and so this person can manage the quality of the water at distance. If the client wants to share extra information, he can add this in the extra textbox which shall be included in the mail. With the program, problems with bad water quality will become a problem of the past because we can react quicker when we detect abnormal measurements. But it will still be the responsibility of the client to be honest with the measurements. But if there are any problems, Callens will not be responsible anymore because they offered the client a program to manage their water quality, which is also managed by a person in Callens. If the client cheats with the measurements, Callens can easily provide documents to discover it. Still we need to say this is a hypothetical program, which means that behind the screen's automation engineers are working to implement the program in the PLC. Because the PLC is always connected to Callens, the management is always guaranteed.

2.3.8 Wetgeving stoomketel

Alles wat een hogere druk heeft dan 0,5 bar(g) valt te beschrijven als een druklichaam. De wetgeving omtrent dergelijke druklichamen is sinds 1 januari 2008 beschreven in de Europese wetgeving. Alle te volgen richtlijnen staan vervolgens beschreven in de norm: NBN EN 12953. Meer specifiek in het geval van vlampijpketels kijken we voornamelijk naar deel 6 van de norm die de eisen voor uitrusting van de ketel voorlegt.

Volgende zaken moeten volgens de norm absoluut gehandhaafd worden:

- Waterniveaudetectie (minimum en maximumpeil)
- Druk en/of temperatuursensoren (maximale en minimale druk)
- Veiligheidskleppen
- Spuikleppen (bodem en oppervlaktespui)

Annex C van de Europese norm legt ons eveneens op dat de uitbater van de stookplaats alle regel en veiligheidstoestellen moet onderhouden en controleren volgens de door de norm opgestelde checklist. Deze checklist omvat alle acties die stelselmatig moeten worden doorlopen om een goed onderhoud te kunnen realiseren.

U kunt deze checklist terugvinden als bijlage A achteraan deze scriptie.

Het onderhoud van de stookplaats moet minstens om de 6 maanden worden uitgevoerd door een erkend expert alsook het controleren van de veiligheidsorganen die niet iedere 24/72 uur aan een controle moeten worden onderworpen.

De bewaking van de stookplaats moet door een bevoegd persoon worden uitgevoerd die vertrouwd is met de uitbatingsvoorwaarden van de installatie (opleiding door Callens).

Ook stelt de norm dat er tijdens het vullen of bij werken die de algemene werking van de ketel kunnen beïnvloeden, de stookruimte permanent moet worden bewaakt.

Elke 24/72 uur dient de ketelopzichter zich te vergewissen van de goede werking van de installatie. Hij moet de werking van alle veiligheids- en regeltoestellen voor druk, waterniveau en debiet controleren.

Verder geeft de norm als algemeen advies mee dat kleppen en afsluitvoorzieningen langzaam moeten worden geopend om waterslagen door plotselinge temperatuurverschillen te voorkomen.

2.4 Piping (P&ID)

De bepaling van de correcte leidingdiameter is van cruciaal belang als men geen grote lokale drukvallen wil verkrijgen. Voornamelijk de druk in de aanzuigzijde van de hydrofoorgroep is van primordiaal belang om cavitatie aan de pompen te vermijden. Daarnaast dient men ook rekening te houden met het economische aspect van de leidingdiameterbepaling.

Als men steeds te grote leidingen selecteert, dan zal achteraf de kostprijs aanzienlijk hoger zijn dan bij eenzelfde situatie waarbij de leidingen optimaal berekend zijn.

Om zowel op energetisch als economisch vlak een zo ideaal mogelijke leidingdiameter te gaan selecteren, zijn we genoodzaakt om een leidingdiameterberekening uit te voeren. Hierbij bekijken we welke maximale stroomsnelheid er mag worden aangehouden, welk medium er getransporteerd dient te worden en welke debieten van dat medium er doorheen stromen. Dergelijke gegevens zijn af te leiden uit het lastenboek van de installatie of kunnen via berekeningen worden bekomen.

2.4.1 Berekening

Eerste en vooral dient men over de algemene installatiegegevens te beschikken, namelijk: het gewenste stoomdebiet, de nominale stoomdruk, de spuverliezen en de maximaal toegelaten stroomsnelheid. Als deze basisgegevens gekend zijn, kan men beginnen met de berekening van de leidingdiameter per specifieke sectie.

Hier geven we de berekening weer voor het bepalen van de correcte diameter voor de leiding van de watervulling van een 7 ton huurketel met volgende gegevens:

toegelaten snelheid: 2 m/s

waterdebiet: 7700 kg/h

Temperatuur koud water: 12 °C

Eerst en vooral moeten we het debiet in m³/h kennen. Dit doen we a.d.h.v. het berekende watermassadebiet = 7000 kg/h (stoomdebiet) + 700 kg/h (spuverliezen ≈10%) en deze waarde te delen door de dichtheid van het water:

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} = \frac{7700 \frac{kg}{h}}{995,45 \frac{kg}{m^3}} = 7,74 \frac{m^3}{h}$$

Uit dit debiet kunnen we a.d.h.v. de opgegeven maximale snelheid, de oppervlakte van de leidingdoorsnede bepalen:

$$A = \frac{Q_v}{v} = \frac{7,74 \frac{m^3}{h}}{2 \frac{m}{s} \cdot 3600 s/h} = 0,0011 m^2$$

Deze berekende oppervlakte zetten we om naar een diameter in mm volgens volgende formule:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \cdot 1000 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0011 \text{ m}^2}{\pi}} \cdot 1000 = 36,91 \text{ mm}$$

Voor het aanduiden van gestandaardiseerde leidingen, zetten we bovenstaande waarde om naar de DN-standaard afmeting. Deze bedraagt voor deze berekende leiding: **DN 40**

Deze berekeningsmethode wordt toegepast op alle leidingen. Vervolgens bekomen we volgende berekende leidingdiameters:

Leidingonderdeel	Leidingdiameter
Suppletiewaterleiding	DN 40
Voedingswaterleiding zuigzijde	DN 80
Voedingswaterleiding perszijde	DN 40
Stoominjectieleiding watervoedingstank	DN 32
Stoomleiding	DN 125

In het geval van een huurketel worden de diameters vaak nog een sectie groter gekozen omdat de specifieke stoomvraag sterk afhankelijk is van de noden van de klant. Om zeker geen te grote leidingverliezen te verkrijgen worden daarom enkele diameters groter uitgevoerd. Het gaat hierbij meer specifiek om de stoomleiding en de suppletiewaterleiding. De reden waarom juist deze leidingen groter worden gedimensioneerd is te wijten aan het feit dat de klant suppletiewater (onthard water) kan aftappen om zelf in zijn productieproces te gaan gebruiken. Doordat er verschillende leidingen op de huurketel moeten kunnen gemonteerd worden, is ook de stoomuitlaat voorzien van een grotere diameter (DN 150). Men kan dan eenvoudigweg de ketel voor kleinere toepassingen aanpassen door de stoomuitlaat d.m.v. een verloopstuk te verkleinen. Als men de ketel op volledig vermogen wil instellen, treedt er dan alsnog een toelaatbaar drukverlies op.

2.4.2 Berekening koud waterleiding spuiwat

Het uitvoeren van de voorgaande leidingberekeningen was vrij eenvoudig, daar we het waterdebiet konden afleiden van de stoomproductie (totaal water = stoom + spui). In het geval van de koud waterleiding van de ontharder naar het spuiwat, is deze berekening een stuk complexer. Men moet hierbij namelijk niet alleen rekening houden met het debiet aan warm water dat uit de ketel in de spuitank wordt geloosd. Daarnaast moet er namelijk ook rekening gehouden worden met de hoeveelheid aan koud water dat nodig is om het spuiwater tot maximaal 60 °C af te koelen. Warm spuiwater is namelijk niet geschikt om rechtstreeks in de riolering te lozen. Ook zal een deel van het spuiwater omgevormd worden tot stoom door herverdamping (flashstoom). Dit komt omdat het spuiwater op hoge (ketel)druk ontspant in het spuiwat dat atmosferisch staat opgesteld.

Om alsnog het correcte waterdebiet te gaan bepalen gaan we eerst en vooral de waterhoeveelheid gaan berekenen door het bepalen van de hoeveelheid herverdampingsstoom. Daarnaast gaan we a.d.h.v. de mengverhoudingsformule gaan bepalen hoeveel water er juist nodig is om het spuiwater af te koelen tot 60 °C. Als al deze parameters bekend zijn kunnen we uiteindelijk het totale waterdebiet gaan bepalen.

Bepaling hoeveelheid herverdampingsstoom:

$$\% \text{ herverdampingsstoom} = \frac{h_{\text{hoge druk vl.}} - h_{\text{lage druk vl.}}}{h_{\text{totaal lage druk}}}$$

In ons geval bedraagt dit:

$$\% \text{ herverdampingsstoom} = \frac{941,53 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 417,50 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{2257,44 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,232 = 23,2\%$$

Van de hoeveelheid aan spuiwater zal er dus 23,2% herverdampen tot stoom. Op deze manier kunnen we dus nu gaan bepalen hoeveel heet water er nu effectief d.m.v. koud suppletiewater gekoeld moet worden. Aangezien de spuihoeveelheid 10% bedraagt op een ketel van 7 T/h, bedraagt het spuidebiet dus 700 kg/h. Het totale debiet aan vloeibaar spuiwater is bijgevolg:

$$Q_{\text{spui, vl.}} = 700 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot (1 - 0,232) = 537,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

We kennen nu het debiet aan vloeibaar spuiwater (aan 100°C) en aan welke temperatuur er geloosd moet worden (60°C). Bijgevolg kunnen we nu met de verhoudingsvergelijking het debiet aan koud water berekenen.

De verhoudingsvergelijking stelt het volgende:

$$60^{\circ}\text{C} \cdot \left(537,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + x\right) = \left(537,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 100^{\circ}\text{C}\right) - (x \cdot 12^{\circ}\text{C})$$

Hierbij is x het debiet aan koud suppletiewater dat in het spuiat toegevoerd moet worden om het vloeibare spuiwater tot 60°C af te koelen. Om nu x uit de vergelijking te halen zetten we deze om zodat:

$$x = \frac{\left(537,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 100^{\circ}\text{C}\right) - \left(537,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 60^{\circ}\text{C}\right)}{60^{\circ}\text{C} - 12^{\circ}\text{C}} = 447,92 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Bijgevolg bedraagt het debiet aan koud water dus **447,92 kg/h**

Om dit om te zetten naar m³/h maken we opnieuw gebruik van de densiteit van het water:

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} = \frac{447,92 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{999,45 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,45 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Vervolgens bepalen we hieruit opnieuw de oppervlakte van de leiding m.b.v. de maximaal toegelaten snelheid en zetten deze om naar een bruikbare diameter in mm:

$$A = \frac{Q_v}{v} = \frac{0,45 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} = 0,0000622 \text{ m}^2$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \cdot 1000 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0000622 \text{ m}^2}{\pi}} \cdot 1000 = 8,902 \text{ mm}$$

Als men vervolgens naar de diametertabel kijkt, kan men vaststellen dat voor de koud waterleiding naar de spuitank er een leiding nodig is met een inwendige diameter van 8,9 mm, wat overeen komt met DN 15 of een duimse maat van ½ “.

mm maat	DN-maat	" maat
16	15	1/2
21,6	20	3/4
27,2	25	1
35,9	32	1 1/4
41,8	40	1 1/2
53	50	2
70,3	65	2,5
82,5	80	3
107,1	100	4
131,7	125	5
159,3	150	6

2.4.3 Leidingberekening in Excel

Het handmatig berekenen van de meest geschikte leidingdiameter is een lang proces en bovendien kunnen er gemakkelijk fouten in de berekeningen optreden.

Om de bepaling van de correcte leidingdiameter te vereenvoudigen en te versnellen, maakten we een Excel-werkblad op waarin we a.d.h.v. het invoeren van verschillende parameters en gegevens, eenvoudig en snel de leidingdiameter kunnen achterhalen.

Dit is voornamelijk zeer interessant voor de concept-afdeling waar er vaak snel een concept tot een project moet worden uitgewerkt.

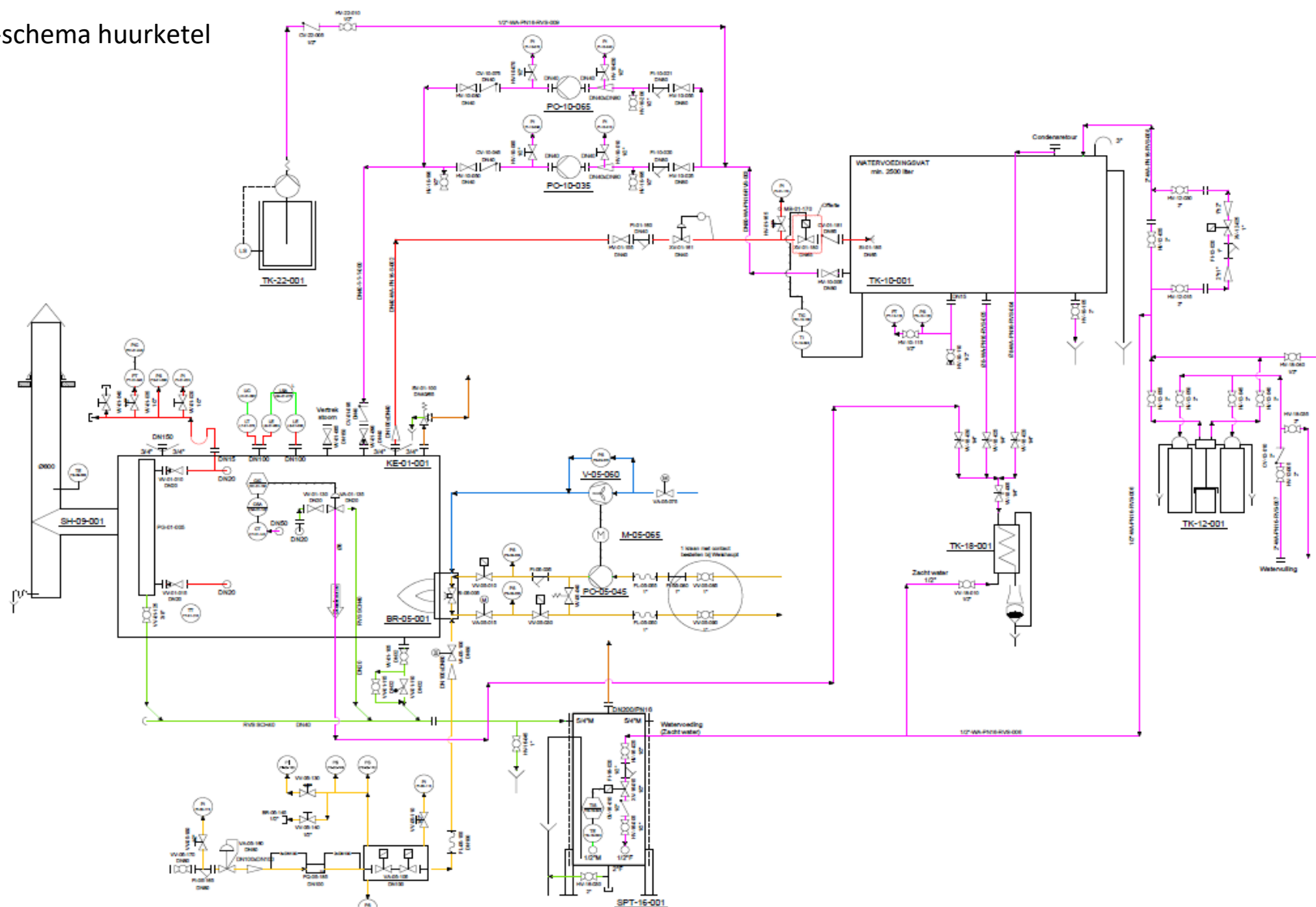
Eerst en vooral moeten er enkele algemene gegevens worden ingevoerd. De stoomproductie van de ketel (kg/h) staat garant voor het debiet aan ketelvoedingswater en spuidebiet. De maximale drukken worden in de berekeningen toegepast om de enthalpie (kJ/kg) van het water en de stoom te kunnen bepalen (Steamtab). Als laatste gegeven moet de maximaal toegelaten stoomsnelheid worden opgegeven. Deze factor beïnvloedt in grote mate de te selecteren leidingdiameter. Enerzijds zorgt een verhoging van de toegelaten stoomsnelheid voor een kleinere diameter, maar anderzijds leidt dit tot grotere snelheden in de leidingen met corrosie, slijtage en geluidshinder als gevolg.

Als deze gegevens bekend zijn, kunnen we per leidingsectie van de P&ID de diameter gaan bepalen. Concreet kijken we naar het debiet aan water of stoom dat doorheen de leiding moet worden getransporteerd. Als dit gekend is kunnen we a.d.h.v. de eerder opgegeven stroomsnelheid, de oppervlakte gaan bepalen. Uit deze oppervlakte wordt nadien de diameter bepaald a.d.h.v. de eerder opgestelde formules.

Leidingberekening	
<u>Algemene gegevens</u>	
	Berekend
stoomproductie (kg/h)	7000
werkdruk (bar)	23
zegeldruk (bar)	24
spuiverliezen (%)	10
Stoomsnelheid (m/s)	15
<u>Watervulling</u>	
Toegelaten snelheid (m/s)	2
Debiet (kg/h)	7700
Debiet (m ³ /h)	7.70
Temperatuur water (°C)	12
Dichtheid (kg/m ³)	999.45
Oppervlakte (m ²)	0.0011
Diameter (m)	0.0369
Diameter (mm)	36.91
Diameter (")	1 1/2
DN	40

<u>Vertrek stoom</u>	
Toegelaten snelheid (m/s)	15
Debiet (kg/h)	7000
Debiet (m ³ /h)	634.89
Temperatuur water (°C)	217.2488
Dichtheid (kg/m ³)	11.03
Oppervlakte (m ²)	0.0118
Diameter (m)	0.1224
Diameter (mm)	122.35
Diameter (")	5
DN	125

2.4.1 P&ID-schema huurketel

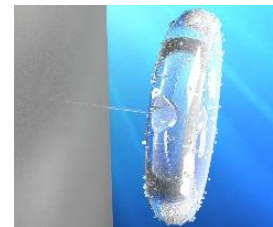


Figuur 31: P&ID huurketels

2.5 Permanente pompcavitatiebewaking

Pompcavitatie is een veelvoorkomend probleem bij Callens. Daar we vaak water moeten verpompen met temperaturen op en rond het kookpunt, is de kans heel reëel dat deze lokaal begint op te koken doordat deze de verzadigingstemperatuur overschrijdt. Het probleem komt sporadisch voor aan de aanzuigzijde van de hydrofoorgroep, waar er door de zuigwerking van de pompen een lokale drukdaling gerealiseerd wordt. Hierdoor daalt de verzadigingstemperatuur van het fluïdum, waardoor het opkookproces versneld wordt.

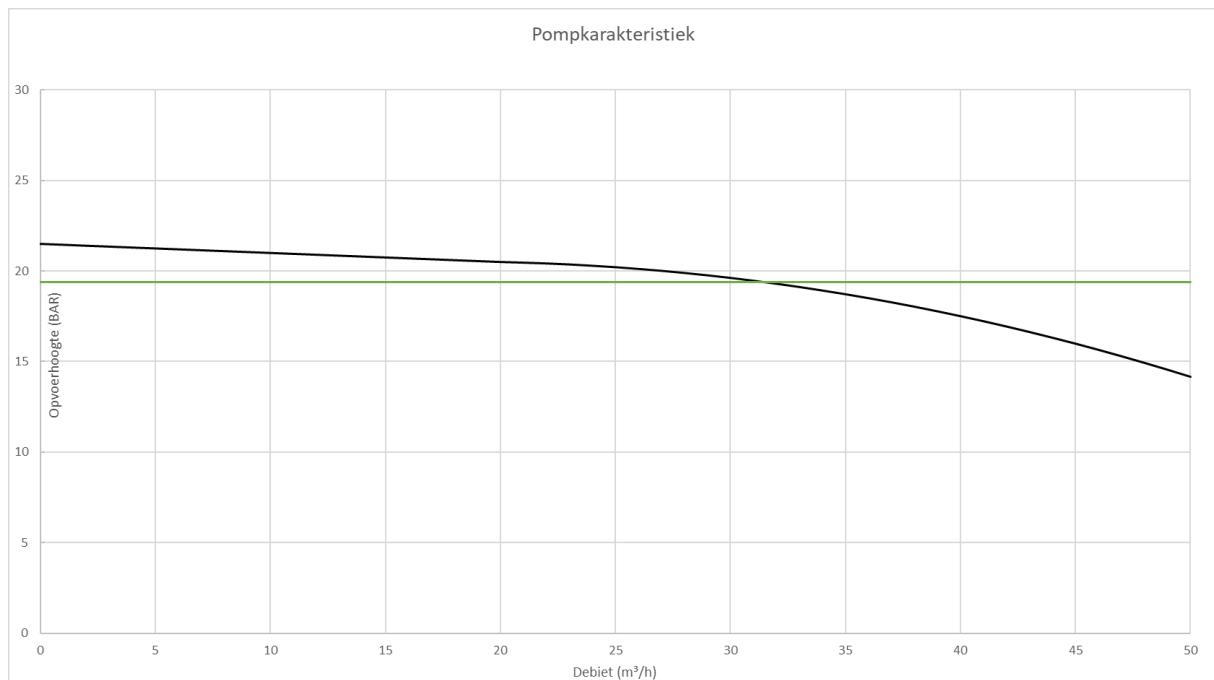
Als de temperatuur van het fluïdum boven de verzadigingstemperatuur komt te liggen door de lokale drukval aan de aanzuigzijde van de pomp, dan zullen er zich stoombellen vormen in de leiding. Deze stoombellen worden verder aangezogen in het pomphuis en komen in de waaier van de pomp terecht. Het fluïdum en de stoombellen worden verhoogd in druk door de inwerkende centrifugaalkracht van de pompwaaier. Onder de invloed van deze verhoogde druk willen de stoombellen zo snel mogelijk terug condenseren tot vloeistof. Dit gaat uiterst snel waardoor de omvorming gepaard gaat met krachtige implosies van de stoombellen. Hierbij ontstaan door het uit elkaar gaan van de bel krachtige stralen (microjets) die inwerken op de leidingwand en de waaier. Deze krachtige stralen hebben een destructief effect op het materiaal en leiden vervolgens tot schade met het typische karakter van dat van putcorrosie.



Figuur 31: Vorming van microjets t.g.v. belimplosie

In het geval van de huurketels, hebben we te maken met sterk verschillende situaties. De ene keer bedraagt de gewenste stoomdruk 8 bar(g), de andere keer kan deze oplopen tot 20 bar(g). Deze grote drukrange zorgt ervoor dat de hydrofoorgroep constant nauwlettend moet worden aangestuurd. Dit wordt praktisch gerealiseerd door gebruik te maken van frequentie gestuurde pompen en het plaatsen van een secundaire smoorklep in de perszijde van de hydrofoorgroep. Deze maatregelen moeten ervoor zorgen dat de pompen steeds in hun ideale werkgebied draaien (zie: cavitatieprogramma voortraject).

Daarnaast zullen we a.d.h.v. de NPSH-waarden en de temperatuur van het fluïdum gaan kijken of er dan wel of niet cavitatie wordt gevormd. Het is dan ook de bedoeling dat deze logging in de PLC van de huurketel wordt geïntegreerd. Hierdoor worden de pompen constant opgevolgd en kunnen ze mogelijks stilgelegd worden als de werkingstijd buiten het werkgebied van de pomp te groot wordt. Deze maatregelen moeten ervoor zorgen dat het cavitatieprobleem bij de voedingswaterpompen vermeden wordt. Eerder cavitatie onderzoek gedurende ons voortraject heeft namelijk al aangetoond wat de mogelijke gevolgen van pompcavitatie kunnen zijn. Hiervoor hebben we een Excel-programma opgesteld die de pompprestatie analyseert i.f.v. de pompcurve. Voor verdere details hierover verwijzen we je graag naar het verslag van ons voortraject “*Casestudies stoomtechnologie*”.



Figuur 32: Pompcurve in Excel-programma

2.5.1 Methode volgens NPSH-bewaking

De meest logische manier om cavitatie aan te tonen of te controleren is door te gaan kijken naar de opgegeven NPSH-waarde van de pomp i.f.v. van de frequentie. De NPSH-waarde toont namelijk aan hoeveel extra voordruk er aan de zuigzijde van de pomp aanwezig moet zijn om cavitatievorming te voorkomen. Dit is gerekend boven op de verzadigde dampspanning van de vloeistof (in functie van de temperatuur). De minimum aanvaarde zuigdruk aan de pomp wordt dan als volgt beschreven:

$$p_{v,min} = p_{verzadigd} + NPSH$$

We bekijken hierbij de verhouding tussen de factoren die resulteren in een drukwinst en de factoren die lijden tot een drukverlies. Daarnaast berekenen we het overschot of het tekort aan hoogte waterkolom. Als deze kleiner is dan nul, dan kunnen we stellen dat er zich cavitatie kan voordoen. Als deze waarde hoger ligt dan nul, dan kunnen we concluderen dat de voordruk voldoende groot is en de kans op cavitatie klein tot onbestaande zal zijn.

Om deze berekening eenvoudigweg en snel te kunnen uitvoeren, maakten we een Excel-berekeningsblad op. We noteren alle beschikbare gegevens en vullen deze in de oranje vakjes in. Omdat de NPSH-waarde uitgedrukt wordt in opvoerhoogte (m), moeten we alle gegevens ingevoerd in de eenheid bar(g), omzetten naar de respectievelijke hoogte. Dit kan worden gerealiseerd door volgende vergelijking:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

Hierbij is:

p: de druk in Pa

g: de valversnelling (9,81 m/s²)

h: opvoerhoogte in m

ρ : massadichtheid ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)

Vervolgens worden alle drukwinsten met elkaar opgeteld tot de bruto voordruk en uiteindelijk verminderd door de verzadigde dampdruk en de NPSH-waarde in meter.

$$\Delta h = h_{\text{voor}} - h_{\text{verlies}} - h_{\text{dampspanning}} - \text{NPSH} - \text{veiligheidsmarge}$$

De uiteindelijke waarde resulteert in een hoogteverschil die ons aantoont of er al dan niet voldoende voordruk aanwezig is. Als dit hoogteverschil positief is, kan men stellen dat er geen cavitatie zal optreden, omdat er dan voldoende voordruk aanwezig is.

Als het hoogteverschil echter negatief is, dan kan men stellen dat er te weinig voordruk aan de zuigkant aanwezig is en de kans op cavitatie vorming zeer reëel is.

Als deze waarde te lang negatief blijft, zal de PLC ervoor moeten zorgen dat de pompen uitgeschakeld worden. Op deze manier wil men cavitatie schade aan de pompen ten allen tijden vermijden.

Permanente pompbewaking huurketels volgens NPSH			
hoogteverschil	2,5	m	
frequentie	45	Hz	
druk condensaat tank	1	bar(g)	
NPSH	1,2	m	
drukverliezen leidingen	50	mbar	
watertemperatuur	90,00	°C	
veiligheidsmarge	0,1	m	
bruto voordruk	13,06	m	
drukverlies leiding	0,53	m	
dampspanning	0,70	bar(a)	
dampspanning	7,4	m	
Resultaat:	3,82	m	
	0,36	bar(g)	

Figuur 33: Permanente pompbewaking NPSH

In bovenstaande tabel wordt de berekeningswijze voorgesteld zoals deze is opgemaakt in het Excel berekeningsblad. De gegevens worden in de oranje vakjes ingegeven, worden desnoods omgezet van bar(g) naar opvoerhoogte (m), en daarna toegepast in de hoofdformule waarbij het hoogteverschil Δh wordt bepaald. Als deze positief is, en er dus geen cavitatie gevormd wordt, zal het resultaat vakje groen kleuren. Is het resultaat echter negatief, dan zal het vakje rood kleuren en kunnen de pompen caviteren.

Dit programma zal later in de PLC worden geprogrammeerd en zal daarbij de gegevens constant opvolgen. Deze zullen ook op afstand op te volgen zijn waardoor Callens sneller kan ingrijpen bij acute probleemsituaties. Daarnaast zullen de techniekers eveneens de gegevens kunnen opvragen van de hydrofoorgroep, waardoor er een trending van de gegevens kan worden opgesteld en waarbij er gemakkelijker en gericht een oplossing gevonden kan worden om het cavitatieprobleem op te lossen.

2.5.2 Methode volgens verzadigingstemperatuur

Een tweede methode om de hydrofoorgroep te loggen op cavitatie verschijnselen bestaat er in om te kijken naar de temperatuur van het fluïdum aan de aanzuigzijde van de pompen. Deze temperatuur wordt vervolgens vergeleken met de verzadigingstemperatuur die overeenkomt met de actuele zuigdruk. Als de gemeten temperatuur gelijk is aan of groter is dan de verzadigingstemperatuur, kan men stellen dat er stoombellen gevormd zullen worden en er dus cavitatie verschijnselen kunnen optreden.

In onderstaande tabel wordt de druk en de temperatuur van het fluïdum aan de zuigzijde van de pomp ingegeven. Vervolgens wordt het temperatuurverschil bepaald en uitgedrukt als een bepaalde ΔT . Als deze waarde positief is, dan zal het vakje groen kleuren en zal er geen cavitatie optreden. In het geval dat men een negatief resultaat bekomt, zal het vakje rood kleuren en zal er cavitatie optreden. Deze methode is eenvoudig, maar om deze concreet in de PLC te kunnen programmeren moet men beschikken over de damp tabellen bij de respectievelijke gemeten drukken. Enkel op deze manier kan de verzadigde temperatuur van het fluïdum bepaald worden en vervolgens vergeleken worden met de actuele temperatuur van de vloeistofstroom.

pompbewaking volgens verzadigingstemperatuur		
Aanzuidruk hydrofoorgroep	1	bar(g)
Verzadigingstemperatuur	120.21	°C
Temperatuur zuigzijde	90	°C
ΔT	30.21	
Cavitatievorming:	Geen cavitatievorming	

Figuur 34: Cavitatiebewaking volgens opvolging verzadigingstemperatuur

2.5.3 Pumpmeter - KSB

Het praktisch realiseren van voorgaande berekeningen van de cavitatievorming zal via programmatie in de PLC moeten worden volstrekt. Dit houdt in dat de Automation engineer de formules zal moeten overnemen en programmeren in de PLC. Daarnaast zullen eveneens de correcte sensoren moeten worden aangesloten, gelabeld en benoemd worden.

Het blijft echter het meest betrouwbaar om via de pompcurve het correct draaien van de pompen vast te stellen en zo het cavitatie aan te tonen. Hiervoor moeten echter wel de correcte pompcurves gekend zijn per pomptype en frequentie. Dit hebben we eerder praktisch gerealiseerd tijdens ons voortraject (zie: Permanente cavitatielogging).

Het is echter in de praktijk moeilijk om per project de individuele gegevens van de pomp(en) te bepalen.

Voor dit probleem heeft KSB, de pompleverancier, een device ontwikkeld die a.d.h.v. de voor en de persdruk kan bepalen wat het werkingpunt is op de bijhorende pompcurve. Deze wordt geclassificeerd als: 'de pumpmeter'. Aan de hand van het werkingpunt kan de pumpmeter gaan bepalen of de pomp in zijn curve draait of niet. De gegevens van de pomp (pompcurve, nominale waarden...) zijn al per pomptype in de pump meter gedefinieerd. Voor Callens zou het dus het interessant zijn om deze pumpmeter later als standaard met de pomp te laten meeleveren. Op deze manier kan men steeds het actuele werkingsgebied gaan bepalen en alsook deze gegevens loggen en opslaan.

Vooraleer de pumpmeter effectief zal worden geïntroduceerd, zal deze uitvoerig eerst door Callens worden getest. Gedurende deze praktische test zal er op de voedingswaterpompen van Ecofrost een pumpmeter geplaatst worden. Er zal dan gekeken worden tot in hoe verre de connectie en de communicatie zal en kan verlopen tussen de pumpmeter en de PLC. Het zal namelijk de bedoeling zijn om de pumpmeter te gaan gebruiken om het werkingsgebied te gaan bepalen en dan a.d.h.v. die gegevens te gaan besluiten of de pompen cavitatie. Als dit het geval zou zijn, dan zal de PLC de pompen moeten stilleggen om verdere schade te kunnen vermijden. Er dient dus een vlotte communicatie te zijn tussen de pumpmeter en de PLC.



Figuur 35: Pumpmeter KSB



Figuur 36: Pumpmeter met frequentiesturing op pomp

2.5.4 Pompschade Ecofrost

In dit deel van ons eindwerk hadden we graag nog even stil gestaan bij de pompproblematiek bij Ecofrost. In dit geval hebben we te maken met pompcavities ten gevolge van een te lage aanzuigdruk. Voornamelijk bij opstart van de diverse toepassingen komt dit probleem voor. Uit nader onderzoek is uiteindelijk gebleken dat de oorzaak van deze verlaagde zuigdruk te wijten is aan een te grote afname aan herverdampingsstoom uit de condensaat tank d.m.v. de thermocompressor. Meer details over dit onderzoek kunt u terugvinden in ons stageverslag en het rapport over de revisie van de pompen. Het rapport over de revisie is in bijlage achteraan toegevoegd.

Uiteindelijk is het de bedoeling om a.d.h.v. de pumpmeter van KSB ons eigen cavitiesprogramma uit te testen. Het zou namelijk interessant zijn om deze vervolgens op elke huurketel te installeren en zo het werkingsgebied van de hydrofoorgroep te controleren en te bewaken. Verdere testen en onderzoek zal echter moeten uitwijzen of ons programma correct functioneert.

Bij de grotere projecten zal er in het vervolg standaard gebruik worden gemaakt van een permanente cavitatiecontrole (hetzij ons eigen programma of de pumpmeter), om dergelijke cavitatieproblemen te vermijden.

2.6 Logboek opvolging

De opvolging realiseren van het volledige huurketelpark zou een immense opdracht zijn en is voor dit eindwerk minder relevant. In plaats daarvan zullen we 1 concrete huurketel van A tot Z opvolgen. Het gaat hem onder meer over de 7 ton huurketel die operationeel dient te zijn tegen eind mei. Daarnaast zullen we weliswaar enkele technologieën en systemen bespreken van de overige huurketels, maar hierbij zullen we minder in detail gaan treden. We zullen a.d.h.v. een logboek de veranderingen en de transitie aan de huurketels opvolgen. Concreet lichten we enkele concrete zaken toe, leggen de bijkomende wijzigingen uit en tonen d.m.v. een fotografisch dossier aan hoe de transitie van de huurketel verloopt. Op dergelijk manier kunnen we een globaal beeld schetsen van hoe een huurketel wordt opgesteld en wat daarbij de opmerkelijke verschillen zijn met een standaard vaste stoominstallatie.

2.6.1 Start van de werken

In de loop van de eerste week na de start van de werken aan de 7 T huurketel, werd er voornamelijk gewerkt aan het voorbereiden van de containers waarin alle onderdelen van de watervoedingsinstallatie worden geïnstalleerd (watervoedingspompen, ontharder, voedingstank...). Daarnaast werd de ketel al op de oplegger gemonteerd en de brander op de ketel geschroefd.



Figuur 37: Containers 7 ton huurketel



Figuur 38: pompgroep



Figuur 39: 7 ton huurketel op trailer



Figuur 40: Monobloc brander

2.6.2 Voorbereiding en aansluiting appendages

Nadat de ketel effectief op de trailer volledig is gemonteerd, werd er gestart met de voorbereidende werken voor het plaatsten van het leidingwerk en de appendages. Hierbij werd de gasstraat geplaatst en werden de eerste elektrische kabels getrokken. Ook werd de eerste (zwarte) container aan de voorzijde van de trailer gemonteerd. Deze container zal dienen als opslagfunctie en zal dus alle verwisselbare onderdelen bevatten die apart op de ketel zullen moeten worden gemonteerd, afhankelijk van welke toepassing de klant vraagt.



Figuur 41: Standardkessel op trailer



Figuur 42: Pompgroep beschermd tegen las

2.6.3 Montage op trailer

Nadat de ketel volledig werd gemonteerd op de trailer en de gasstraat werd aangelegd, is de container die de waterontharding en de voedingswaterpompen huisvest, eveneens aan de voorkant van de ketel (branderzijde) gemonteerd. Deze container zorgt voor de toevoer van onthard en behandeld suppletiewater, huisvest de watervoedingstank en biedt onderdak aan de watervoedingpompen. Deze container is opgedeeld in twee segmenten die via een permanente opening toegankelijk zijn. In het ene segment bevindt zich het waterzijdig gedeelte, het andere segment doet dienst als overkapping en bescherming van de brander tegen weersinvloeden van buitenaf. Deze container is zodanig gedimensioneerd zodat de brander volledig kan worden opengedraaid om het onderhoud te kunnen uitvoeren. Daarnaast beschikt de container over tal van openingen om de ruimte d.m.v. natuurlijk licht te verlichten. Verder zijn er ook permanente roosters voorzien die de luchttoevoer naar de brander realiseren.



Figuur 43: Duplex waterontharder



Figuur 44: Monobloc brander



Figuur 45: Pompgroep

2.6.4 Eindafwerking en in dienststelling

De laatste fase in het bouwproces van de huurketels bestaat uit het monteren van de laatste appendages, het kalibreren van de elektrische kasten en de aansluitingen van de leidingen. Nadien is de ketel klaar voor gebruik en kan deze aan de in eerste indiensttredingstesten onderworpen worden. Onder deze testen verstaat men het correct afregelen van de brander, het invoeren van de verschillende parameters en het uiteindelijke proefstoken van de ketel. Tijdens het proefstoken wordt de ketel opgestookt tot aan zijn maximale werkdruk. Hierbij wordt uitvoerig de correcte werking van de veiligheidskleppen en de andere veiligheden getest en beoordeeld. Hiervoor wordt uitzonderlijk de digitale veiligheden (druk pressostaten, niveaumeting...) elektrisch overbrugd waardoor deze continue een veilig signaal uitsturen. De ketel wordt volledig opgestookt en bij de maximale werkdruk wordt er gecontroleerd of dat de veiligheidskleppen voldoende open gaan en op een veilige manier de stoom afblazen.



Figuur 47: Oppervlaktespui met veiligheden



Figuur 46: Schouw ketel



Figuur 49: Automatische bodemspui



Figuur 48: Elektrische schakelkast

3 Duurzaamheid in de stoomtechnologie

3.1 Inleiding

In het kader van de steeds strengere uitstootnormen die bedrijven opgelegd krijgen door de overheid, is de zoektocht naar het recupereren van restwarmte in de stoomtechnologie steeds belangrijker geworden. Bedrijven worden nu geëvalueerd op hun energieverbruik en worden al dan niet beloond met premies en belastingverminderingen voor het investeren in duurzame energiemaatregelen. Onder begeleiding van Ivan Saelens (technisch directeur) voeren we daarom een energiebalans uit op de stookplaats van Masureel.

In dit hoofdstuk bekijken we welke maatregelen een bedrijf kan nemen om het energieverbruik van zijn stoominstallatie te laten dalen. Waar vroeger de rookgassen de schouw verlieten aan een temperatuur van 250°C, verlaten ze nu de schouw aan een temperatuur tot zelfs onder de 100°C. Deze warmte wordt nu dus nuttig hergebruikt, maar deze forse daling van onze rookgastemperatuur brengt ook enkele aandachtspunten met zich mee, zoals het vormen van condens in de schouw. Termen zoals economiser en rookgascondensor worden op de dag van vandaag meer en meer gebruikt als code van goede praktijk.

Een stijgend belang aan een correcte behandeling van de waterkwaliteit zorgt er ook voor dat de spui verliezen verwaarloosbaar klein worden. Waar er vroeger grofweg 10 procent werd gerekend voor de spui verliezen, proberen we deze nu zo dicht mogelijk bij 0 procent te krijgen. Vaak wordt ook de warmte van het spuiwater gerecupereerd om het voedingswater terug op te warmen.

Om te voldoen aan de huidige energienormen bestuderen we in dit hoofdstuk welke maatregelen kunnen genomen worden, en wat hun invloed op het proces zal zijn.

3.2 Onderdelen van het stoomketelhuis geschikt voor warmterecuperatie

3.2.1 Spuivat

Het spuiwater wordt vaak eerst omgeleid naar een spuivat, waar het gemengd wordt met koud suppletiewater om de temperatuur van het afvalwater onder de 70°C te brengen.

Water warmer dan 70°C is namelijk niet geschikt om via de riolering af te voeren, en moet bijgevolg eerst gekoeld worden vooraleer deze kan worden afgevoerd. Het ketelwater dat via de spui de ketel verlaat, bevindt zich op een druk die overeenstemt met de druk in de stoomketel. Afhankelijk van de toepassing, kan deze zelfs tot 22 bar(g) bedragen.

Het spuivat staat daarentegen op atmosferische druk, wat 1,013 bar(a) bedraagt. Door deze drukdaling zal het warme ketelwater spontaan beginnen koken, omdat het zich boven de verzadigde dampspanning bevindt bijhorend bij deze atmosferische druk.

Deze 'hververdampingsstoom' kan worden aangezogen en wordt gebruikt in processen waar lagedruk stoom toegepast kan worden. Met behulp van deze eenvoudige maatregel, kan er al heel wat energie bespaard worden. Met een simpel praktijkvoorbeeld berekenen we nu hoeveel hververdampingsstoom er geproduceerd wordt. We veronderstellen een stoomketel werkend op een druk van 18 bar(g). Het spuiwater wordt afgevoerd naar het spuivat op 1,013 bar(a). Met behulp van volgende formule kan het percentage hververdampingsstoom berekend worden:

$$\% \text{ hververdampingsstoom} = \frac{\text{Vloeistofwarmte HD (stoomketel)} - \text{Vloeistofwarmte LD (spuivat)}}{\text{Latente verdampingswarmte LD (spuivat)}}$$

Op ons voorbeeld toegepast wordt dit:

$$\% \text{ hververdampingsstoom} = \frac{908,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 505,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{2201,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \cdot 100 = 18,32\%$$

Als we de hververdampingsstoom niet gebruiken, dan verliezen we al 18,32 % aan energie afkomstig van het spuiwater. Als we de hververdampingsstoom echter kunnen hergebruiken, dan recupereren we al 18,32 % van de totale energie van het spuiwater.

De gevormde vloeistof wordt echter nog altijd geloosd via de riolering. Even toegepast op ons praktijkvoorbeeld van daarnet, kunnen we uit de stoomtabel aflezen dat op een keteldruk van 18 bar(g) het water in de ketel een temperatuur heeft van 212,5°C.

Dit water moet afgekoeld worden tot 70°C. Door de drukdaling naar atmosferische druk, wordt de vloeistof uitgekookt tot het water een temperatuur bereikt van 100 °C.

Dit water wordt nu gekoeld met vers suppletiewater van 12°C. Door het berekenen van het mengpunt kunnen we nu de hoeveelheid vers suppletiewater bepalen.

Rekenen we nu voor de eenvoud met een ketel die 7 ton/h stoom produceert, dan is het waterdebiet naar de ketel ook ongeveer gelijk aan 7000 kg/h zonder rekening te houden met de densiteit.

Nemen we nu het praktijkvoorbeeld van zonet even terug, werkend op een druk van 18 bar(g) met een temperatuur van 212,5°C, dan bedraagt de vloeistofwarmte 896,71 kJ/kg. Voor een stoomdebiet van 7 ton/h bedraagt het gasdebiet 385 m³/h. Dit gasdebiet kan berekend worden met volgende tool in Excel die we ontwikkelden tijdens ons voortraject:

Massastoomdebiet a.d.h.v. het aardgasverbruik			
gasdebiet (m³/h)	gasdruk (mbar)	Maximum stoomdebiet (kg/h)	Keteldruk (barg)
385,0181558	450	0	9
Temperatuur voedingswater (°C)	Verbrandingsrendement (%)	H-gas of L-gas	Calorisch waarde (kWh/mn³)
70	90,15	H-gas	10,34
Normaal debiet (mn³/h)	Totale warmte-inhoud theoretisch (kJ/kg)	Totale warmte-inhoud effectief (kJ/kg)	Stoomdebiet (kg/h)
518,12	2 777,11	2 483,81	7 000,00

Figuur 50: Gasdebiet voor 7 ton/h stoomproductie

Met het gasdebiet kunnen we het bruto toegevoerd vermogen aan aardgas berekenen. Hiervoor zetten we het gasdebiet om naar normaal debiet. Dit normaal debiet vermenigvuldigen we dan met de onderste verbrandingswaarde van aardgas. Ingevuld krijgen we dan:

$$\text{Bruto kWh} = 385 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{0,45 \text{ bar} + 1,013 \text{ bar}}{1,013 \text{ bar}} \cdot \frac{273,15 \text{ K}}{273,15 \text{ K} + 20 \text{ K}} \cdot 0,903 \cdot 11,52 \text{ kWh/m}^3 = 5389,48 \text{ kWh}$$

De waarde 0,903 dient om de bovenste verbrandingswaarde van aardgas om te zetten naar de onderste verbrandingswaarde.

Om de spui verliezen te berekenen, gebruiken we volgende formule:

$$\text{Spui verliezen (kg/h)} = \frac{\text{geleidbaarheid watervoedingstank}}{\text{geleidbaarheid ketelwater} - \text{geleidbaarheid watervoedingstank}} \cdot \text{stoomdebiet}$$

$$\text{Spui verliezen (kg/h)} = \frac{100 \mu\text{S}}{5000 \mu\text{S} - 100 \mu\text{S}} \cdot 7000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 142,86 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Het spuidebiet bedraagt dus 142,86 kg/h. Hiervan ontstaat er nog eens 18,32% aan herverdampingsstoom. Als we nu het mengpunt berekenen om het spuiwater af te koelen krijgen we volgend resultaat:

$$\left(x \frac{kg}{h} + (142,86 \cdot 0,8168) \frac{kg}{h}\right) \cdot 70^{\circ}C = x \frac{kg}{h} \cdot 12^{\circ}C + (142,86 \cdot 0,8168) \frac{kg}{h} \cdot 100^{\circ}C$$

Het oplossen van de vergelijking geeft ons dan aan dat $x = 60,36 \text{ kg/h}$.

We verliezen dit vers water dus zonder dat het nuttig gebruikt wordt. De energie die van het spuiwater wordt afgegeven aan het verse suppletiewater kan berekend worden met volgende formule:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Toegepast op onze praktijk toepassing wordt ons suppletiewater afgekoeld van $100^{\circ}C$ tot een temperatuur van $70^{\circ}C$, we verkrijgen dus volgende gegevens:

$$Q = (142,86 \cdot 0,8168) \frac{kg}{h} \cdot 4,19 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 30 K = \frac{14667,69 \frac{kJ}{h}}{3600 \frac{s}{h}} = 4,07 \text{ kWh}$$

Dit is dus 4,07 kWh energie die we verliezen door het afkoelen van het spuiwater naar $70^{\circ}C$. We kunnen deze energie echter wel hergebruiken als we het suppletiewater niet gaan mengen met het spuiwater, maar het spuiwater door een warmtewisselaar sturen zodat ons voedingswater al voorverwarmd wordt. Met behulp van de warmtewisselaar moeten we het spuiwater $30^{\circ}C$ laten afkoelen, de grootte van de warmtewisselaar kan dan eenvoudig worden berekend met volgende formule:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

De waarde U is een constante die eigen is aan het gebruikte materiaal, nemen we een warmtewisselaar in RVS, dan bedraagt de U -waarde voor RVS (316) $1124 \text{ W/m}^2\text{K}$. Als we de formule omvormen, kunnen we de oppervlakte van de warmtewisselaar berekenen:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T} = \frac{4,07 \text{ kW}}{1124 \frac{W}{m^2 K} \cdot 30 K} = 0,12 \text{ m}^2$$

In de realiteit is het bepalen van het oppervlak van een warmtewisselaar wat ingewikkelder, omdat men ook rekening dient te houden met de snelheden van het medium. Hoe hoger de snelheid is, hoe turbulenter de stroming. Door de turbulente stroming is er meer contact met de wand waardoor de warmteoverdracht vergroot.

In de praktijk wordt ook niet met een warmtewisselaar gewerkt, maar wordt er een serpentin voorzien in het spuivat waarmee het verse suppletiewater wordt opgewarmd. De serpentin neemt dan de taak als warmtewisselaar op.

3.2.2 De ketelopbouw

Bij de ketelopbouw zelf kunnen we enkele maatregelen treffen om het energieverbruik te doen dalen. De eerste logische maatregel is het plaatsen van voldoende isolatie. Zo worden de stralingsverliezen van de stoomketel beperkt. Het isoleren van de stoomleidingen zorgt ook voor minder condensatieverliezen. De opbouw van de ketel kan er ook voor zorgen dat de rendementen van de stoomketel aanzienlijk verhogen. De vlambuis kan geribd uitgevoerd worden zodat het contactoppervlak vergroot, en het warmte-afgevend vermogen groter wordt.

3.2.3 Economiser

Met behulp van een economiser kunnen de rookgassen afgekoeld worden en wordt hiermee het ketelvoedingswater opgewarmd. Het voordeel van een hogere ketelvoedingstemperatuur is dat de brander minder energie moet toevoeren om het water op te warmen en stoom te vormen. Een ander voordeel van een hogere ketelvoedingswatertemperatuur is dat de stoomproductie minder abrupt afgebroken wordt. De gevormde stoom in de ketel vormt als het ware een stoomkussen bovenop het waterniveau in de ketel. Wanneer er nu koud water wordt toegevoegd boven het waterniveau, klapt dit stoomkussen als het ware in elkaar waardoor tijdelijk de stoomproductie stopt. Op dit moment is er kans om water aan te zuigen, waardoor we de typische waterslagen krijgen. Wanneer we het verse water in het waterniveau toedienen, krijgen we een heel groot uitstroomverlies. Het water botst als het ware tegen een muur van stilstaand water. We stromen uit in een vat op druk, vandaar de term uitstroomverlies. Ook oefent de statische hoogte van het waterniveau een extra tegendruk uit. Daarom zijn we dus genoodzaakt om het water toe te voeren boven het waterniveau. Door middel van de economiser worden de rookgassen ook afgekoeld.

Normaal bestaat een economiser uit een pijpenbundel waardoor het water stroomt, en worden de rookgassen rond de pijpen geleid. De economiser wordt ook in tegenstroom geschakeld met de rookgassen, het koude suppletiewater stroomt dus bovenaan in de economiser en stroomt er onderaan uit. Bovenaan de economiser zijn de rookgassen verder afgekoeld waardoor het temperatuurverschil tussen het suppletiewater en de rookgassen kleiner is, waardoor de energieoverdracht kleiner wordt en het warmte overdragend oppervlak kleiner wordt. Het temperatuurverschil over een economiser kan bepaald worden met volgende formule:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln\left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}\right)}$$

Met behulp van volgende formule kan men het vermogen van de energie-overdracht berekenen:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

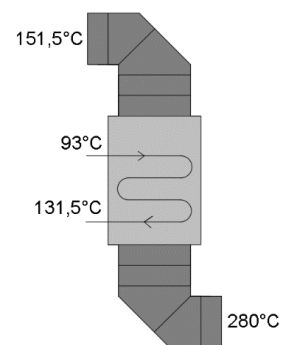
Vaak gebruikt men nu ook vin-constructies in de plaats van pijpenbundels afhankelijk van de aard van de rookgassen. De rookgassen bij de verbranding van aardgas zijn schoon en bevatten geen vervuilingen zodat er geen blokkeringen tussen de vinnen kunnen ontstaan. Bij de verbranding van stookolie zijn de rookgassen minder schoon en kunnen er verstoppingen ontstaan door aanwezigheid van roet of andere vervuilingen. Meestal bestaan deze vinnen uit aluminium, gewalst in stalen pijpen. Het grote nadeel is dat als er condens gevormd wordt, het aluminium corrodeert door het zuur in het condensaat. Daarom wordt er vaak gekozen voor stalen pijpen. Deze vinnen staan dicht bij elkaar, behalve bij stookolie waar ze verder uit elkaar staan voor eventuele vervuilingen. Bij erg vervuilde gassen gaan we toch weer over naar gladde pijpen.

Een belangrijk aandachtspunt is dat er continu stroming door de economiser moet zijn, opdat er geen stoom kan gevormd worden in de economiser. Als er stoom wordt gevormd in de economiser, neemt dit een groter volume in dan water, waardoor de economiser minder wordt benut. De rookgassen worden minder gekoeld waardoor door de hoge temperatuur de economiser kan scheuren.

Een tweede aandachtspunt is dat de brander sturing gemoduleerd is en geen aan/uit sturing. De reden hiervoor is dat we willen dat de rookgassen zo regelmatig mogelijk door de economiser stromen, opdat de warmteoverdracht in de tijd steeds gelijk is.

Ook moet er rekening worden gehouden dat de economiser voor een extra drukval in de rookgassen zal zorgen, dit zal door de brander ventilator opgevangen moeten worden. Doordat de rookgassen ook fel zijn afgekoeld zal de thermische trek in de schouw ook gaan afnemen.

Bij een slecht geïsoleerde schouw bestaat daarbij het risico dat de rookgassen nog verder zullen afkoelen zodat er condens zal worden gevormd. Door het zure condensaat kan de schouw en voornamelijk dan een onoordeelkundig gedimensioneerde economiser aangetast worden (zuurcorrosie).



Figuur 51: Economiser

3.2.4 Rookgascondensor

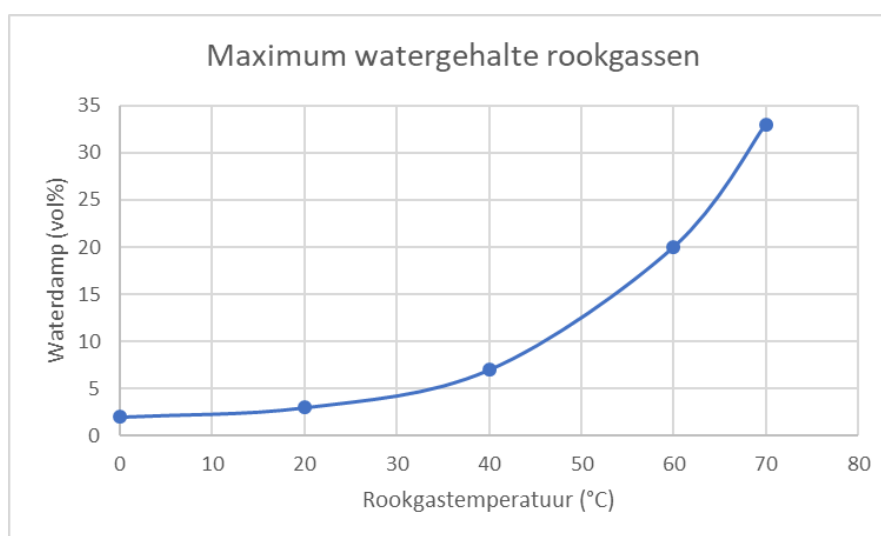
Een volgende energiebesparende maatregel die toegepast kan worden in de stoomtechnologie is de rookgascondensor. Bij een rookgascondensor gebruiken we een extern medium om de warmte op over te dragen. We zullen met een rookgascondensor dus geen ketelvoedingswater gaan voorverwarmen. We kunnen de rookgascondensor gebruiken om bijvoorbeeld warm water aan te maken die vervolgens in het productieproces nuttig toegepast kan worden.

De rookgascondensor wordt na de economiser geïnstalleerd, en dient zoals de naam het al zegt, om de condensatiewarmte uit de rookgassen te gaan onttrekken. Bij het bekijken van de energie-inhoud van brandstoffen, botsen we op de termen onderste en bovenste verbrandingswaarde. Bij de onderste verbrandingswaarde wordt de warmte nodig voor het verdampen van het gevormde water niet in rekening gebracht, bij de bovenste verbrandingswaarde daarentegen wordt deze wel in rekening gebracht.

Als men weet dat er zo'n 18% waterdamp in de rookgassen aanwezig is, is de warmte die we kunnen onttrekken met een rookgascondensor best wel nog groot.

De voorwaarde om de rookgassen te kunnen condenseren, is dat het warmte overdragend medium een lage temperatuur heeft. De temperatuur van het medium moet zeker onder de condensatietemperatuur of dauwpunttemperatuur van de rookgassen liggen.

Op onderstaande grafiek is de relatie zichtbaar tussen het waterdampgehalte bij de overeenstemmende rookgastemperatuur. Vanaf een rookgastemperatuur vanaf 58 °C zal er condens gevormd worden. Bij 50 °C kan er maar 12% waterdamp aanwezig zijn in de rookgassen. Het verschil hiertussen zal gaan condenseren.



Figuur 52: Relatie rookgastemperatuur en waterdampgehalte

Het gevormde condens heeft een heel lage pH-waarde waardoor we dit condens niet zomaar naar de riolering kunnen sluizen. Het condens heeft een hoge zuurtegraad omdat er zwaveloxides oplossen in het condens die tijdens de verbranding gevormd geweest zijn.

Een rookgascondensor wordt altijd geïnstalleerd in het koude gedeelte van een ketel, normaal na een economiser. De rookgassen stromen van boven naar beneden omdat dit overeenkomt met de stromingsrichting van het gevormde condensaat. Bij een stroming van de rookgassen van beneden naar boven zou het neervallende condens in een hogere temperatuur zone komen waardoor het weer zou kunnen verdampen en de werking van de rookgascondensor negatief zou kunnen beïnvloeden.

Er zijn 2 manieren om waterzijdig de rookgascondensor te doorstromen, in slangenvorm of in blokvorm. Als het opwarmingstraject groot is, zal men eerder kiezen voor het slangentype.

Het condensaat kunnen we per rij met een gootje afscheiden of in het totaal via een lekbak. Afscheiden per rij is het meest efficiënt omdat hierbij de kans op her verdampen het kleinst is, maar is ook het duurst. De rookgascondensor kan uitgevoerd worden met gladde pijpen of met vin pijpen. De gladde pijp is gebouwd uit roestvast staal, de vin pijp is daarentegen nog voorzien van een aluminium buisje rondom de roestvast stalen buis.

Net zoals in de economiser zal door de lage rookgastemperatuur de thermische trek in de schouw sterk gaan afnemen, en wordt er vaak nog een extra drukschakelaar voorzien bij de rookgascondensor om de brander uit te schakelen bij een te hoge tegendruk. Afhankelijk van de hoeveelheid gevormde condensaat zal de tegendruk toenemen.

Door de vorming van condensaat moet er zeker extra aandacht besteed worden aan de pakkingen, dichtingen en dergelijke opdat er geen lekken zouden optreden. De kleinste lekkage zal voor corrosieplekken zorgen op de ketel of op de vloer.

Door de lage temperatuur van de rookgassen krijgen we een typische witte pluim op de schoorsteen door de aanwezige waterdamp. Hoewel dit net een goede verbranding aantoont kan dit voor buurtbewoners storend zijn.

Door de vorming van condens zijn er bepaalde aandachtspunten voor de materiaalkeuze, doordat we aan waterzijde normaal niet behandeld water gebruiken biedt roestvast staal een goede oplossing. Aan de rookgaszijde krijgen we te maken met condens, dus biedt roestvast staal hier niet de beste oplossing. In lucht kunnen zouten aanwezig zijn die oplossen in het condensaat en die hierbij chloriden in het condensaat geven.

De chlorideconcentratie kan zo hoog oplopen dat er spanningscorrosie ontstaat. Speciale materialen zullen hier de uitkomst bieden.

De rookgaskanalen vereisen ook wat aandacht, omdat hierin ook condens zal gevormd worden. Vaak worden de rookgaskanalen dan in aluminium uitgevoerd, een extra coating toegepast of een dubbelwandige uitvoering voorzien.

Omdat de warmtevraag van het vreemd medium niet gelijk is aan de ketelcapaciteit, moeten we zorgen voor een rookgaszijdige bypass indien nodig.

2.3.5 Luvo

Luvo is kortweg de afkorting voor luchtvoorverwarmer. Net als de economiser en de rookgascondensor dient het om het rendement van de stoomketel te verbeteren. Als vuistregel geldt dat we met elke 10 graden opwarming, het rendement ongeveer met 0,45% kunnen doen verhogen.

Het voorverwarmen van de verbrandingslucht kunnen we op volgende twee manieren realiseren:

- Gebruik van de warmte van de rookgassen
- Gebruik van de warmte via een extern medium

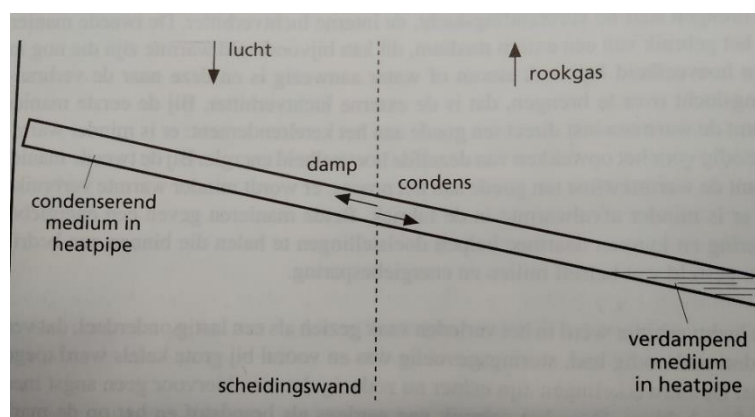
Bij de eerste manier komt de warmtewinst ten goede aan het ketelrendement.

In het tweede geval komt de warmtewinst ten goede aan het proces.

De luchtvoorverwarmer werd lang gezien als een vervelend onderdeel, dat veel onderhoud nodig had, storingsgevoelig was en voornamelijk enkel bij grotere ketels werd toegepast.

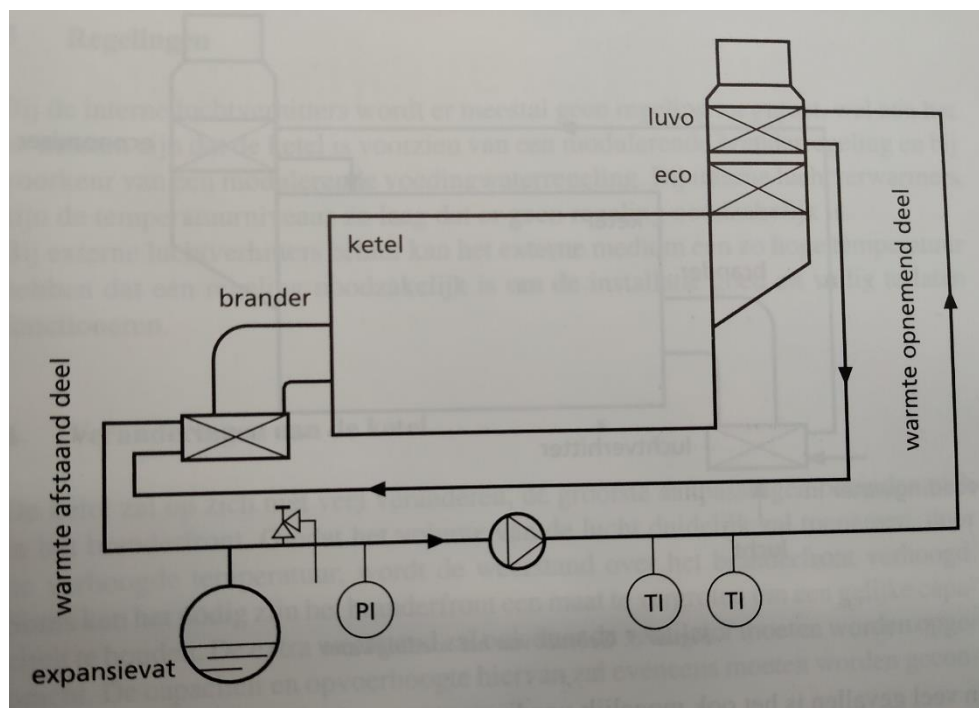
Door het gebruik van aardgas als brandstof en de opkomst van betrouwbare regelsystemen, is de toepassing nu beschikbaar voor zowat bijna alle soorten ketels.

Bij de interne lucht verhitter slaan we 2 vliegen in 1 klap, de rookgassen worden nog verder afgekoeld en de verbrandingslucht wordt ondertussen verder opgewarmd. Om de warmte van de rookgassen naar de verbrandingslucht te brengen, wordt in de industrie gebruik gemaakt van zogenaamde heatpipes.



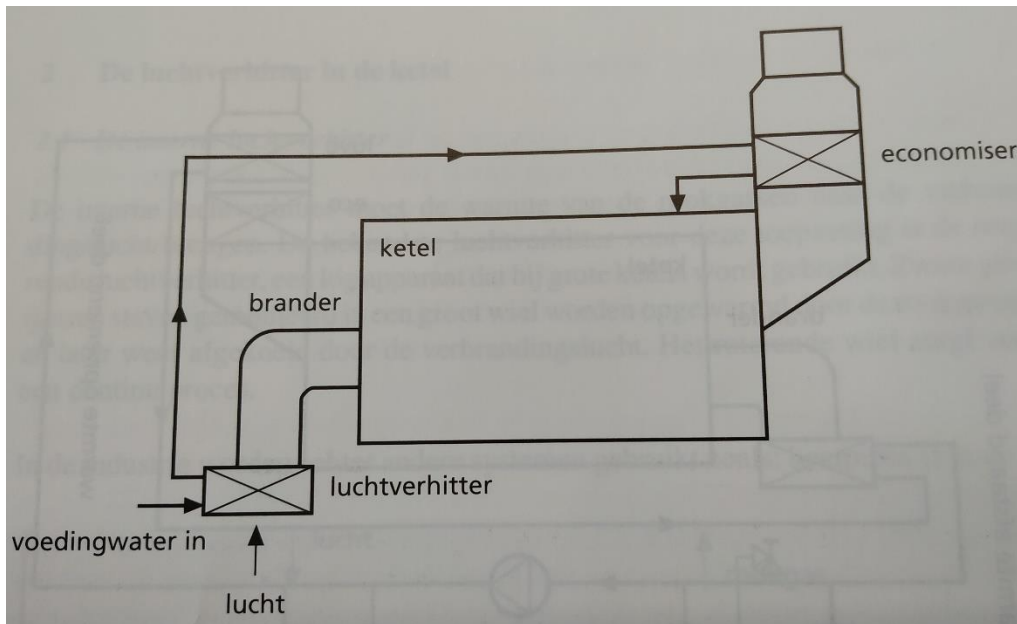
Figuur 53: Heatpipe - werkingsprincipe

Dit zijn gesloten buizen die gevuld zijn met een koelmiddel (brine, methanol of aceton). Er komt een proces op gang waarbij aan de warme kant van de heatpipe de vloeistof verdampt. Hierdoor wordt er aan de omgeving warmte onttrokken. De grootte van de onttrokken warmte-energie is sterk afhankelijk van de soort opstelling en het toegepaste koelmiddel. Hoe groter de soortelijke warmte (kJ/kg.K) van het koelmiddel, hoe meer energie er per kg koelmiddel aan de omgeving kan worden onttrokken. Het verdampte koelmiddel stroomt vervolgens onder invloed van de lagere dichtheid naar de bovenkant van de pijp. Daar komt het in contact met de lucht waaraan het zijn warmte moet afstaan. Hierdoor zal het koelmiddel in gastoestand gaan condenseren tot vloeistof. Daar de dichtheid van een vloeistof groter is dan een gas, zal de gecondenseerde vloeistof onder invloed van de zwaartekracht opnieuw naar de onderkant van de pipe stromen. Hier wordt het proces herhaald en verkrijgen we een constant transport van warmte-energie.



Figuur 54: Toepassing tussenmedium

Om de onttrokken warmte uit de rookgassen af te staan aan de verbrandingslucht, kan eveneens gewerkt worden met een tussenmedium. Als tussenmedium wordt vaak gewerkt met water. Door het tussenmedium op een druk van 6 bar te houden, met behulp van een expansievat, kan het water een maximale temperatuur van 160°C verdragen. Normaal ligt de waarde van de rookgassen na de economiser onder deze waarde. Met behulp van een circulatiepomp wordt het water in het circuit rondgepompt. De componenten die hierbij worden gebruikt, vinden hun toepassing in de traditionele centrale verwarmingscircuits.

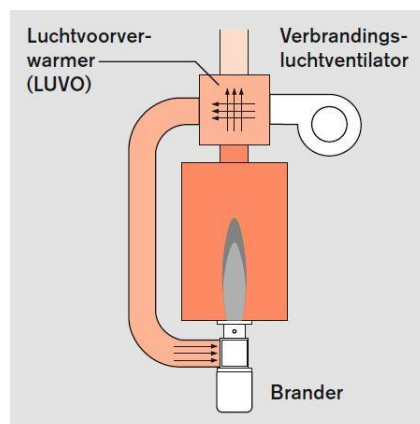


Figuur 55: Voedingswater als tussenmedium

Als tussenmedium kan ook voedingswater gebruikt worden. De temperatuur van het voedingswater aan de ingang van de economiser zal dan ook lager liggen. Door de lagere temperatuur van het voedingswater zal de economiser een beter rendement hebben. Dit principe gaat uiteraard enkel op indien er reeds een economiser voorzien is. Wanneer de voedingswatertemperatuur voor de economiser door interne processen al redelijk hoog is hebben we met een lage investering al een redelijk hoge besparing. De lucht verhitter moet berekend worden op de maximaal optredende druk in het voedingswatersysteem en kan daardoor onder de keuringsplicht vallen.

Veranderingen aan de ketel

Aan de ketel zal er niet zo veel veranderen, de grootste aanpassingen bevinden zich aan de brander zijde. Door de stijgende luchttemperatuur zal de aanmaak van NO_x wel gaan stijgen. Door de verhoogde temperatuur, zal het volume van de lucht ook duidelijk gaan toenemen. De extra weerstand zal door de ventilator moeten worden gecompenseerd. De luchtkanalen zullen uiteraard ook geïsoleerd moeten worden.



Figuur 56: LUVU-principe Weishaupt

3.3 Energiebalans

3.3.1 Inleiding

Een bestaande stoominstallatie energetisch optimaliseren door het plaatsen van een economiser of rookgascondensor gaat vaak gepaard met een fikse investering.

Vele bedrijven haken dan ook af op deze investering, louter omwille van het hoge investeringsbedrag. Dit is echter een spijtige zaak, daar er in de meeste gevallen toch heel wat nuttige energie kan worden bespaard. Dit uit zich dan ook uiteindelijk in een opmerkelijk lagere aardgasfactuur en een lagere emissie van CO₂.

Het blijft echter van groot belang om d.m.v. een doorgedreven energiestudie, de rendabiliteit van de investering te gaan bepalen. Om die reden stelt Callens dan ook een energiebalans op van de stookinstallatie, vooraleer de energiebesparende maatregelen effectief toe te passen. Deze balans brengt de verhoudingen van bruto-energie en netto-energie in kaart en bekomt daarbij een bepaald ketelrendement. In combinatie met bijvoorbeeld de rookgastemperatuur kan dan worden bepaald tot in hoe verre het rendabel is om een economiser te plaatsen. Daarnaast wordt de jaarlijks uitgespaarde energiehoeveelheid tegenover het investeringsbedrag vergeleken en bekomt men uiteindelijk een bepaalde terugverdientijd van de investering.

3.3.2 Energiebalans Masureel

Praktisch zullen we een energiebalans toepassen voor de stoominstallatie van het bedrijf Masureel te Wevelgem. Dit is een bedrijf actief in de textielindustrie en staat voornamelijk bekend voor het verven en kleuren van alle types van garen en andere textiel. Het bedrijf beschikt momenteel over twee stoomketels: een 10 T-ketel en een 15 T-ketel. Het is de bedoeling om a.d.h.v.



Figuur 57: Logo masureel-group

onze energiebalansberekening te gaan controleren of het effectief noodzakelijk is dat beide ketels operationeel zijn. Als we kijken naar de meetwaarden van het stoomdebiet die we binnenkrijgen via de stoomdebietmeters, zien we dat er maximaal slechts 8T/h aan stoom wordt verbruikt. Verder onderzoek zal dan ook moeten uitwijzen of dat het voor Masureel rendabeler is om met de 15 T of de 10 T verder te werken. Momenteel worden beide ketels manueel aangestuurd en opgestart, terwijl er slecht een minimale stoomvraag is.

Het permanent uitschakelen van één van de ketels zou dan leiden tot een aanzienlijke vermindering van het primaire energieverbruik, daar de stilstandsverliezen, de rookgasverliezen en het warmte-uitwisselend verliesoppervlak een stuk kleiner zal zijn.

Ook doet Masureel mee aan een meetcampagne van de Vlaamse overheid, waardoor het in aanmerking kan komen om een korting op de brandstofaccijnzen te verkrijgen. Hiervoor dient het bedrijf elk jaar een rapport op te maken van de inspanningen die het leverde op energiebesparende maatregelen, en de inspanningen die ze zullen doen om hun CO₂-uitstoot te verminderen.

Wanneer uit hun rapport een energiebesparende maatregel een bepaalde opgelegde minimumterugverdiëntijd heeft, wordt de onderneming verplicht om deze uit te voeren.

3.3.3 Opbouw energiebalans

Bij de energiebalans vergelijken we de inkomende bruto energiestromen met de energiestromen die de ketel verlaten. Meer bepaald is dit de verhouding van de toegevoerde gasenergie op de energieverliezen en de uiteindelijke nuttige stoom-energie. We bekomen een uiteindelijk installatierendement die meteen ook aantoonst hoe rendabel de installatie werkt. Om de verzameling van de gegevens en de berekeningen overzichtelijk te structureren, wordt de energiebalans bepaald a.d.h.v. een Excel-sheet.

Temperatuur retour stoomcondensaat	100	°C	Temp Cond	Manuele gemiddelde meting
Temperatuur suppletiewater	12	°C	Temp RO	Gemiddelde aanname over jaar
Geleidbaarheid ketelvoedingswater	100	µS/cm	µS Bache	Zie wateranalyses Ekopak
Geleidbaarheid ketelwater 15 ton ketel	2500	µS/cm	µS 15T	Zie wateranalyses Ekopak
Geleidbaarheid ketelwater 10 ton ketel	2500	µS/cm	µS 10T	Zie wateranalyses Ekopak
Gasdruk bij gasteller 15 ton ketel	0.45	bar	P gas 15T	manuele meting via manometer bij gasteller
Gasdruk bij gasteller 10 ton ketel	0.45	bar	P gas 10T	manuele meting via manometer bij gasteller
Gemiddelde O2 rookgassen 15 ton ketel	4.5	%	O2 15T	ZIE VERBRANDINGSATTEST CALLENS
Gemiddelde O2 rookgassen 10 ton ketel	3.5	%	O2 10T	ZIE VERBRANDINGSATTEST CALLENS
Bovenste verbrandings warmte aardgas	11.5239	kWh	BVW gas	ZIE INDEXIS. GASELWEST-WEST
Gemiddelde temperatuur aardgas	10	°C	Temp gas	Aanname over jaar
Spuilverliezen	1	%	%Spui lost	
Isolatieverliezen	1	%	%Iso lost	Aanname
Stoominjectie in watervoedingstank	0	ton/h	Q stoom bache	Afgesloten met manuele afsluiter na autonome temp reg
ON-LINE METINGEN IN STOOKPLAATS				
			Tag var	
Aardgasdebiet 15 ton stoomketel	120.13	m³/h	Qgas15T m³	1m³ = 387.5 pulsen
Aardgasdebiet 10 ton stoomketel	109	m³/h	Qgas10T m³	1m³ = 387.5 pulsen
Totaal stoomdebiet naar Verlimas	1.185	ton/h	Qstoom Verli	4-20 mA = 0-5927 kg/u
Totaal stoomdebiet naar Masureel	4.063	ton/h	Qstoom Mas	4-20 mA = 0-70672 kg/u
Debiet suppletiewater (RO) naar watervoedingstank	0.68	m³/h	Qro	100 liter / puls
Stoomdruk 15 ton stoomketel	9.01	bara	P 15T	4-20 mA = 0-36 barg ?
Stoomdruk 10 ton stoomketel	8.98	bara	P 10T	4-20 mA = 0-36 barg ?
Rookgastemperatuur 15 ton stoomketel	174.18	°C	RG temp 15T	pt100
Rookgastemperatuur 10 ton stoomketel	203.01	°C	RG temp 10T	pt100
Temperatuur verbrandingslucht	29.38	°C	Temp VBLucht	pt100
Temperatuur ketelvoedingswater	98.35	°C	Temp Ro	pt100

Figuur 58: Excel rekensheet voor de energiebalans

De groene vakjes duiden de gegevens aan die effectief via de meetcampagne over de stookinstallatie verkregen zijn. De gele vakjes bevatten de aangenomen gegevens die we halen uit verbrandingsattesten of andere indirect gemeten gegevens (slechts één keer effectief gemeten). Naast de kolom met de eenheden van de gemeten grootheden, is een extra kolom ingevoegd die de tagnames bevatten van de metingen. Deze tagnames worden door de automation engineers toegepast in het PLC-programma dat ook de trending van de gegevens voorziet. De totale looptijd van de meetcampagne loopt van 10 april t.e.m. 10 mei. Tussen deze periode waren er enkele dagen van stilstand (weekends, feestdag) alsook zes dagen aan ontbrekende logdata omwille van logproblemen. Vervolgens beschikken we dus over 24 dagen aan relevante loggegevens die we voor de opstelling van de energiebalans kunnen gebruiken.

De in de bovenstaande tabel vermelde gegevens worden verder in het Excel-werkblad toegepast om de effectieve berekeningen te realiseren:

Bruto toegevoerd vermogen gas 15 ton stoomketel	1741.64	kWh(OVW)	kWh brut 15T	gasl = aardacht spuiten
Bruto toegevoerd vermogen gas 10 ton stoomketel	1580.28	kWh(OVW)	kWh brut 10T	
Verbrandingsrendement 15 ton stoomketel	92.87	%	Verbr rend 15T	
Verbrandingsrendement 10 ton stoomketel	91.85	%	Verbr rend 10T	
Stoomdebiet 15T	2415.07	kg/h	Q stoom 15T	
Spui-debiet 15T	100.63	kg/h	Q spui 15T	
Stoomdebiet 10T	2167.14	kg/h	Q stoom 10T	
Spui-debiet 10T	90.30	kg/h	Q spui 10T	
debiet ketelvoedingswater	4.97	m³/h	Q ketelwater	959.5269855
Energie water 15T	287.98	kWh	E water 15T	
Energie water 10T	258.42	kWh	E water 10T	
Energie stoom 15T	1860.32	kWh	E Stoom 15T	
Energie stoom 10T	1669.27	kWh	E Stoom 10T	
m³/h retour stoomcondensaat	4.29	m³/h	Qcond	
% retour stoomcondensaat	86.3%	%	%cond	
Toevoer netto vermogen via voedingswater naar 15 en 10 ton ketels	558.07	kWh	kWh VW net TOTAAL	977.733656
Enthalpie 15 ton stoomketel	2773.08	kJ/kg	h 15T	
Enthalpie 10 ton stoomketel	2772.95	kJ/kg	h 10T	
Vloeistofwarmte spui 15 ton stoomketel	742.77	kJ/kg	h1 15T	
Vloeistofwarmte spui 10 ton stoomketel	742.77	kJ/kg	h1 10T	
Spuiverliezen 15 ton stoomketel	17.42	kWh	kWh spui 15T	866.649785L
Spuiverliezen 10 ton stoomketel	15.80	kWh	kWh spui 10T	887.129266
Isolatieverliezen 15 ton stoomketel	17.42	kWh	kWh isol 15T	
Isolatieverliezen 10 ton stoomketel	15.80	kWh	kWh isol 10T	
Rookgasverliezen 15 ton stoomketel	122.95	kWh	kWh RG 15T	
Rookgasverliezen 10 ton stoomketel	127.48	kWh	kWh RG 10T	
Vloeistofwarmte ketelvoedingswater	412.11	kJ/kg	h2 bache	
Netto toe te voeren energie voor 1 kg stoomaanmaak 15 ton stoomketel	2360.97	kJ/kg	Dh 15T	effectieve enthalpie
Netto toe te voeren energie voor 1 kg stoomaanmaak 10 ton stoomketel	2360.84	kJ/kg	Dh 10T	
Netto stoomproductie 15 ton stoomketel	2.42	ton/h	Q stoom 15T	
Netto stoomproductie 10 ton stoomketel	2.17	ton/h	Q stoom 10T	
Totaal ketelrendement 15 ton stoomketel	91.66	%	Netto Rend 15T	
Totaal ketelrendement 10 ton stoomketel	90.79	%	Netto Rend 10T	
Totaal ketelhuisrendement met algemene stoomdebietmeter	88.71	%	TOT Rend	

Figuur 59: Excel-rekenblad

Om het bruto toegevoerd vermogen aan aardgas te berekenen hebben we het normaaldebiet aan gas vermenigvuldigd met de onderste verbrandingswaarde van aardgas. Aangezien we in de aannames rekening houden met de bovenste verbrandingswaarde moeten we deze waarde nog omrekenen met een omzetsfactor van 0,903.

Het verbrandingsrendement kunnen we berekenen met de formule van Siegert, die rekening houdt met het restzuurstof-gehalte in de rookgassen (zie: formularium in bijlage).

Voor de spuverliezen rekenen we met een verhouding van 1 procent op het bruto aardgas vermogen, evenals voor de isolatieverliezen.

De rookgasverliezen worden berekend door de isolatieverliezen van het bruto vermogen af te trekken, en deze vervolgens te vermenigvuldigen met het verbrandingsrendement. Het totale toegevoerde vermogen komt echter niet enkel van het aardgasdebiet, maar ook van de energie-inhoud van het toegevoerd ketelvoedingswater. Deze energie kan berekend worden a.d.h.v. volgende formule: $Q = m \times c \times \Delta T$.

De energie die nodig is om 1 kg stoom aan te maken is dan de totale enthalpie (kJ/kg) nodig om 1 kg stoom te maken, verminderd met de vloeistofwarmte die wordt toegediend door het ketelvoedingswater. De totale enthalpie van het ketelvoedingswater is gerekend vanaf 0°C tot aan het punt van stoomvorming, echter levert het watervoedingsvat ons al voorverwarmd water. De energie die al in het water aanwezig is wordt dus van deze totale enthalpie afgetrokken. De hoeveelheid stoom die geproduceerd kan worden is dus het bruto vermogen aan aardgas, verminderd met alle verliezen, gedeeld door de energie nodig om 1 kg stoom aan te maken. De bekomen waarde is de netto hoeveelheid stoomproductie.

De netto hoeveelheid stoom wordt vervolgens vermenigvuldigd met de totale enthalpie om 1 kg stoom te maken om de energie-inhoud van de gevormde stoom te bepalen.

Het spuidebiet wordt berekend met behulp van de gemeten geleidbaarheidswaarden ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

De energie van het toegevoerde water uit de watervoedingstank kan berekend worden door de som van het spuidebiet en stoomdebiet, vermenigvuldigd met de vloeistofwarmte.

Het toegevoerde water uit de watervoedingstank moet het stoomdebiet en spuidebiet compenseren. Het totale ketelhuisrendement wordt dan berekend door de energie aan stoom te delen door de som van het bruto aardgasvermogen en de energie van het water.

Voor de 10 ton ketel wordt dezelfde werkwijze gevolgd.

Het algemene ketelhuisrendement kan dan berekend worden met de wet van Kirchoff, die stelt dat alle ingaande energiestromen gelijk moet zijn aan alle uitgaande energiestromen opgeteld met de energieverliezen. Hiervoor tellen we het stoomdebiet naar Masureel en Verlimas op en berekenen hiervan de energie-inhoud. Deze waarde wordt dan gedeeld door alle energie die toegevoerd werd.

3.3.4 Meetgegevensproblematiek

Doordat we met veel aannames moeten rekenen, zal de energiebalans minder nauwkeurig zijn. Bij onze aannames baseren we ons wel op mengpunten en andere wiskundige vergelijkingen, om de fout zo klein mogelijk te houden en om deze in de mate van het mogelijke te neutraliseren.

Een eerste probleem die we ondervinden met het verwerken van de meetgegevens, is de retourtemperatuur van het condensaat. Het retourcondensaat stroomt in de watervoedingstank, waar ook vers suppletiewater toekomt. Van het suppletiewater kennen we de temperatuur en meten we het debiet (zie: online metingen).

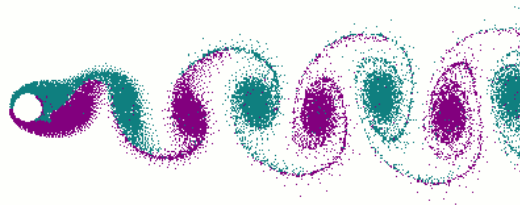
Dit mengsel van retourcondensaat en suppletiewater dient dan als ketelvoedingswater.

Hiervan weten we de temperatuur maar het debiet niet. We berekenen dus het mengpunt om de ontbrekende gegevens te achterhalen.

Als we met behulp van het berekenen van het mengpunt de temperatuur van het retourcondensaat achterhalen, bekomen we een waarde van 120°C.

Daar de watervoedingstank echter atmosferisch staat opgesteld, kan er bijgevolg geen 100 % vloeibaar condensaat in de tank stromen daar deze temperatuur hoger ligt dan de verzadigingstemperatuur bij atmosferische druk. Aangezien we dus naast retourcondensaat ook te maken hebben met stoom die in de watervoedingstank toekomt, kunnen we onze formule voor het opstellen van het mengpunt niet meer toepassen daar deze enkel geldt voor vloeistoffen. Om de balans alsnog zo realistisch mogelijk in te vullen, zullen we een retourcondensaattemperatuur aannemen van 100 °C.

Een tweede probleem die zich voordoet bij de opmaak van onze balans, vormt zich bij het opmeten van het stoomdebiet naar de twee verschillende afdelingen Masureel en Verlimas. Deze worden gemeten d.m.v. een vortex stoomdebietmeter. Dit is een stoomdebietmeter die zich baseert op de frequentie van de wervelingen om het debiet te gaan bepalen. Deze werveling wordt ook wel vortex genoemd, vandaar de benaming. Het medium stroomt door de meter en passeert langs een obstructie in de meter die de bluff-body wordt genoemd. Hierdoor ontstaan er wervelingen achter de bluff-body. Deze wervelingen kunnen vervolgens opgemeten worden d.m.v. een ultrasone sensor of een piëzo-elektrisch kristal. De voorwaarde die echter aan deze meting verbonden is, stelt dat de diameter dusdanig gedimensioneerd moet worden dat er een bepaalde stroomsnelheid gehanteerd wordt. De wervelingen in de meter moeten namelijk groot genoeg zijn om door het registratie element gedetecteerd te kunnen worden.



Figuur 60: Wervelingen na bluff-body

Het debiet wordt uiteindelijk bepaald a.d.h.v. de frequentie waarmee de wervelingen zich voordoen. Hoe hoger de wervelingsfrequentie, hoe hoger het debiet zal zijn. Volgende formule verklaart dit nader:

$$f = \frac{S \cdot v}{d}$$

Hierbij is:

S = Strouhal getal (een dimensieloze constante)

v = stroomsnelheid van het medium

d = diameter van de obstructie (bluff-body)

In het geval van de debietmeters bij Masureel en Verlimas, hebben we te maken met een meter met een doorsnede van DN 80 (Verlimas) en een meter met een sectie van DN 250 (Masureel). Daar er slechts een klein debiet aan stoom richting Masureel wordt afgenomen, hebben we te maken met een uiterst lage stroomsnelheid. Dit zorgt er uiteindelijk voor dat deze meter incorrect meet. Deze meter is voorzien om een minimaal stoomdebiet van 2754,44 kg/h te kunnen meten. Dit terwijl we gemiddeld een stoomdebiet hebben van om en bij de 2290 kg/h. Om alsnog het correcte stoomdebiet te gaan bepalen, hebben we verder in de trending en opvolging van de gegevens, het stoomdebiet berekend a.d.h.v. de formule die we hebben toegepast voor de opmaak van de energiebalans (zie: formules).



Figuur 61: Vortex stoomdebietmeter (Endress & Hauser)

3.3.5 Bespreking loggegevens

Aan de hand van de meetcampagne hebben we voor 24 dagen aan relevante meetgegevens kunnen registreren. Deze gegevens hebben we allemaal per uur in een Excel-sheet gesorteerd en opgeslagen. Het is de bedoeling om aan de hand van deze verzamelde gegevens aan te tonen of het mogelijk is om met slechts één ketel verder te werken en of het rendabel is dat er een economiser geplaatst wordt.

Volgende gegevens werden via de meetcampagne permanent gemeten:

- Gasverbruik 10 T (m^3/h)
- Gasverbruik 15 T (m^3/h)
- RO – watertoevoer (m^3/h)
- Gemiddeld stoomdebiet Masureel (kg/h)
- Gemiddeld stoomdebiet Verlimas (kg/h)
- Stoomdruk 10 ton ketel (barg)
- Stoomdruk 15 ton ketel (barg)
- Temperatuur rookgassen 10 ton ketel ($^{\circ}\text{C}$)
- Temperatuur rookgassen 15 ton ketel ($^{\circ}\text{C}$)
- Temperatuur watervoedingstank ($^{\circ}\text{C}$)
- Temperatuur verbrandingslucht ($^{\circ}\text{C}$)

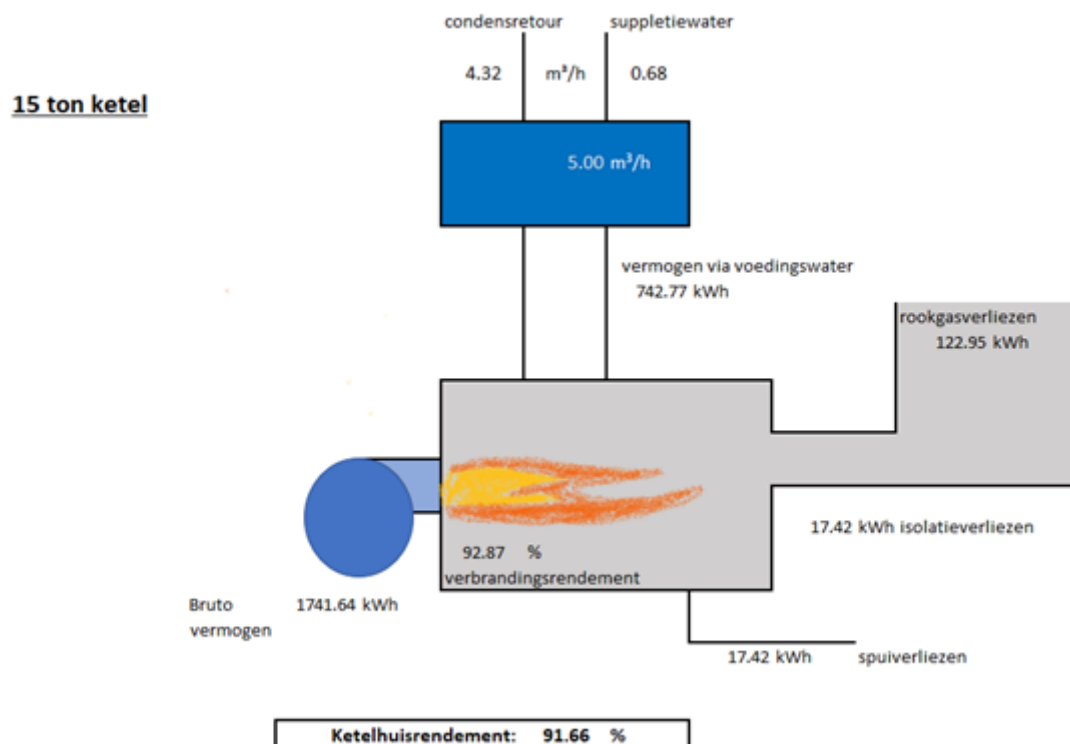
Deze gegevens werden ons dagelijks toegestuurd tijdens de duur van de meetcampagne door automation engineer Steven Haelewijn. Doordat de stoomdebietmeting naar Masureel echter incorrect verloopt, zijn we genooddaakt om deze theoretisch te berekenen vooraleer we deze als gegeven kunnen toepassen in de energiebalans. We vertrekken hieruit van het bruto toegevoerd vermogen dat we kunnen bepalen a.d.h.v. het aardgasdebiet dat wordt verbruikt. Hiervan trekken we alle optredende verliezen van af (isolatieverliezen, rookgasverliezen en spuiverliezen).

Op deze manier komen we tot volgende formule:

$$Q_{stoom} = (Q_{brut,gas} - Q_{spui} - Q_{isol} - Q_{rookgas}) * 3600 * (h_{stoom} - h_{water})$$

We bepalen dus eerst de netto-energiehoeveelheid (kJ) die nodig is om de stoom te produceren. Nadien vermenigvuldigen we deze waarde met de enthalpie van de stoom (kJ/kg) om uiteindelijk een massastoomdebiet te verkrijgen in kg/h. Dit stoomdebiet zal in de verdere berekeningen worden toegepast.

Visuele voorstelling



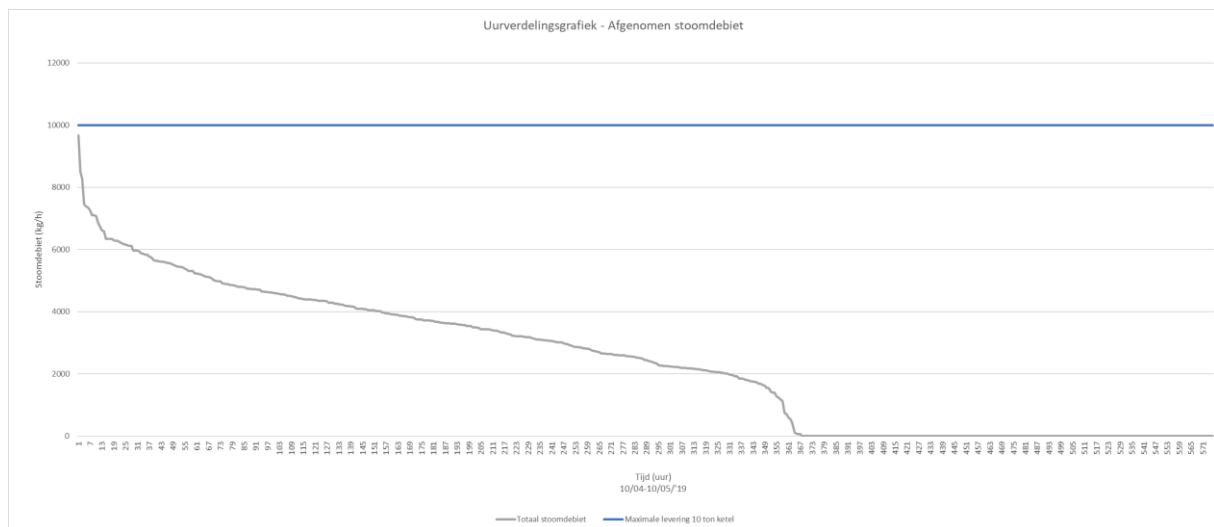
Bovenstaande schets toont ons de visuele weergave van de stookinstallatie en geeft de verhoudingen weer van de verschillende energiestromen die voorkomen in het ketelhuis. De waarden op de visualisatie zijn deze die door de energiebalans berekend zijn. Op dergelijke manier kan eenvoudig en snel duidelijk gemaakt worden welke waarde voor welke energiestroom garant staat. Dat maakt het voor de eindklant eenvoudiger om de context van de energiebalans beter te begrijpen. Naast de grootte van de verschillende energiestromen (in kWh), worden ook de respectievelijke rendementen van de installatie weergegeven. Hieronder verstaat men het verbrandingsrendement en het algemene ketelhuisrendement. Op basis van deze gegevens kan men eenvoudig aan de klant duidelijk maken waar er zich de meeste energieverliezen bevinden.

3.3.6 Opstellen uur verdelingsgrafiek

Naast het aantonen van de rendabiliteit van het installeren van een economiser, voerden we ook een ketelanalyse uit. Aan de hand van deze analyse moet er worden besloten of dat het bedrijf met slechts één stoomketel kan verder werken voor de stoomproductie. Indien dit het geval zou zijn zou dit resulteren in een sterk verlaagd stationair energieverlies. Hieronder verstaat men de stilstandsverliezen en de isolatieverliezen van de ketel. Indien er namelijk aangetoond kan worden dat er enkel met de 10 ton stoomketel gewerkt kan worden, vertaalt dit zich in een kleiner warmte-uitwisselend oppervlak en een kleinere thermische massa (waterinhoud). Hierdoor zal het stationair energieverlies al een pak lager zijn.

Om echter aan te tonen of dat er enkel met de 10 ton ketel gewerkt kan worden, moeten we alle berekende stoomdebieten vanuit de meetcampagne groeperen en sorteren van groot naar klein. Op dergelijke manier bekomen we een tabel van stoomdebieten die we als basis toepassen om de uur verdelingsgrafiek op te stellen. Deze grafiek vertelt ons hoelang bepaalde stoomdebieten voorkomen. Deze grafiek is door de sortering zodanig opgesteld, dat deze het grootste stoomdebiet links in de curve projecteert en het kleinste debiet aan de rechterkant van de curve.

Volgende grafiek toont ons vervolgens de uur verdelingsgrafiek van het totaal afgenomen stoomdebiet van Masureel en Verlimas. Hierop zien we hoe lang de respectievelijke debieten voorkomen i.f.v. de meetcampagneperiode. De blauwe lijn duidt het stoomdebiet aan die door de 10 ton ketel maximaal kan worden geproduceerd.

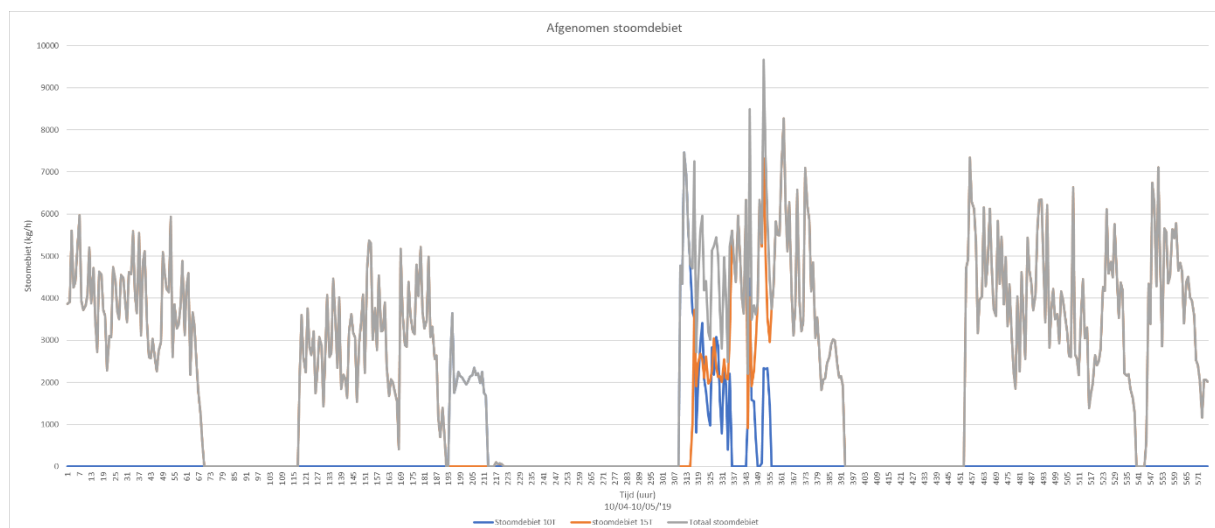


Figuur 62: Uur verdelingsgrafiek i.f.v. totaal afgenomen stoomdebiet

Wat we op de grafiek duidelijk kunnen zien is dat er slechts een minimale tijd ($\pm 1,2$ uur), van de totaal gemeten tijd van de meetcampagne een grote stoomvraag is. Daarna zwakt de grafiek af tot aan een gemiddelde stoomafname van 3,97 T/h. Als we de curve naar links volgen, zien we dat het maximaal afgenomen stoomdebiet 9,66 T/h bedraagt. We kunnen dus m.a.w. gaan besluiten dat we, als we rekening houden met de totale tijd van de meetcampagne, de stoomvraag volledig kunnen dekken met de 10 ton ketel.

3.3.7 Verklarende grafieken

Om het analyseren van de gegevens die we via de meetcampagne verworven hebben te vergemakkelijken en te verduidelijken, stellen we diverse grafieken op die de relaties tussen de verschillende meetgegevens weergeeft. Op deze manier kunnen we meer gestructureerd en visueel onze besluiten trekken.



Figuur 63: Geproduceerd stoomdebiet totaal en per ketel

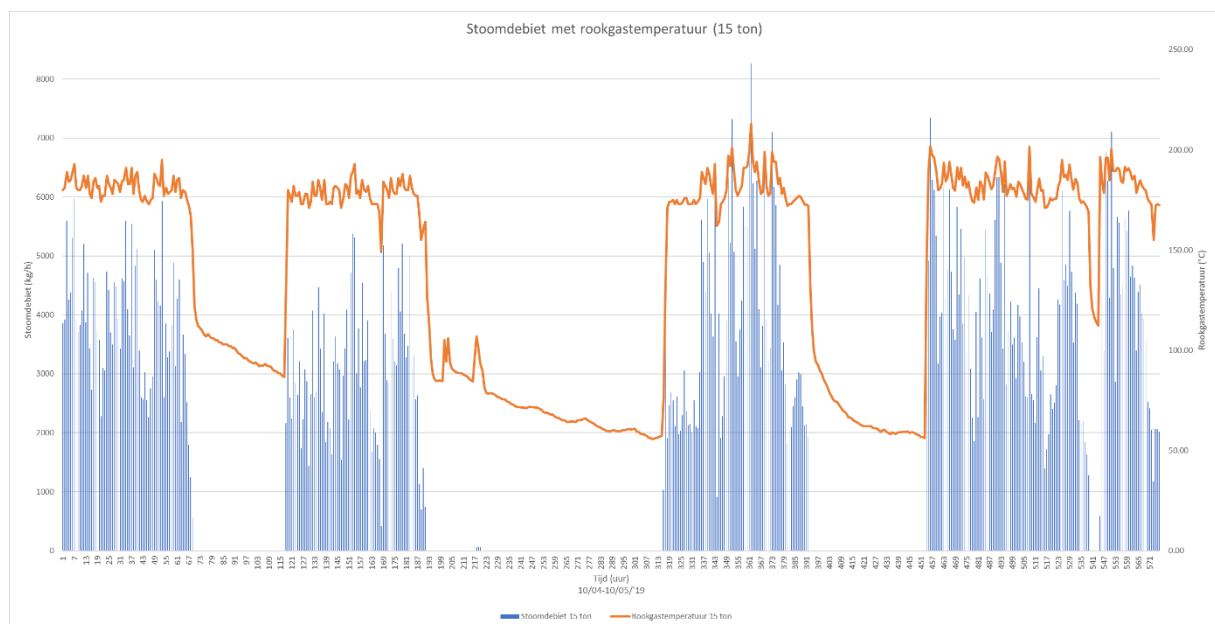
Bovenstaande grafiek toont ons het geproduceerde stoomdebiet van respectievelijke de 10 ton ketel (blauwe lijn) en de 15 ton ketel (oranje lijn). De grijze curve toont ons het totale geproduceerde stoomdebiet. Op de horizontale as wordt de tijd weergegeven in uur. Aangezien we over 24 dagen aan loggegevens beschikken, hebben we een totale logperiode van 576 uur.

Uit deze grafiek kan men afleiden dat er in de periode van de meetcampagne voornamelijk gewerkt werd met de 15 ton ketel en de 10 ton ketel het slechts voor korte tijd overneemt. In slechts een deel van de gemeten tijd worden de beide ketels effectief samen gebruikt voor de stoomlevering.

Indien we de draaitijden van de ketels bekijken op de totale logtijd dan kunnen we vaststellen dat de draaitijd percentagegewijs als volgt bedragen:

	Uren	Percentage
Draaitijd 10 ton ketel	56	9,72 %
Draaitijd 15 ton ketel	342	59,38 %
Stilstandstijd beide ketels	178	30,90 %

Aan deze tijden kunnen we dus besluiten dat er voornamelijk gewerkt wordt met de 15 ton ketel en slechts 10 % met de 10 ton ketel. Daarnaast zien we dat we over de volledige logperiode een stilstand hadden van 30,9 % van de totale tijd.



Figuur 64: Stoomdebiet 15 ton ketel met bijhorende rookgastemperatuur

Bovenstaande grafiek laat ons de verhouding zien tussen het afgenomen stoomdebiet en de rookgastemperatuur van de 15 ton ketel.

Net zoals bij de stoomdebietsgrafiek kan men aan deze grafiek afleiden wanneer de ketel draait. Daarnaast kan men eveneens duidelijk afleiden dat als de ketel uitgeschakeld wordt, de rookgastemperatuur eerst sterk en dan vrij stabiel daalt. In het geval van de 10 ton ketel (grafiek rechts) zien we zelfs over een langere periode slechts een beperkte afname van de temperatuur van de rookgassen, dit terwijl de ketel al 7,5 dagen stil ligt.

Dit verloop valt te verklaren aan het feit dat de ketel een grote thermische massa heeft.

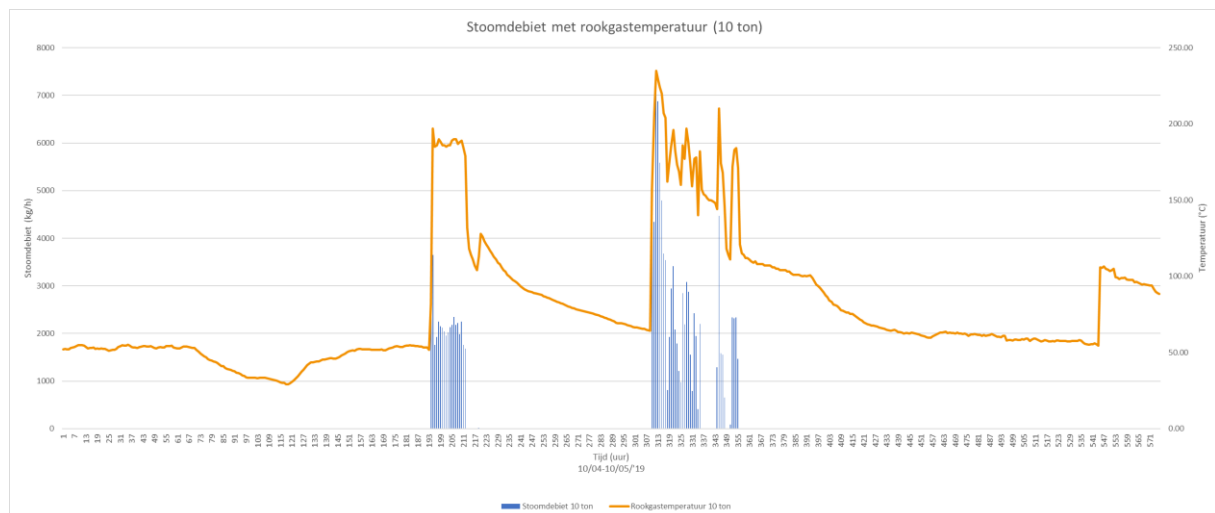
De water-inhoud van de ketel die op temperatuur staat en de stalen wandconstructie van de ketel geven langzaam hun warmte aan de luchtstroom af.

Deze luchtstroom evacueert vervolgens de ketel via de schouw, waar zich de temperatuursonde van de rookgassen bevindt.

Daarnaast kan men uit deze grafieken de relatie bepalen tussen de graad van belasting (hogere stoomafname) en de rookgastemperatuur.

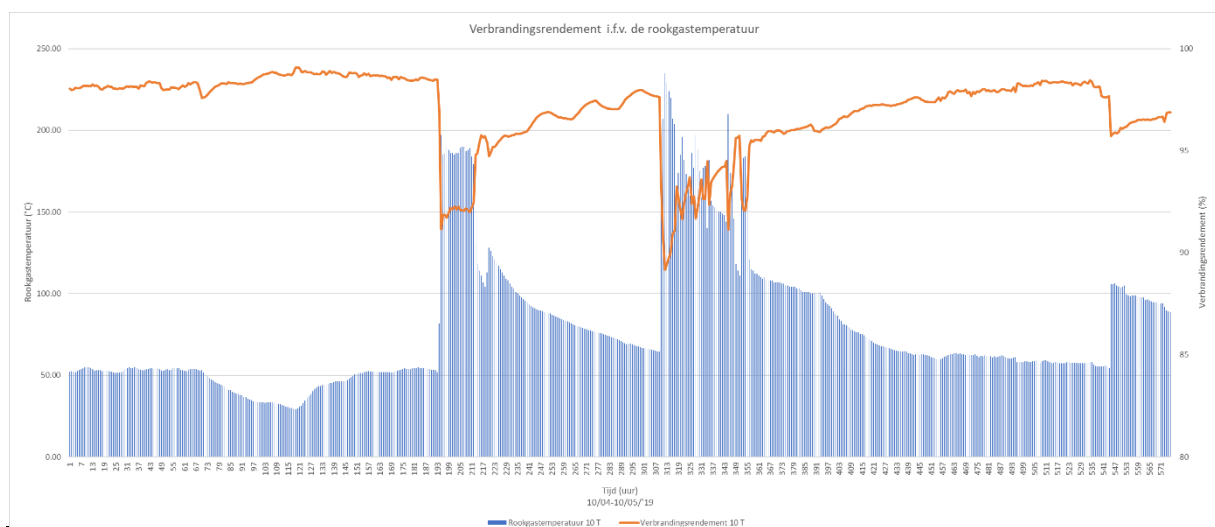
Als de ketel laag belast wordt, dan zal de stoomproductie lager zijn, alsook de rookgastemperatuur. Indien men de 10 ton ketel efficiënter zou belasten door de volledige stoomproductie op deze ketel te realiseren, dan zal enerzijds de rookgastemperatuur stijgen en anderzijds zal daardoor de rendabiliteit van een mogelijke economiser vergroten.

Onderstaande grafiek toont het stoomdebiet met de bijhorende rookgastemperatuur voor de 10 ton ketel:



Figuur 65: Stoomdebiet 10 ton ketel met bijhorende rookgastemperatuur

Als bijvoorbeeld de belasting van de 10 ton ketel toeneemt (grotere stoomafname), dan zien we dat bij de sterkste stoompieken, er een stijging van de rookgastemperatuur optreedt van zowat 175°C naar 235 °C (max. rookgastemperatuur). Hieruit kan men dus besluiten dat hoe hoger de ketelbelasting is, hoe hoger de rookgastemperatuur zal zijn en des te lager het verbrandingsrendement zal zijn.

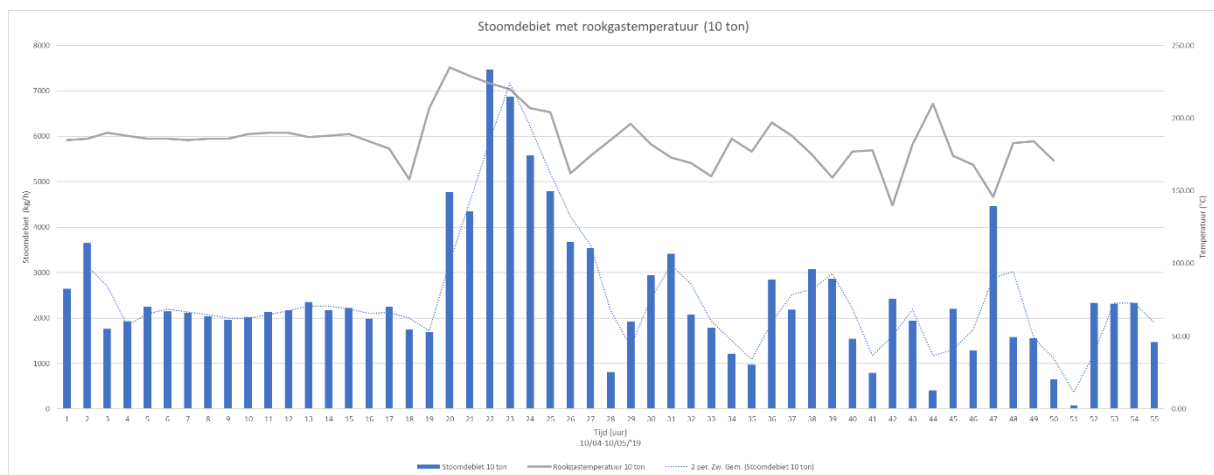


Figuur 66: Verbrandingsrendement i.f.v. de rookgastemperatuur

Op voorgaande grafiek wordt de verhouding geplot tussen de rookgastemperatuur van de 10 ton ketel (blauw) en het bijhorende rendement in functie van de tijd in uren oplopend (meetcampagne). We zien duidelijk dat, als er zich een sterke stijging voordoet van de rookgastemperatuur, er een daling is van het verbrandingsrendement (formule van Siegert). Verder kunnen we besluiten dat indien de belasting van de ketel stijgt, eveneens de rookgastemperatuur zal stijgen en bijgevolg het verbrandingsrendement ook zal dalen. Hierdoor kan men stellen dat de rendabiliteit van het plaatsen van een economiser stijgt als de ketel optimaler wordt belast.

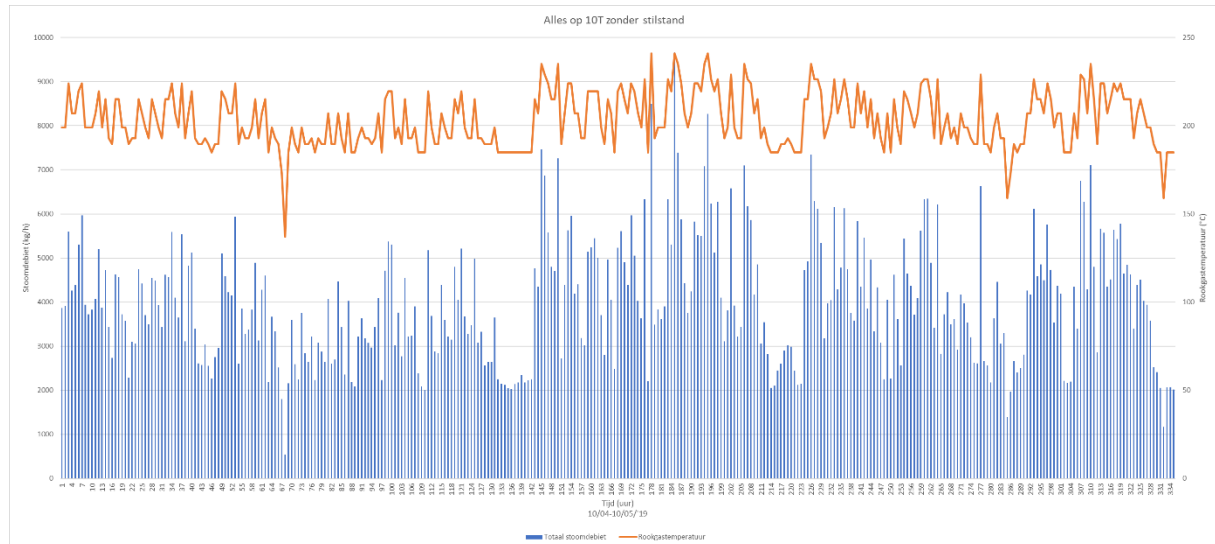
Er kan dus gesteld worden dat er enerzijds een groter rendementsverlies zal optreden als men de volledige stoomproductie realiseert met enkel de 10 ton ketel, maar anderzijds dient er eveneens gekeken te worden naar het verkleinde energieverlies d.m.v. straling. Ook de opstartverliezen en de stilstandsverliezen zullen in dit geval een stuk lager zijn, wat maakt dat het absoluut rendabeler is om de volledige stoomproductie met enkel de 10 ton ketel te realiseren. Ook is deze opstelling zeer interessant over het recupereren van de warmte van de rookgassen (zie: berekening economiser).

Om nu de gemiddelde rookgastemperatuur te achterhalen, dienen we alle gegevens van de 10 ton ketel op een rij te sorteren en alle waarden waarbij er stilstand van deze ketel optreedt te verwijderen. Het gevolg is dat we een gelijkaardige grafiek verkrijgen zoals al eerder besproken, maar waarvan er relevante gemiddelden kunnen genomen worden.



Figuur 67: Stoomdebiet 10 ton ketel met rookgastemperatuur zonder stilstand

Deze waarden zullen we m.b.v. de energiebalans toepassen om de rendementsverhoging van de installatie te kunnen bepalen. Aan de hand van deze verhoging kunnen we dan bepalen hoeveel energie er maximaal uitgespaard kan worden en met welke terugverdientijd de investering terugbetaald kan worden.



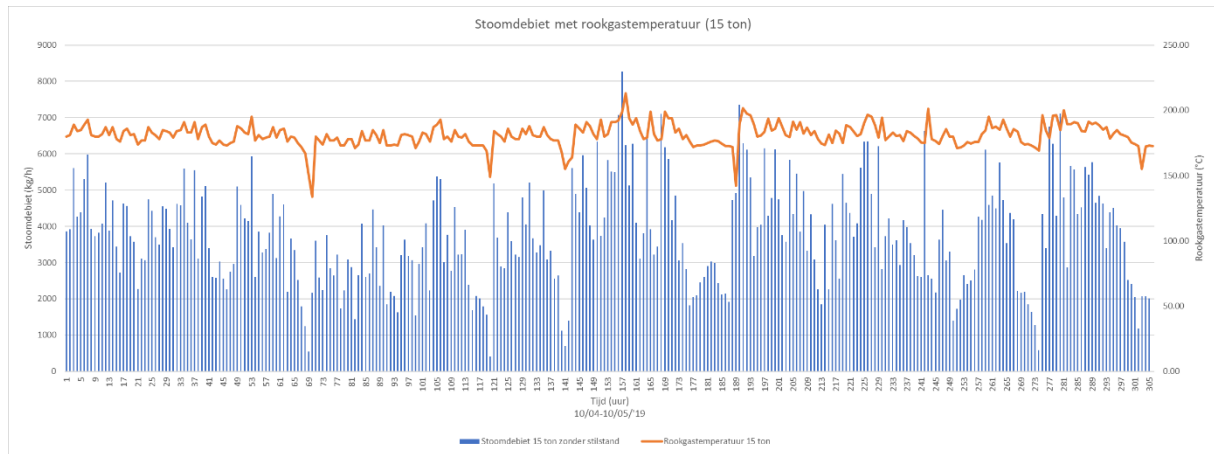
Figuur 68: Stoomdebietsgrafiek met alles op de 10 ton ketel gedimensioneerd

Bovenstaande grafiek toont ons eveneens de rookgastemperatuur in functie van het geproduceerde stoomdebiet, maar dan gerekend met de volledige stoomproductie geproduceerd door enkel de 10 ton stoomketel. Via deze grafiek kunnen we uiteindelijk de gemiddelde rookgastemperatuur gaan bepalen in de situatie zoals deze zou zijn indien er in de toekomst enkel maar met de 10 ton ketel gewerkt zou worden. Deze gegevens zullen we later toepassen in de energiebalans om de totale rendementsstijging van de economiser te kunnen bepalen.

De gemiddelde waarden van bovenstaande grafiek (10 ton ketel) zijn als volgt:

Stoomdebiet	3972,60 kg/h
Gemiddelde rookgastemperatuur	203,01 °C
Maximale rookgastemperatuur	241,00 °C

Om het te kaderen bespreken we alsook de verhoudingsgrafiek van de 15 ton ketel indien we alle stoomproductie zouden realiseren met enkel maar de 15 ton ketel. Eerder hebben we reeds aangetoond dat de stoomproductie perfect gerealiseerd kan worden met de 10 ton ketel, maar om dit verder te duiden geven we alsnog dezelfde grafiek mee met de volledige productie op de 15 ton ketel.



Figuur 69: Stoomdebietsgrafiek met alles op de 15 ton ketel gedimensioneerd

3.4 Rendabiliteitsberekening economiser

Daar we nu hebben kunnen aantonen dat er in het vervolg enkel met de 10 ton ketel verder gewerkt kan worden, en door de grotere ketelbelasting van deze ketel, de rendabiliteit van een economiser wordt vergroot, bepalen we in dit deel de verdere dimensionering van de economiser. We bepalen o.a. de totaal uitgespaarde energie en passen deze waarde toe om de totale terugverdientijd van de investering te gaan bepalen. Deze methodiek passen we toe voor een economiser die de rookgassen afkoelt tot 110°C (grote economiser) en voor een economiser die rookgassen afkoelt tot 120 °C (kleinere economiser).

3.4.1 Economiser 110 °C

Bespaarde energiehoeveelheid

De totale bespaarde energie wordt bepaald a.d.h.v. de rendementsstijging die we verkrijgen als we de rookgastemperatuur verlagen d.m.v. een economiser.

Momenteel hebben we te maken met een gemiddelde rookgastemperatuur van 198,95 °C. Als we een economiser zouden plaatsen, zou deze de rookgassen kunnen afkoelen naar een temperatuur van 110 °C (gem. waarde). Indien we in onze balans de temperatuur wijzigen naar 110 °C, dan bekomen we een verschil in algemeen ketelrendement als volgt:

Totaal ketelrendement 10 ton stoomketel	90.79	%	Netto Rend 10 T
Totaal ketelrendement 10 ton stoomketel	94.51	%	Netto Rend 10 T

We hebben dus te maken met een rendementsstijging van **3,72 %**.

Dit omgerekend naar energiehoeveelheid heeft volgende waarde:

$$Q_{bespaard} = \% \text{ rendementsstijging} * Q_{Bruto,gas}$$

$$Q_{bespaard} = 0,0372 * 23\,512 \text{ MWh} = 874,65 \text{ MWh}$$

De bruto toegevoerde energiehoeveelheid wordt bepaald door het jaarverbruik aan gas (Monitoringsverslag). Deze bedroeg voor het jaar 2018: 23 512 MWh/jaar.

Bespaarde energiekost

Om nu de uitgespaarde energiekost te gaan bepalen, moeten we rekening houden met de gasprijs. Daar deze sterk schommelt in stijgende lijn, houden we rekening met een gemiddelde van € 22/MWh. In deze situatie wordt dat dan:

$$\epsilon_{bespaard} = 874,65 \text{ MWh} * \frac{\text{€ } 22}{\text{MWh}} = \text{€ } 19\,242,22$$

Terugverdientijd

De terugverdientijd is een factor die aantoont hoe rendabel een investering is t.o.v. de uitgespaarde energiekost. Als de terugverdientijd kort is kan men stellen dat men met een rendabele investering te maken heeft. Is de terugverdientijd echter lang, dan kan men concluderen dat de investering niet rendabel zal zijn.

De netto kostprijs voor het plaatsen van een economiser in het geval van Masureel bedraagt € 70 000. Met dit bedrag kunnen we uiteindelijk de terugverdientijd bepalen:

$$t_{terug} = \frac{\text{€ } 70\,000}{\text{€ } 19\,242,22} = 3,64 \text{ jaar}$$

Met een terugverdientijd van 3,64 jaar kunnen we dus stellen dat de investering rendabel is. Om de berekening te vereenvoudigen maakten we volgende tabel in Excel op. Deze combineert alle voorgaande berekeningen en geeft ons een snel en duidelijk overzicht op de terugverdientijd van de investering i.f.v. de uitgespaarde energiekost.

Berekening economiser 10 ton ketel		
Kostprijs economiser	€	70 000
Ketelrendement 10 T	%	90.79
Ketelrendement 10 T economiser	%	94.51
Gasprijs	€/MWh	22.00
Bruto toegevoerd vermogen	MWh/jaar	23 512.00
Rendementsstijging	%	3.72
Uitgespaarde energiehoeveelheid	MWh	874.65
Uitgespaarde energiekost	€	19 242.22
Terugverdientijd investering	jaar	3.64
CO2-besparing	Ton/jaar	176.68

Naast het bepalen van de terugverdientijd is het ook rendabel om te bepalen hoe rendabel de investering is t.o.v. de actuele spaarrente. Indien de rente van de spaarrekening hoger is dan het hoger gerealiseerde rendement van de investering, dan is het aangeraden om de investering niet uit te voeren. Om hiervoor een beeld te kunnen schetsen voeren we een IRR-berekening uit die de investering toetst aan de financiële kant. Als de berekende IRR-waarde groter of gelijk is aan 12 % dan moet de exploitant wettelijk verplicht de investering uitvoeren.

Bijgevolg voeren we dergelijke berekening uit m.b.v. het Excel-berekeningsblad met volgende waarden als resultaat:

In te vullen projectgegevens			
Investering	70.00	k€	
Installatiekosten	0.00	k€	
Levensduur	15	jaar	
Netto besparing per jaar over de looptijd	19.24	k€	
Restwaarde	0.00	k€	
Afschrijvingstermijn	5.0	jaar	
Vennootschapsbelasting	29%	%	

Resultaat van IRR-berekening	
IRR vóór belastingen:	26.7%
IRR na belastingen:	22.2%

Bovenstaande berekening toont aan dat de IRR na belastingen 22,2 % bedraagt. Bijgevolg betekent dit dat de exploitant verplicht is om de voorgestelde energiebesparende maatregel te realiseren. Als men de energiebesparende maatregel zou toepassen, dan zal er naast het verminderde energieverbruik eveneens een lagere CO₂-emissie optreden wat resulteert in een uitstootvermindering van **176,68 Ton CO₂/jaar**.

3.4.2 Economiser 120 °C

Bespaarde energiehoeveelheid

Net zoals de voorgaande berekeningen maken we ook hier gebruik van het rendementsverschil dat we via de energiebalans bekomen hebben, dit keer door de rookgastemperatuur af te koelen naar 120 °C wat overeenkomt met een kleinere economiser die bijgevolg goedkoper zal zijn dan de vorige.

Totaal ketelrendement 10 ton stoomketel	90.79	%	Netto Rend 10 T
Totaal ketelrendement 10 ton stoomketel	94.11	%	Netto Rend 10 T

In dit geval hebben we dus te maken met een rendementsstijging van **3,32 %**.

Dit omgerekend naar energiehoeveelheid heeft volgende waarde:

$$Q_{bespaard} = 0,0332 * 23\,512 \text{ MWh} = 780,60 \text{ MWh}$$

De bruto toegevoerde energiehoeveelheid wordt bepaald door het jaarverbruik aan gas (Monitoringsverslag). Deze bedroeg voor het jaar 2018: 23 512 MWh/jaar.

Bespaarde energiekost

Om nu de uitgespaarde energiekost te gaan bepalen, moeten we rekening houden met de gasprijs. Daar deze sterk schommelt in stijgende lijn, houden we rekening met een gemiddelde van € 22/MWh. In deze situatie wordt dat dan:

$$\epsilon_{bespaard} = 780,60 \text{ MWh} * \frac{\text{€ } 22}{\text{MWh}} = \text{€ } 17\,173,16$$

Terugverdiëntijd

De terugverdiëntijd is een factor die aantoont hoe rendabel een investering is t.o.v. de uitgespaarde energiekost. Als de terugverdiëntijd kort is kan men stellen dat men met een rendabele investering te maken heeft. Is de terugverdiëntijd echter lang, dan kan men concluderen dat de investering niet rendabel zal zijn.

De netto kostprijs voor het plaatsen van een economiser in het geval van Masureel bedraagt € 65 000. Met dit bedrag kunnen we uiteindelijk de terugverdiëntijd bepalen:

$$t_{terug} = \frac{\text{€ } 65\,000}{\text{€ } 17\,173,16} = 3,78 \text{ jaar}$$

Met een terugverdiëntijd van 3,78 jaar kunnen we dus stellen dat de investering rendabel is.

Indien we deze gegevens in Excel ingeven bekomen we volgend resultaat:

Berekening economiser 10 ton ketel		
Kostprijs economiser	€	65 000
Ketelrendement 10 T	%	90.79
Ketelrendement 10 T economiser	%	94.11
Gasprijs	€/MWh	22.00
Bruto toegevoerd vermogen	MWh/jaar	23 512.00
Rendementsstijging	%	3.32
Uitgespaarde energiehoeveelheid	MWh	780.60
Uitgespaarde energiekost	€	17 173.16
Terugverdiëntijd investering	jaar	3.78
CO2-besparing	Ton/jaar	157.68

Naast het bepalen van de terugverdientijd bepalen we eveneens de rendabiliteit van de investering i.f.v. de actuele rente op de spaarrekening. Hiervoor vullen we opnieuw de gegevens in de tabel in en berekenen we het resultaat van de IRR-berekening:

In te vullen projectgegevens			
Investering	65.00	k€	
Installatiekosten	0.00	k€	
Levensduur	15	jaar	
Netto besparing per jaar over de looptijd	17.17	k€	
Restwaarde	0.00	k€	
Afschrijvingstermijn	5.0	jaar	
Vennootschapsbelasting	29%	%	

Resultaat van IRR-berekening	
IRR vóór belastingen:	25.5%
IRR na belastingen:	21.3%

Bovenstaande berekening toont aan dat de IRR na belastingen 21,3 % bedraagt.

Bijgevolg betekent dit dat ook bij deze dimensionering van de economiser, de exploitant verplicht is om de voorgestelde energiebesparende maatregel te realiseren.

Als men de energiebesparende maatregel zou toepassen, dan zal er naast het verminderde energieverbruik eveneens een lagere CO2-emissie optreden wat resulteert in een uitstootvermindering van **157,68 Ton CO2/jaar**.

Besluit

Er zijn heel wat energiebesparende maatregelen toepasbaar in de stoomtechnologie. Maar om deze praktisch toe te passen, moeten er door de bedrijven vaak grote kosten worden gemaakt. Door het echter aantonen van de rendabiliteit en de terugverdientijd van dergelijke energiebesparende investeringen, kan men aantonen dat de investering wel degelijk rendabel is en bijgevolg uitvoerbaar is.

Op die manier kan het bedrijf op termijn besparen op zijn energiekosten en wordt het leefmilieu minder belast door de lagere emissies.

Wat de huurketels betreft, moeten we er telkens goed voor zorgen dat de waterkwaliteit steeds goed wordt opgevolgd. Een slechte waterkwaliteit ligt namelijk aan de basis van de meest voorkomende problemen in het ketelhuis, het leidingnet en de appendages.

Door de opvolging te digitaliseren en de klant er toe aan te zetten de te meten parameters goed op te volgen, kunnen we deze problemen ten alle tijden vermijden.

Zo zorgen wij bij Callens samen met de exploitant voor een installatie die steeds zo optimaal mogelijk werkt.

Bibliografie

2BLONDS V.O.F. (sd). <https://www.alurvs.nl/roestvast-staal/artikellijst/5493/>. Opgehaald van www.alurvs.be: www.alurvs.be

Bureau voor Normalisatie. (2011). Geregistreerde belgische norm NBN EN 12953-6. In B. v. normalisatie, *Vlampijpketels - Deel 6: Eisen voor uitrusting voor de ketel* (p. 55). Brussel, België: Bureau voor Normalisatie.

Burgemeestersconvenant. (2019). *Emissiefactoren*. Brussel: Burgemeestersconvenant. Opgehaald van Bijlage bij de instructies voor de invulling van het SEAP-formulier.

Celsius. (sd). *Theorie*. Opgehaald van Celsiusprocessing: <http://www.celsiusprocessing.com/NL/theory.php>

Clusta. (2019, Mei). *Microbiologisch geïnduceerde corrosie (MIC) - Corrosiefiche 4*. Opgehaald van corrosie info: <https://www.corrosie.info/info-downloads/>

Dhulster, R., & Maes, E. (2019). *Voortraject: Casestudies stoomtechnologie*. Waregem: Callens.

Duinkerken, N. (2006). *Het ketelhuis - productie en gebruik van stoom in de praktijk*. Den Haag: Adviesbureau SAM BV.

flowmeters.nl. (2019, mei 9). *Vortex meters*. Opgehaald van Meettechnieken : <https://www.flowmeters.nl/meettechnieken/vortexmeters>

KSB. (2019, Mei). *Producten en service/automatisering-pompen/pumpmeter*. Opgehaald van www.ksb.com/ksb-nl: https://www.ksb.com/ksb-nl/Producten_en_service/automatisering-pompen/pumpmeter/

Lever kunststoftechniek. (2019, maart 29). *RVS 304 en 316 corrosie chloor*. Opgehaald van leverkunststoftechniek: <https://www.leverkunststoftechniek.nl/abc-register/c/corrosie-spanningscorrosie/rvs-304-en-316-corrosie-chloor/>

Linden, J. v. (2014). *De prijs van elektriciteit en aardgas voor ondernemingen in België*. Brussel: Federaal Planbureau.

MCB. (2019, 03 29). *MCB-boek online*. Opgehaald van corrosie van roestvast staal : mcbboek.nl/MCB_h06/Corrosie_van_roestvast_staal.htm

Rob Gielissen, K. D. (2006). Stoom - theorie en praktijk. In K. D. Rob Gielissen, *Stoom - theorie en praktijk* (p. 4450). Postbus 23, 7400 GA Deventer: Uitgeverij Nassau.

Schaeffer, P., & Woude, i. (1950). Inwendige aantasting van waterleidingbuizen onder medewerking van sulfaatreducerende bacteriën. *De ingenieur in Indonesië*, 29-30.

TU Delft. (sd). *warmtewisselaars*. Opgehaald van eduweb:
<http://eduweb.eeni.tbm.tudelft.nl/TB241E/?warmtewisselaars>

Weishaupt. (2019). *Industrie branders WK*. Brussel: Weishaupt.

Wikipedia. (2019, januari 6). *Roestvast staal* . Opgehaald van Wikipedia:
https://nl.wikipedia.org/wiki/Roestvast_staal

WTCB. (2013). Rapport nr. 14. *Ontwerp en dimensionering van centrale verwarmingsinstallaties met warm water*, 254.

Bijlagen

A - Checklist voor werken en onderhoud aan stoomketels

Wij verwijzen naar de begeleidende verklarende beschrijving ter specificatie van de aangehaalde items in deze checklijst. Deze checklijst en bijhorende verklarende beschrijving horen steeds samen.

NBN EN 12953-6 (2011) blz. 41 tem 44

Checklist stoomketel

Observatie en testen	Clausule	3 dagen	1 maand	3 maanden	6 maanden	12 maanden	Opmerkingen
Veiligheidskleppen	4.1	O			T		Zie nota 1 en 2
Water niveau indicatie	5.1	T					In vergelijking met begrenzers en controles
Spui-apparaat	4.6	T					-
Kleppen	5.3	O			T		Volgens handleiding fabrikant
Voedingswatercontrole	5.5	O			T		
Laagwater beveiliging	5.6.1	O	T				Functionele controle door het verlagen waterniveau tot schakelpunt
Stoomdruk en temperatuurindicatie	5.2	O					In vergelijking met begrenzers en controles

Max druk pressostaat	5.6.2	O	T				Functionele test door het verhogen van de druk tot schakelpunt
Max temperatuur	5.6.3	O	T				-
Toestellen voor bewaking waterkwaliteit	4.8	O	T (1)		T (2)		(1) Vergelijking van de gemeten waarden met de betrouwbare monsters (zie 4.7.2) (2) Uitgevoerd door een geschikt en bekwaam persoon
Beveiligingssystemen	4.3	O			T (3)		(3) Elektrisch en mechanisch getest door een geschikt en bekwaam persoon
Druk onderdelen (leidingen, inspectie-openingen, pakkingen, dichtingen)	-		O				
Druk en temperatuur controllers	4.4.1	O			T		
Voedingswatertoevoer	5.4	O		T			
Waterkwaliteit	4.7	T (4)					(4) zie EN 12953-10
Warmtetoevoer	4.4	O				T	(5) Uitgevoerd door een bekwaam en geschikt

						(5)	persoon volgens de fabriekshandleiding maar niet minder dan eenmaal per jaar
--	--	--	--	--	--	-----	--

Checklist heet water ketel

Observatie en testen	Clausule	3 dagen	1 maand	3 maanden	6 maanden	12 maanden	Opmerkingen
Veiligheidskleppe n	4.1	O			T		Zie nota 1 en 2
Waterniveau indicatie	6.4	O					-
Spui-apparaat uur	4.6	O					-
Ontluchtingsventi elen	6.6	O			T		Volgens fabrieksvoorscri ften
Laag water beveiliging	6.5.1	O		T			Mag uitgevoerd worden door simulatie volgens 4.3.3
Druk en temperatuur indicatie	6.7	O					In vergelijking met begrenzers en controles
Max druk pressosstaat	6.5.2	O		T			Mag uitgevoerd worden door simulatie volgens 4.3.3
Max temperatuur	6.5.2	O		T			Mag uitgevoerd worden door

							simulatie volgens 4.3.3
Max circulatie	6.5.3	O	T				-
Toestellen voor bewaken waterkwaliteit	4.8.3	O	T (1)		T (2)		(1) Vergelijking van de gemeten waarden met de betrouwbare monsters (zie 4.7.2) (2) Uitgevoerd door een geschikt en bekwaam persoon
Beveiligingssyste men	4.3	O			T (3)		(3) Elektrisch en mechanisch getest door een geschikt en bekwaam persoon
Druk onderdelen (leidingen, inspectie-openingen, pakkingen, dichtingen)	-		O				-
Druk en temperatuur controllers	4.4.1 6.8	O			T		-
Watertoevoer	6.3	O		T			-
Waterkwaliteit	4.7		T (4)				(4) zie EN 12953-10

Warmtetoevoer	4.4	O				T (5)	(5) Uitgevoerd door een bekwaam en geschikt persoon volgens de fabriekshandleiding maar niet minder dan eenmaal per jaar
---------------	-----	---	--	--	--	----------	--

O: Observatie van abnormaal gedrag: lawaaivorming, geuren en ander merkbare factoren

T: Controleren en/of testen van de functionele werking van de onderdelen/appendages inclusief observatie.

Nota 1: Extra testen en observaties kunnen opgelegd worden door nationale eisen, derde partijen of de fabrikant.

Nota 2: Verschuivingen van de testperiodes zijn mogelijk mits toestemming van een derde partij en als de veiligheid niet in het gedrang komt.

☛ Wij verwijzen naar de handleidingen en de technische documentatie aanwezig in het dossier ter aanvulling en verdere beschrijving van de onderdelen in de hieronder beschreven item

B - Technische fiche Pumpmeter (KSB)

PumpMeter – Monitoringunit voor pompen

Informatief

- Zuigdruk, persdruk en verschildruk of opvoerhoogte worden afwisselend op de display getoond.
- Berekening en directe aanduiding van het actuele bedrijfspunt.
- Samenstelling van een belastingsprofiel door het samenvoegen van alle gegevens in de loop van het pompbedrijf.

Energie-efficiënt

Bij een significant besparingspotentieel van de pomp: aanduiding van het energie-efficiency-icoon (EFF) op het display.

Eenvoudig

Eenvoudige inbedrijfname van de pomp en de monitoringunit door standaard montage vanaf de fabriek.

Voordelig

PumpMeter is met al zijn mogelijkheden goedkoper dan traditionele meetapparatuur zoals manometers of druktransmitters en de bijbehorende montage.



Onze KSB adviseurs ondersteunen u graag bij het interpreteren van de aangeduide bedrijfsgegevens en tonen u op welke wijze u de energiebesparingsmogelijkheden optimaal kunt benutten.

Aanduiding in het display	Interpretatie van het actuele bedrijfspunt	
	Zeer laag debiet, mogelijk geen doorstroming. *	Noodzaak tot Ingrijpen bij langdurig bedrijf in dit gebied.
	Laag debiet. *	Optimalisatiebehoefte op langere termijn.
	Optimaal bedrijfspunt.	De pomp werkt optimaal
	Te groot debiet, mogelijk boven het maximum.	Ingrijpen nodig bij langdurig bedrijf in dit gebied.

*Afhankelijk van de specifieke pompgrafiek worden bij het bedrijf in deellast de eerste twee kwanten van de grafiek niet gedifferentieerd. De betreffende segmenten van de grafiek worden tegelijkertijd getoond.

Aanduiding in het display	belastingsprofiel (voorbeeld)	Advies
	Bedrijf in of rond het optimale bedrijfspunt.	Geen aanpassing noodzakelijk. De pomp functioneert normaal.
	Bedrijfspunt beweegt zich in een breed gebied van de grafiek.	Optimaliseringsmaatregelen voor het benutten van het significante besparingspotentieel, b.v. traploze toerenregeling.
	Bedrijf in het grensgebied met risico op overbelasting van de pomp en/of motor.	Optimaliseringsmaatregel afgedraaide waaijer voor vergroting van beschikbaarheid en energie-efficiency.

4072.022-51 / 11.10 / Technische wijzigingen voorbehouden.

C – Rapport revisie pompen Ecofrost



Rapport revisie pomp Ecofrost

Inleiding

Naar aanleiding van de cavitatieproblematiek te Ecofrost, werd er beslist om vroegtijdig de oudste pomp ter controle te laten reviseren door KSB. Met deze revisie proberen we meer inzicht te krijgen in het schadebeeld van de pompbehuizing en de waaiers. We willen namelijk te weten komen of dat de nieuwe pomp al schade t.g.v. cavitatie heeft opgelopen.

Bespreken bevindingen pomp

Op 27 mei 2019 spraken we af bij de service afdeling te KSB in Sint-Gillis-Waas om de gedemonteerde pomp te bekijken. Op onderstaande afbeeldingen kunt u zien hoe het pomphuis alsook de verschillende waaiers er na ongeveer 6 maanden draaitijd uitzien:



Figuur 1: Pompwaaiers na demontage



Figuur 2: Pomphuis gedemonteerd

Een eerste vaststelling die we zien bij de eerste waaier, is dat er een lichte aanslag van een roestbruine kleur aanwezig is op de waaiers, volgens de verantwoordelijke Matthias Maes van KSB is dit te wijten aan de aanwezigheid van stilstaand water tijdens transport. Dit kan eenvoudig worden bevestigd doordat deze roestvorming zich enkel vertoont tot aan de waterlijn waar het stilstaande water heeft gestaan.



Figuur 3: Gele neerslag aan eerste waaier

We bekeken elke waaier nu aandachtig op vermoedelijke sporen van cavitatie. Mocht er cavitatie opgetreden zijn, dan zouden we dit duidelijk moeten zien aan de eerste waaier. Als vergelijking nemen we er de waaier bij tijdens de periode van cavitatie. Deze pomp heeft 2 jaar gewerkt.

Onderstaande afbeeldingen tonen ons het schadebeeld van een gecaviteerde pompwaaier (links) en de recente waaier van de onlangs gereviseerde pomp die 6 maanden heeft gewerkt (rechts).



Figuur 4: Pompwaaier met cavitatie na 2 jaar werking



Figuur 5: Pompwaaier bij laatste controle na 6 maanden werking



Figuur 6: Cavitatie uittrede waaier na 2 jaar werking



Figuur 7: Uittrede waaier laatste toestand na 6 maanden werking

We merken bij de linkse foto's zeer duidelijk dat de cavitatieschade van de pomp al zeer ver gevorderd is. Bij de laatste controle zien we duidelijk dat de pomp nog geen ernstige verschijnselen van cavitatie vertoont. Om toch cavitatie in de toekomst te vermijden, zullen we een pumpmeter voorzien van KSB. Woensdag 5 juni komen we langs met Yves Sarek van KSB om deze pump meter te plaatsen. Dit toestel zal de pomp bewaken en ons ten allen tijden laten weten in welk gebied de pomp draait. Vervolgens zal het de bedoeling zijn om a.d.h.v. de uitgestuurde waarde van de pumpmeter en de programmatie van de PLC, de pompen eventueel uit te schakelen als deze een te lange tijd in cavitatiegebied draaien.

Een volgend punt die onze aandacht trekt, is de grote afzetting op de waaiers. Op nevenstaande afbeelding merken we een rode kleur op in het midden, maar zien we aan de buitenranden sterke afzetting van mineralen. De afzetting vormt een dikke zwarte laag op het materiaal. Als we de laag bekijken lijkt het op een poedervorm van kleine grafietkorrels. We zien de afzetting van grafiet ook op de pomp as (middelste afbeelding). De rode kleur is de originele kleur van de waaier zoals op de rechtse afbeelding te zien is.



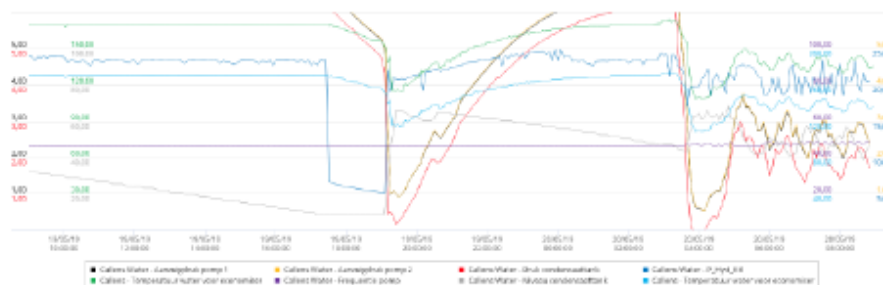
Figuur 8: Afzetting op pompwaaier

Besluit

Na inspectie en revisie van de pompwaaiers door KSB hebben we opgemerkt dat de waaiers (na 6 maanden draaitijd) nog in goede conditie zijn. Wel zagen we dat er zich minuscule kleine putjes vormen aan de zijwanden van de waaervinnen. Het is nu de vraag of deze putjes gevormd zijn ten gevolge van cavitatie of door corrosie. Verder onderzoek zal dit nog moeten uitwijzen (pumpmeter).

Wat we wel weten is dat er bij opstart van de fabriek (Ecofrost) er mogelijk nog steeds cavitatiesituaties voordoen. (Zie afbeelding)

De afzetting op de pompwaaiers trekt ook onze aandacht, die we zeker verder zullen opvolgen. We zullen de waterbehandelaar contacteren hiervoor en verder onderzoek uitvoeren.



Figuur 9: Mogelijke pompcavitatie

D – Formules energiebalans Masureel

15 Ton stoomketel

$T_{15T} = P > T[90]$ (Excel Koen)

Oproepen van de temperatuur bij de gegeven keteldruk

8,000	170,4339379
9,000	175,3787849
10,000	179,9072886
11,000	184,0921464
12,000	187,9880169
13,000	191,6371027
14,000	195,0727145
15,000	198,321637
16,000	201,4057517

1) Bruto toegevoerd vermogen gas 15 ton stoomketel (kWh brut 15T)

$$\text{kWh brut 15T} = Q_{\text{gas15T}} m^3 * \frac{P_{\text{gas15T}} + 1,013}{1,013} * \frac{273,15}{273,15 + \text{Temp}_{\text{gas}}} * 0,903 * \text{BVW}_{\text{gas}}$$

2) Verbrandingsrendement 15 ton stoomketel

$$\text{Verbr rend 15T} = 100 - (R_{\text{G temp 15T}} - \text{Temp}_{\text{VBLucht}}) * \frac{0,66}{20,9 - 0,2 \text{ 15T}} + 0,009$$

3) Stoomdebiet 15 ton stoomketel

$$Q_{\text{stoom 15T}} = \frac{(\text{kWh brut 15T} - \text{kWh spui 15T} - \text{kWh Isol 15T} - \text{kWh RG 15T}) * 3600}{Dh \text{ 15T}}$$

4) Spuidebiet 15 ton stoomketel

$$Q_{\text{spui 15T}} = Q_{\text{stoom 15T}} * \left(\frac{\mu S_{\text{Bache}}}{\mu S_{\text{15T}} - \mu S_{\text{Bache}}} \right)$$

5) Debiet ketelvoedingswater

$$Q_{\text{ketelwater}} = \frac{Q_{\text{stoom 15T}} + Q_{\text{spui 15T}} + Q_{\text{stoom 10T}} + Q_{\text{spui 10T}}}{v h_{\text{Cwtr}} (\text{excel koen})}$$

6) Energie water 15 ton stoomketel

$$E_{\text{water 15T}} = \frac{(Q_{\text{stoom 15T}} + Q_{\text{spui 15T}}) * h_{2\text{ bache}}}{3600}$$

7) Energie stoom 15 ton stoomketel

$$E_{\text{stoom 15 T}} = \frac{(Q_{\text{stoom 15T}} + h_{15T})}{3600}$$

8) m³/h retour stoomcondensaat

$$Q_{\text{cond}} = Q_{\text{ketelwater}} - Q_{\text{ro}}$$

9) % retour stoomcondensaat

$$\% \text{ cond} = \frac{Q_{\text{cond}}}{Q_{\text{cond}} + Q_{\text{ro}}}$$

10) Enthalpie 15 ton stoomketel

$$h_{15T} = \text{Enth_St}(150) \text{ (excel Koen)}$$

11) Vloeistofwarmte spui 15 ton stoomketel

$$h_{1\text{ 15T}} = SW@T^{\circ}[T^{\circ}_{15T}] * T^{\circ}_{15T} \text{ (excel Koen)}$$

12) Spuiverliezen 15 ton stoomketel

$$kWh_{\text{spui 15T}} = \left(\frac{\% \text{ Spui lost}}{100} \right) * kWh_{\text{brut 15T}}$$

13) Isolatieverliezen 15 ton stoomketel

$$kWh_{\text{isol 15T}} = \left(\frac{\% \text{ Iso lost}}{100} \right) * kWh_{\text{brut 15T}}$$

14) Rookgasverliezen 15 ton stoomketel

$$kWh_{\text{RG 15T}} = (kWh_{\text{brut 15T}} - kWh_{\text{isol 15T}}) * \frac{100 - \text{verbr rend 15T}}{100}$$

15) Vloeistofwarmte ketelvoedingswater

$$h_{2\text{ bache}} = SW@T^{\circ}[Temp_{\text{Ro}}] * Temp_{\text{Ro}}$$

16) Netto toe te voeren energie voor 1 kg stoomaanmaak 15 ton stoomketel

$$Dh\ 15T = h\ 15T - h_2\ bache$$

17) Netto stoomproductie 15 ton stoomketel

$$Q_{stoom\ 15T} = \frac{(kWh\ brut\ 15T - kWh\ spui\ 15T - kWh\ Isol\ 15T - kWh\ RG\ 15T) * 3600}{Dh\ 15T}$$
$$1000$$

18) Totaal ketelrendement 15 ton stoomketel

$$Netto\ Rend\ 15T = \frac{(E\ stoom\ 15T)}{(kWh\ brut\ 15T + E\ water\ 15T)} * 100$$

