



BILFINGER

Opdrachtgever: **Mitsubishi Gas Chemical Company, Inc.**
Project: **MXDA-fabriek**

Energiestudie MXDA-fabriek [OPENBAAR]

Bilfinger Tebodin Netherlands B.V.

Spoorstraat 7
3112 HD Schiedam
Postbus 922
3100 AX Schiedam
Nederland

Auteur: Roel Tolle / Youri Nauta / Mark Elderman

- Telefoon: +31 (0) 626 1480 07
- E-mail: roel.tolle@bilfinger.com

22 juli 2021

Ordernummer: 54275.02

Documentnummer: 3212101 [openbaar]

Revisie: D [openbaar]



BILFINGER

D [openbaar]	22/07/2021	Openbare versie voor indiening	RoBo	MVHL
D	10/03/2021	Aanpassingen mbt tracing, koeling en verwarming	RTLE	MVHL
C	27/11/2020	Tekstuele aanpassingen	MVHL	RBTB
B	20/11/2020	Nederlandstalige versie	YNTA	RTLE
A	09/07/2020	Commentaar MGC verwerkt	RTLE	KP
0	01/07/2020	Eerste uitgave voor commentaar	YNTA / RTLE	MELN
Rev.	Datum	Omschrijving	Auteur	Gecontroleerd

© Copyright Bilfinger Tebodin

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means without permission of the publisher.



BILFINGER

Inhoud

Samenvatting	5
1 Inleiding	7
2 Pinch-analyse	10
2.1 Inleiding in pinch-analyse	10
2.2 Uitgangspunten	10
2.2.1 Gebruikte gegevens	10
2.2.2 Proces-stromen en gebruikte tools	10
2.3 "Deep dive" in incinerator	10
2.4 Pinch-analyse	11
2.5 Maximaal restwarmtepotentieel	11
2.6 Optimalisatie en voorgestelde aanpassingen	12
3 Toepassing van een stoomexpansiesysteem	13
3.1 Uitgangspunten	13
3.2 Stoommotor	15
3.3 Stoomturbine	17
3.4 Multicriteria-analyse – Kesselring-methode	20
3.5 Financiële vergelijking	21
3.5.1 Investerings	21
3.5.2 Haalbaarheidsberekening	22
3.6 Conclusie	25
4 Separate koeltorens voor de chiller plant	26
4.1 Uitgangspunten	27
4.2 Berekening	28
4.3 Conclusie	28
5 Stoomtracing versus elektrische tracing	29
5.1 Uitgangspunten	29
5.2 Energiebesparing	29
5.3 Investerings	29
5.4 Conclusie	30
6 Integratie van gebouwgebonden koeling met chilled water systeem	31
6.1 Uitgangspunten	31
6.2 Energiebesparing	32
6.3 Investerings	32
6.4 Conclusie	32
7 Gebouwgebonden verwarming met restwarmte of warmtepomp	33
7.1 Uitgangspunten	33
7.2 Energiebesparing	35
7.3 Investerings	35
7.4 Conclusie	36
8 Eindconclusie	37



BILFINGER

Bijlagen

Bijlage 1	Input proces stromen pinch studie MDXA plant <i>[vertrouwelijk]</i>
Bijlage 2	Gedetailleerde stoombalans <i>[vertrouwelijk]</i>
Bijlage 3	Incinerator model Case 3 <i>[vertrouwelijk]</i>
Bijlage 4	Stoommotor/generator set (Spilling)
Bijlage 5	Stoomturbine (Spilling)
Bijlage 6	Multi criteria analyse methode – Kesselring methode
Bijlage 7	Berekening separate koeltoren vs centrale gekoeld watersysteem
Bijlage 8	Berekening restwarmtebenutting gebouwgebonden verwarming <i>[vertrouwelijk]</i>
Bijlage 9	Indicatieve CAPEX vergelijking <i>[vertrouwelijk]</i>
Bijlage 10	Pinch-analyse <i>[vertrouwelijk]</i>
Bijlage 11	Massa- en warmtebalans stoomexpansiesysteem <i>[vertrouwelijk]</i>
Bijlage 12	PFD Stoommotor <i>[vertrouwelijk]</i>
Bijlage 13	PFD Stoomturbine <i>[vertrouwelijk]</i>
Bijlage 14	Stoomtracing versus elektrische tracing <i>[vertrouwelijk]</i>



BILFINGER

Samenvatting

Voor de nieuwe Mitsubishi MXDA-fabriek die op de Huntsman-site zal worden gebouwd, is Bilfinger Tebodin benaderd om een energiestudie uit te voeren. Het belangrijkste doel was om een indicatie te geven van de huidige energie-efficiëntie van de MXDA-fabriek en om suggesties te doen voor energiebesparende maatregelen.

In deze rapportage zijn de bevindingen omschreven, waarbij de volgende analyses zijn verricht:

- Een pinch-analyse waarbij de warme en koude stromen in beeld zijn gebracht in hoofdstuk 2;
- De toepassing van een stoomexpansiesysteem voor het compenseren van exergieverlies na stoomdrukverlaging in hoofdstuk 3;
- Koelmachines voorzien van een separaat koeltorensysteem voor een verbetering van de seizoensgemiddelde COP in hoofdstuk 4;
- Een vergelijking in de toepassing van stoom tracing ten opzichte van elektrische tracing in hoofdstuk 5;
- De integratie van gebouwgebonden koeling met het centrale chilled watersysteem in hoofdstuk 6
- Inzet van proces restwarmte of water/water warmtepomp voor gebouwverwarming, in hoofdstuk 7.

Uit de bovengenoemde deelstudies is de volgende conclusie te trekken.

Uit de pinch-analyse is af te leiden dat de nieuwe MXDA plant zelfvoorzienend is in de warmtevoorziening. Dit komt door de grote hoeveelheid exotherme warmtestroomafgifte op een hoog temperatuurniveau van de incinerator (verbrander) en de ammoxidation reactor. De externe warmtebehoefte is hierdoor ook nihil (enkel ter aanvulling tijdens maximaal bedrijf en opstart). Dit betekent dat energiebesparende of duurzame maatregelen op het gebied van de warmtevoorziening voor het proces niet van toepassing is.

Echter, de pinch-analyse laat zien dat er een groot temperatuurverschil is tussen de op te warmen processtromen en af te koelen processtromen. Dit heeft als gevolg een hoog exergieverlies. Nadere analyse wijst uit, dat dit exergieverlies zich met name manifesteert in de reductie van stoomdruk van hogere naar lagere druk. Om het exergieverlies door stoomdrukreductie te compenseren, kan gebruik worden gemaakt van een stoomexpansiesysteem, zoals een stoommotor of stoomturbine. Hiermee kan elektriciteit worden opgewekt. Een ééntraps stoomturbine met een straalbuisgroep geregelde vermogensregeling verdient de voorkeur boven een stoommotor. Hiermee kan een groot vermogen van circa 1 MW elektriciteit worden opgewekt. Op jaarbasis is dit gelijk aan circa 5.300 tot 5.700 MWh elektrische energie. Echter na expansie ontstaat er natte stoom aan de lagedrukzijde, welke extern aangevuld dient te worden. Dit is een forse hoeveelheid op jaarbasis, en om deze reden wordt de toepassing van een stoomexpansiesysteem, met een terugverdientijd van 11 tot 13 jaar, niet als haalbaar beschouwd.

De pinch-analyse laat zien dat er wel een externe koudebehoefte (koeling) nodig is. In die zin kan de inzet van energiebesparende maatregelen of duurzame maatregelen op het gebied van koudevoorziening wel nuttig zijn. In dit kader is gekozen om de chiller plant te voorzien van een separate specifieke koeltoren per koelmachine, in plaats van een aansluiting op het centrale gekoeld watersysteem. Dit geeft een aanzienlijke gemiddelde jaarlijkse rendementsverbetering en daarmee een energiebesparing op elektriciteit van 1.300 MWh. De terugverdientijd van deze maatregel bedraagt hierdoor 2,5 jaar. Deze energiebesparende maatregel is toegepast in het installatietechnische ontwerp.

Door de toepassing van stoomtracing kan jaarlijks 2.591 MWh/jaar worden bespaard ten opzichte van de toepassing van elektrische tracing (als referentie). De besparing op de energiekosten bedragen 146.000 euro/jaar in vergelijking met elektrische tracing. Bij een meerinvestering van 276.000 euro is de terugverdientijd lager dan 2 jaar. Stoom tracing wordt daarom toegepast in plaats van elektrische tracing.



BILFINGER

De gebouwgebonden koeling van de centrale regelkamer (CCB) en de MCC ruimten kunnen worden geïntegreerd met het centrale chilled water systeem. Het rendement in de opwekking van het chilled water met een jaargemiddelde COP van 8 is hoger dan met luchtgekoelde airconditioning (jaargemiddelde COP van circa 3). De jaarlijkse energiebesparing op elektriciteit bedraagt circa 600 MWh/jaar. De besparing op energiekosten bedraagt hiermee 36.000 euro/jaar. De investering van bovengenoemde integratie ten opzichte van luchtgekoelde airconditioning is gelijkwaardig ($\Delta\text{CAPEX} = 0$ euro). De gebouwgebonden koeling wordt daarom geïntegreerd met het centrale chilled water systeem in het installatietechnisch ontwerp.

Een deel van de externe koudebehoefte op hoger temperatuurniveau is restwarmte, welke ingezet kan worden voor gebouwgebonden verwarming van de centrale regelkamer (CCB) en overige ruimten zoals kantoren. Een alternatief is om gebruik te maken van een water/water warmtepomp welke zijn warmte onttrekt aan het centrale chilled water systeem. Beide maatregelen hebben een energiebesparend effect in vergelijking met de referentie, een lucht/water warmtepomp. De toepassing van een water/water warmtepomp heeft de voorkeur boven het gebruik van restwarmte, omwille van complexiteit, onderhoud en schoonmaak. Om deze redenen wordt de toepassing van een water/water warmtepomp geïmplementeerd in het installatietechnisch ontwerp. Bovendien wordt met deze oplossing extra leveringszekerheid van chilled water verkregen voor de gebouwgebonden koeling. De energiebesparing bedraagt vergeleken met de referentie jaarlijks 80 MWh/jaar, bij een meerinvestering van circa 38.000 euro (= 4.800 euro/jaar). De terugverdientijd is hiermee gelijk aan circa 8 jaar.



BILFINGER

1 Inleiding

Opmerking vooraf: In het ontwerpstadium waarvoor dit document is opgesteld, is een productietijd van 300 dagen per jaar aangehouden. Voor het MER (en de aan te vragen Wabo omgevingsvergunning) wordt een productietijd van 365 dagen per jaar aangehouden. Het uitgangspunt van 300 versus 365 productiedagen levert geen doorslaggevende wijzigingen op voor de analyses in dit document, afgezet ten opzichte van de mate van implementatie zoals verwoord in het MER. Een relevante wijziging als gevolg van het aantal productiedagen treedt wel op in de berekening van de terugverdientijd van het stoomexpansiesysteem – zie paragraaf 3.5.2. Hier wordt dan ook volledigheidshalve de terugverdientijd voor zowel 300 als 365 productiedagen weergegeven: de conclusie wijzigt niet.

Op verzoek van Mitsubishi Gas Chemical (verder MGC) zijn na een eerste studie (zogenoeten “quick scan”) vier geïdentificeerde maatregelen nader uitgewerkt. De bevindingen zijn in dit rapport verwerkt. Dit betreft de onderzoeken zoals hieronder genoemd:

a. Pinch studie

Een pinch-studie is een grafische systematische benadering om het maximale restwarmtepotentieel van een proces te bepalen. Naast het maximale restwarmtepotentieel, kunnen met deze tool de minimaal benodigde voorzieningen voor verwarming en koeling worden bepaald.

b. Toepassing van een stoomexpansiesysteem

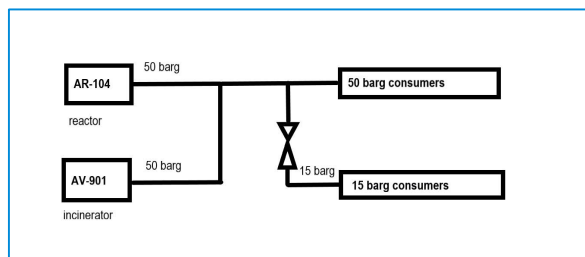
Binnen de MXDA-fabriek wordt stoom op verschillende drukniveaus verbruikt. Door middel van een reduceerstation wordt een hoeveelheid stoom onder hoge druk teruggebracht tot een lagere druk. Door stoomdruk te verminderen, vindt echter een entropietoename plaats, wat zich vertaalt in een exergieverlies. Door de hogedrukstoom in een stoommachine of een stoomturbine te laten expanderen naar een lagere (tegen)druk kan elektriciteit worden opgewekt die direct kan worden gebruikt. Het exergieverlies door het verlagen van de stoomdruk wordt omgezet in bruikbare energie.

Alle berekeningen zijn gebaseerd op de gegevens die door MGC zijn aangeleverd, en zijn gebaseerd op de nominale productiesnelheid (25 kton/jaar = 83,4 ton/dag).

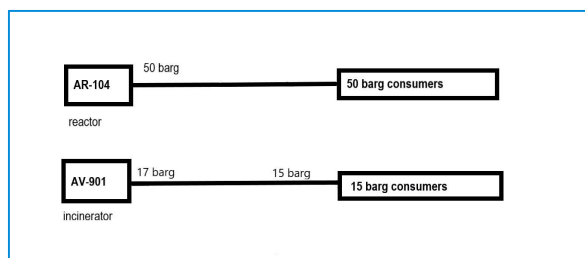
Gedurende het verloop van de engineeringfase zijn er nog studies gaande met betrekking tot de incinerator AV-901. Deze studie heeft betrekking op het type verbrandingsketel (waterpijp of vuurgangvlampijpketel) en de bedrijfsdruk.

Optie 1 (figuur 1.1) is het oorspronkelijke idee. Stoom van 50 barg wordt gegenereerd door de incinerator AV-901 en reactor AR-104. Deze 50 barg hogedruk(HP-)stoom wordt gereduceerd tot een lagere druk voor de 15 barg consumenten. De incinerator is een ketel van het waterpijptype. Als alternatief is ook naar optie 2 (figuur 1.2) gekeken of de incinerator door middel van een vlampijpketel op een lagere werkdruk van 17 barg kan werken.

De gekozen optie is bepalend voor deze studie. De analyse is gebaseerd op **optie 1**.



Figuur 1.1 - Optie 1



Figuur 1.2 – Optie 2

c. Koelmachines voorzien van een separaat koeltoren systeem

De koelmachines worden voorzien van watergekoelde condensators. De condensatorwarmte die vrijkomt bij de koelmachines moet worden afgevoerd door middel van een koelwatersysteem. Dit koelwater kan afkomstig zijn van:

- *een gekoeld watersysteem*, waarbij de koelmachinecondensators worden gekoeld met gekoeld water met een vaste toevoertemperatuur (in dit geval minimaal 26 °C). Het gekoeld water is afkomstig van centrale koeltorens, welke naast de chilled water plant, ook verschillende processen voorziet van gekoeld water, die een minimale gekoelde watertemperatuur vragen.
- *koeltorens welke specifiek voor de koelmachinecondensators worden toegepast*, en lokaal bij de chiller plant zijn geplaatst. Deze koeltorens worden naast of boven op de chiller plant (dak) geplaatst.

Indien de koeltorens specifiek voor de koelmachine condensators worden toegepast, is men niet gelimiteerd aan de minimale toevoertemperatuur van 26 °C. De gekoelde watertemperatuur is in dat geval afhankelijk van de heersende natte bol temperatuur, en wordt daarmee lager dan 26 °C. Door de lagere condensortemperatuur neemt de COP (Coëfficiënt Of Performance¹) van de koelmachines toe, waardoor het jaarlijkse elektrische energieverbruik fors lager is dan in de situatie met een aansluiting op het gekoeld watersysteem. Echter, een investering in lokale koeltorens specifiek voor de koelmachines is uiteraard hoger dan de aansluiting op een centraal gekoeld watersysteem.

d. Stoomtracing of elektrische tracing

Om leidingwerk en proces equipment welke gevuld zijn met vloeibare producten en halfabricaten op temperatuur te houden wordt gebruik gemaakt van tracing. Men kan deze vloeistoffen verwarmen met een elektrische tracing zoals een verwarmingslint, of door middel van een verwarmingsmedium (bijvoorbeeld stoom) door een dunne leiding: stoomtracing. De toepassing van stoom heeft energetisch de voorkeur boven elektrische tracing. De investeringskosten voor stoom tracing zijn echter gemiddeld hoger in vergelijking met elektrische tracing.

¹ De COP (Coefficient of Performance) is de verhouding tussen de hoeveelheid geleverde koude-energie en de hoeveelheid opgenomen energie door de koelmachine = Q_k / P_e .



BILFINGER

e. Integratie van gebouwgebonden koeling met het chilled watersysteem

Gebouwgebonden koeling kan worden voorzien door middel van koelmachines of airconditioning-systemen. In de regel kan hierbij gebruik gemaakt van luchtgekoelde koelmachines of zogeheten split unit-systemen. Daar deze luchtgekoeld zijn, hebben deze systemen een lage COP, en verbruiken hierdoor dus veel elektriciteit. Een andere oplossing is om de gebouwgebonden koeling te integreren met het centrale chilled watersysteem. De seizoengemiddelde COP van het centrale chilled watersysteem is veel hoger ten opzichte van luchtgekoelde koelmachines of airconditioning. Door integratie van de gebouwgebonden koeling met het chilled watersysteem kan daarom jaarlijks veel elektrische energie worden bespaard.

f. Inzet van restwarmte of warmtepomp voor HVAC

Uit de pinch-analyse (zie a.) is af te leiden, dat restwarmte vanuit het proces ingezet kan worden voor gebouwgebonden verwarming. Laagwaardige warmte voor het proces, wordt ingezet als hoogwaardige warmte voor HVAC, waarmee energie wordt bespaard. Daarnaast kan ook een warmtepomp voorzien worden in de gebouwverwarming. De warmtebron bij een lucht/water-warmtepomp is de buitenlucht. Bij toepassing van een water/water-warmtepomp kan gebruik worden gemaakt van een andere (rest)warmtebron. Door het onttrekken van deze warmte aan de verdamperzijde, koelt deze af. Specifiek in dit kader van dit project is als warmtebron van de water/water-warmtepomp het chilled watersysteem gekozen. Tijdens verwarmingsbedrijf, wordt het chilled water-circuit welke als warmtebron dient voor de warmtepomp afgekoeld. Hierdoor wordt gelijktijdig dus ook bespaard op de benodigde energie voor koeling.

2 Pinch-analyse

2.1 Inleiding in pinch-analyse

Een pinch-analyse is een grafische systematische benadering om de potentiële maximale warmte-integratie van een proces te bepalen. Het doel van een pinch-onderzoek is om:

- een indicatie te geven van het maximale (rest)warmtepotentieel voor het optimaliseren van restwarmterugwinning;
- een proces zo ontwerpen dat het optimaal gebruik maakt van de energie die in het proces zelf beschikbaar is;
- de minimaal benodigde verwarming en koeling aangeven en het kwaliteitsniveau van de benodigde voorzieningen optimaliseren met het oog op het minimaliseren van energie- en kapitaalkosten.

2.2 Uitgangspunten

2.2.1 Gebruikte gegevens

De pinch-analyse is gebaseerd op gegevens voortkomend van het stromingsdiagram, massa-energiebalans en de samenvatting van de utilities.

De analyse en stromen zijn gebaseerd op nominale productiegegevens (83,4 ton/dag MDXA-productie).

2.2.2 Proces-stromen en gebruikte tools

Voor het opzetten van de pinch-analyse is het noodzakelijk om eerst de energiestromen binnen het proces te analyseren. Om een goed overzicht te krijgen van de mogelijkheden voor warmte-integratie worden alleen de processtromen gebruikt in de analyse. De externe stromen voor verwarming en koeling worden niet toegevoegd in de analyse. Daardoor zal de analyse de theoretisch minimaal vereiste koel- en verwarmingsvraag laten zien, evenals de theoretisch maximale warmte-integratie die mogelijk is.

Het programma dat wordt gebruikt voor de pinch-analyse heet *Heatit*, een op Excel gebaseerd programma dat automatisch allerlei soorten grafieken kan genereren, zoals zogeheten TQ-diagrammen met samengestelde curves voor de warme en koude processtromen. De bijna 40 gespecificeerde processtromen en hun specifieke input inclusief een processchema zijn weergegeven in Bijlage 1.

2.3 “Deep dive” in incinerator

Zoals eerder in de inleiding toegelicht, werd tijdens de uitvoering van de energiestudie nog nader onderzoek gedaan naar de implementatie van de incinerator. Voor de uitgangspunten voor deze pinch-analyse met betrekking tot de verbrandingsoven AV-901 wordt het zogenaamde “Case 3”-scenario gehanteerd. Zie voor het Case 3 incinerator-model ook het processtroomschema met berekeningen in Bijlage 3.

In “Case 3” scenario wordt de verbrandingsoven gevoed met de volgende afvalstromen:

- vloeibare HC (koolwaterstof) afgewerkte oliestroom (428 ton/uur, of 0,12 kg/s met een veronderstelde verbrandingswaarde van 42 MJ/kg), gelijk aan een brandstoftoevoer van circa 5 MW;
- een afvoergasstroom (19 ton/u, voornamelijk N₂, maar ook sporen van HC en NH₃) gelijk aan een brandstoftoevoer van 2,2 MW;
- geen toevoer van verontreinigd afvalwater in Case 3.

Het resultaat is dat de incinerator een bijkomende aardgasinput van 3,25 MW nodig heeft om een oven(uitlaat)temperatuur van 950 °C te verkrijgen terwijl 5% O₂ in het rookgas zit. Door het rookgas af te koelen tot 135 °C schoorsteentemperatuur ontstaat er een stoomopwekkingspotentieel van **9,5 MW** (14,6 ton/uur). Dit kan worden gerealiseerd met behulp van een



BILFINGER

stoomrecuperatieketel van 52 barg of 17 barg. De feitelijke stoomdruk heeft nauwelijks invloed op de warmteterugwinning. Case 3 zal het uitgangsscenario zijn voor de pinch-analyse².

2.4 Pinch-analyse

In de pinch-analyse zoals opgenomen in bijlage 10, zijn de berekeningen uitgewerkt en is aanvullende informatie gegeven met betrekking tot de pinch-analyse. Van alle data en grafische representaties geven de zogeheten samengestelde curves ("composite curves") inzicht in de data op een leesbare wijze.

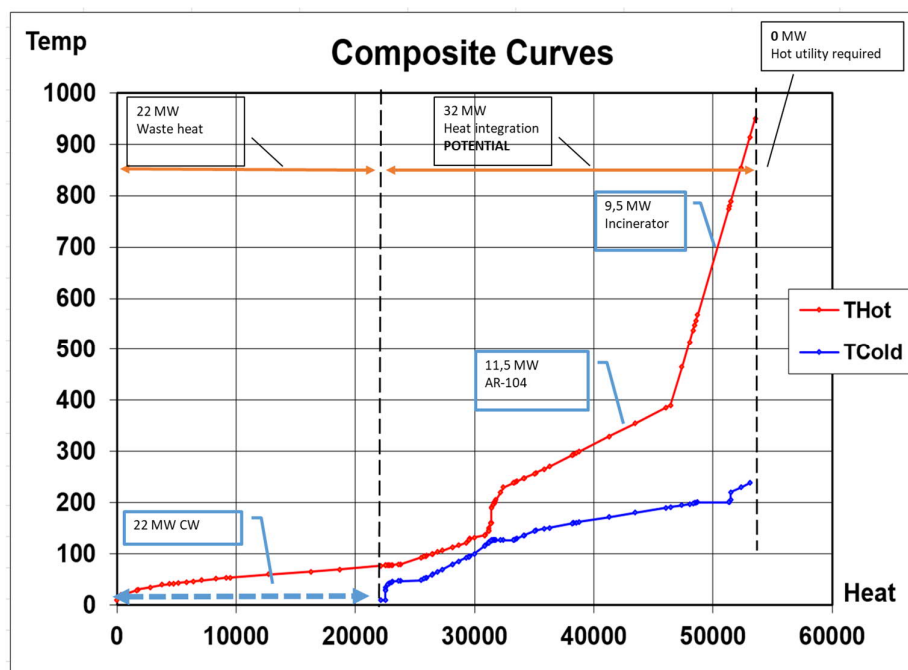
2.5 Maximaal restwarmtepotentieel

Figuur 2.1 geeft de samengestelde warme en koude curve van de MXDA-fabriek in een TQ diagram. De y-as representeert het temperatuurniveau van de samengestelde curves in graden Celsius (°C), en de x-as representeert het vermogen in kW.

Uit het TQ-diagram is het volgende af te leiden:

Berekende capaciteit van de incinerator (AV-901): 9,5 MWth (Case 3 → rookgaskoeling van 950 °C naar 135 °C)
 Berekende capaciteit reactor (AE-104 + AE-105): 11,5 MWth (exotherme reactie warmte in de ammoxidatie-reactor).

Benodigde externe warmte: 0 MWth
 Warmte integratie potentieel: 32 MWth
 Benodigde externe koeling (restwarmtepotentieel): 22 MWth³



Figuur 2.1 – Samengestelde curves MXDA plant

² In Case 4 wordt een extra afvalwaterstroom van 1 ton/u naar de verbrandingsoven geloosd. Dit resulteert in een toename van het aardgasverbruik (totaal 5,95 MW) en de rookgasstroom en bijgevolg een groter stoomopwekkingspotentieel van 11,3 MW (= 17 ton/uur).

³ Deze hoeveelheid wordt afgevoerd naar de omgeving door het centrale gekoeld watersysteem met behulp van chillers en koeltorens.

2.6 Optimalisatie en voorgestelde aanpassingen

Als resultaat van de uitgevoerde pinch-analyse zijn de volgende optimalisaties en voorgestelde aanpassingen te vinden:

- De samengestelde curven laten zien dat de warme en koude warmtestromen in balans zijn.
- Externe voorzieningen voor warmte (zoals stoom en heet water) zijn in theorie niet vereist. Gecombineerde warmte-integratie van reactor en verbrandingsoven zorgen er samen voor dat de fabriek in haar eigen warmtevraag voorziet. Dit komt voornamelijk door de exotherme reactiewarmte die beschikbaar komt in de ammoxidatie-reactor en warmteterugwinning uit de incinerator⁴.
- De meeste processtromen dienen verwarmd te worden tot 200 °C. De restwarmtestroom-energie van het verbrandingsproces is echter hoog in temperatuur, waardoor er veel potentieel werk (exergie) verloren gaat door het grote temperatuurverschil. Het exergieverlies kan aanzienlijk worden verminderd door een expansiesysteem zoals een stoommotor of stoomturbine, zie ook hoofdstuk 3.
- Een overtollige hoeveelheid warmte van 22 MWth wordt afgevoerd naar de omgeving door middel van koelwater (en een klein deel door chillers). De massa & warmtebalans toont echter een grotere hoeveelheid afvalwarmte (of koelwaterbelasting) van 44 MW thermisch (37,8 miljoen kcal/h) in de praktijk.
- Uit het TQ-diagram blijkt dat circa 7 MWth aan restwarmte beschikbaar is met een temperatuurbereik tussen 70 °C en 90 °C. Deze warmte kan – in plaats van het koelwater naar de omgeving af te voeren – worden toegepast voor bijvoorbeeld HVAC-doeleinden zoals verwarming van gebouwen, kraanwaterverwarming of productie van gekoeld water met behulp van absorptiekoeling. De (theoretische) belasting van de koeltoren zal daardoor (potentieel) afnemen van 22 MWth naar 15 MWth. Er is in dit kader gekozen om de warmte te gebruiken voor gebouwverwarming. In hoofdstuk 4 is dit nader toegelicht.

⁴ In hoofdstuk 3, zullen we overigens opmerken dat er in de praktijk een relatief kleine hoeveelheid externe stoom betrokken moet worden om de stoombalans sluitend te maken.

3 Toepassing van een stoomexpansiesysteem

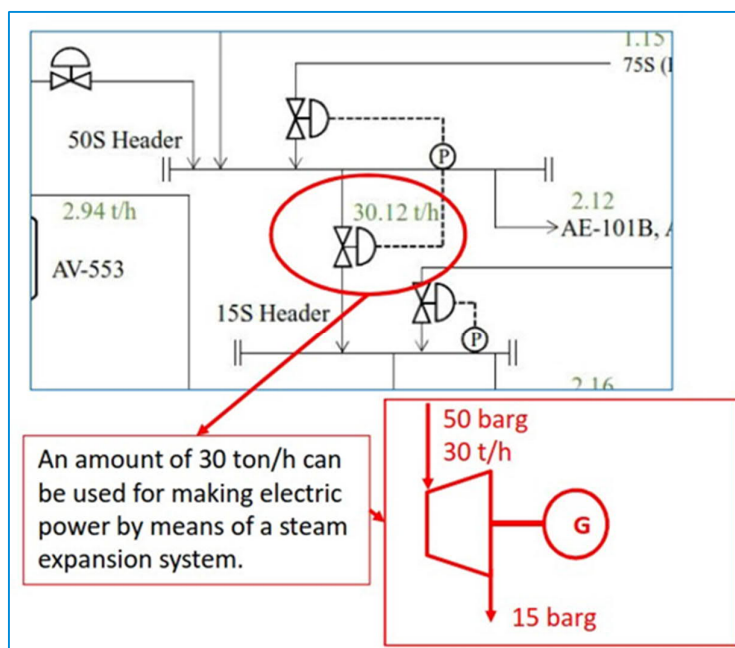
Eén van de bevindingen uit de pinch-analyse (hoofdstuk 2) is dat stoom wordt opgewekt door de incinerator met een temperatuur van bijna 950 °C. De meeste stoom- en warmteverbruikers vereisen echter een temperatuurniveau van minder dan 200 °C. In dit geval gaat er veel potentiële exergie verloren door het hoge temperatuurverschil. Een stoomexpansiesysteem kan het exergieverlies benutten en omzetten in nuttige energie.

De verschillende stoomverbruikers voor de nieuwe MXDA-fabriek zijn onderverdeeld in vier verschillende drukniveaus, 50 barg, 15 barg, 4,5 barg en 1,5 barg. De hogedrukstoom (50 barg) gegenereerd door de incinerator en de amoxidatie-reactor wordt rechtstreeks gebruikt door de hogedrukstoomgebruikers. Lagedrukstoomverbruikers (15 barg) gebruiken een deel van deze gegenereerde stoom, die eerst in druk wordt verlaagd door middel van een stoomreducerstation. Door deze drukverlaging is er exergieverlies. Dit exergieverlies kan door middel van een stoommotor of stoomturbine worden benut en omgezet in nuttige elektrische energie. In dit hoofdstuk worden de bovengenoemde twee opties beschreven en met elkaar vergeleken.

3.1 Uitgangspunten

In bijlage 3 is de stoombalans uiteengezet voor alle hoge- en lagedrukstoomverbruikers. De maximale en nominale stoomdebieten zijn gegeven bij een nominale ontwerpbelasting van 83,4 ton/dag MXDA productie.

Uit de stoombalans blijkt dat er 30 ton/uur hogedrukstoom van 50 barg stoom beschikbaar is om te reduceren tot 15 barg, zowel in nominale als maximale belasting. Deze drukval kan worden bereikt door middel van een drukreducerstation. Dit vormt het referentiescenario (scenario 0 genaamd) voor deze studie. De drukval in een drukreducerstation geeft echter exergieverlies. Dit exergieverlies kan worden omgezet in bruikbare energie met behulp van een stoomexpansiesysteem zoals een stoommotor (scenario 1, zie ook §3.2) of stoomturbine (scenario 2, zie ook §3.3), zie ook figuur 3.1 en figuur 3.2.



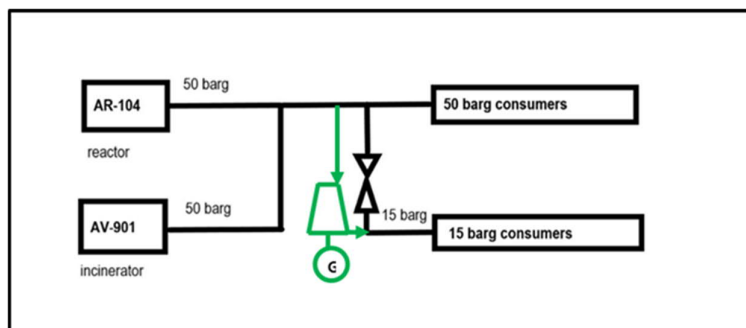
Figuur 3.1 – Uitgaande van de stoombalans kan een stoomdebiet van 30 ton/uur worden toegepast voor stoomexpansie.

Voor de toepassing van een stoomexpansiesysteem zijn de uitgangspunten hieronder samengevat.

Stoomcondities in: 50 barg, verzadigde stoom

Stoomcondities uit: 15 barg

Hoeveelheid stoom: 30 ton/uur, de hoeveelheid die in druk wordt verlaagd



Figuur 3.2 - Optie 1, reactor en incinerator 50 barg + steam expansie systeem (green)

De incinerator is voorzien van een stoomrecuperatieketel zoals toegelicht in hoofdstuk 1. Als uitgangspunt wordt optie 1 gebruikt voor de haalbaarheidsstudie. Een 50 barg stoomrecuperatieketel is een waterpijpketel en aanzienlijk duurder dan een vuurgangvlampijprecuperatieketel (geschikt voor 17 barg stoomopwekking). Het CAPEX-verschil tussen een waterpijpketel en een vuurgangvlampij kan (grof ingeschat) in de orde van grootte van +600 keuro liggen.

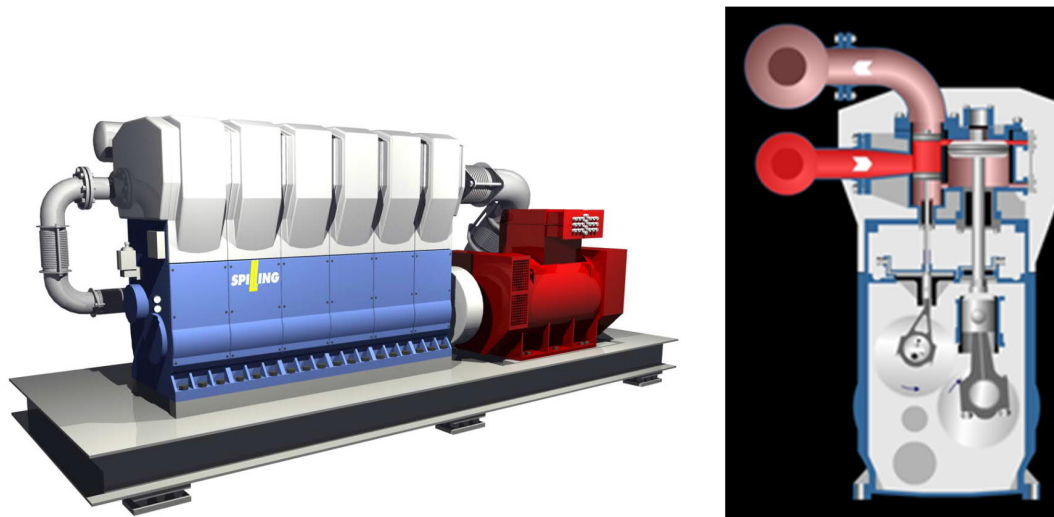
De keuze van het type recuperatieketel en de meer-investering voor een waterpijprecuperatieketel heeft ook een invloed op de totale haalbaarheid en keuze voor de toepassing van een stoomexpansiesysteem. In dit geval worden niet alleen het type stoomexpansiesystemen (motor of turbine) met elkaar vergeleken, maar wordt ook rekening gehouden met het verschil van +600 keuro bij gebruik van een waterpijpketel voor de haalbaarheidsberekening in §3.5.2.



BILFINGER

3.2 Stoommotor

Een stoommotor is een hogesnelheid-zuigerstoommachine. De voordelen van de stoommotor komen met name naar voren bij toepassing van tegendruksystemen of bij wisselende stoomdebieten.



Figuur 3.3 – Stoommotor (bron: Spilling Technologies GmbH)

Het vermogen bij deellast wordt geregeld door een zogenaamde vulregeling (volumetrische regeling). De vermogensregeling /stoomdebietregeling van de stoommotor gebeurt met behulp van een schuifklep bij elke cilinder, die wordt bestuurd door de zuigerslag te veranderen via een regel-as, die hydraulisch wordt bediend. Deze regeling werkt zeer snel en zeer nauwkeurig.

De stoommachine is aan de onderzijde voorzien van flexibele demperelementen waardoor deze eenvoudig op een betonnen vloer geplaatst kan worden die de last kan dragen (circa 3 à 4 ton per m²). Er is geen extra fundering nodig.

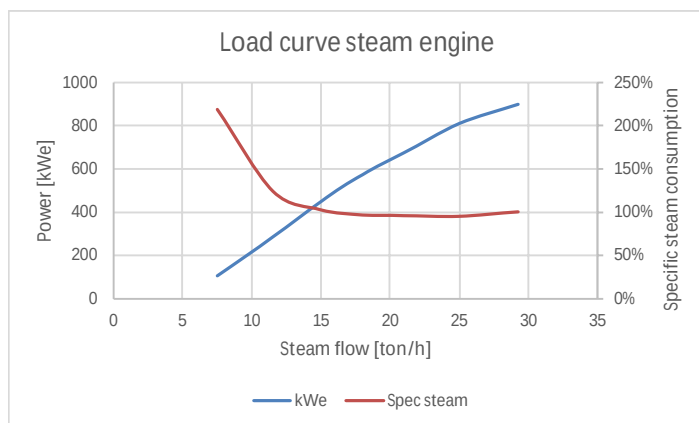
Data stoommotor

Type stoommotor:	4-cilinder-motor, type 6H12TS
Stoomdruk motorinlaat:	42 barg verzadigd, droog ⁵
Stoomdruk motoruitlaat:	15 barg
Maximum stoomdebiet:	30 ton/uur
Belasting (elektrisch):	920 kW
Gewicht:	circa 25 ton
Afmetingen (LxBxH)	6.000 mm x 2.300 mm x 2.100 mm
Investerings (indicatieve prijs):	790 keuro (inclusief commissioning)
Jaarlijkse onderhoudskosten:	40 - 50 keuro/jaar
Rendement in vollast:	isentropisch 76%, mechanisch 80%, elektrisch 98%
	Totaal 59,5%

⁵ Opmerking: Voor een stoommotor met standaard uitrusting (standaard zuigerveren, schuifklepringen) is de bijbehorende stoom(verzadigings)temperatuur van 50 barg te hoog. Daarom wordt voor de stoommotor-optie een drukregelklep bij de inlaat geplaatst om de druk te verlagen tot ongeveer 42 barg.

Een schematisch overzicht van de stoommotor met de belangrijkste appendages en componenten is weergegeven in de tekening met documentnummer 3242001 in bijlage 12.

Figuur 3.4 geeft de belastingscurve van een stoommotor weer. De belastingscurve en technische specificaties van de stoommachine zijn opgenomen in bijlage 4.



Figuur 3.4 – Vermogens- en verbruiks-curve stoommotor

Figuur 3.4 laat zien dat het specifieke stoomverbruik nagenoeg constant is bij lagere belastingen, wat duidt op een goede prestatie bij deellast. Dit wordt bereikt door de volumetrische regeling van de stoommotor. Hierdoor heeft de stoommotor een goede prestatie (rendement) over het deellastbereik bij fluctuerende stoomcondities, specifiek in vergelijking met stoomturbines. Dit realiseert de werking over een breed bereik vrijwel zonder drukverliezen en garandeert zo in grote mate een constante efficiëntie.

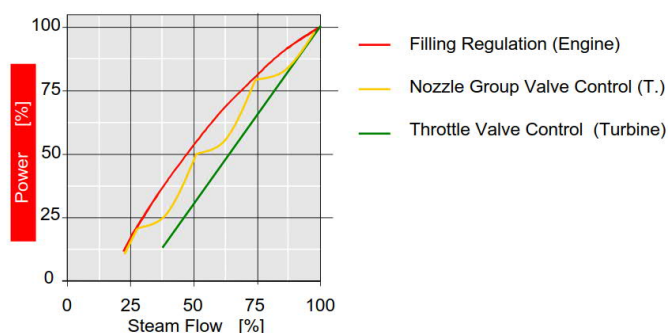


BILFINGER

3.3 Stoomturbine

Een andere mogelijkheid om het exergieverlies bij het verlagen van de stoomdruk te benutten, is door gebruik te maken van een tegendrukstoomturbine. De werking van een stoomturbine is gebaseerd op het principe van het verhogen van de snelheid van de stoom door expansie in een mondstuk of leischoppen. Deze nozzles of leischoppen zijn in segmenten in het turbinehuis ingebouwd. Op de rotor van de turbine zijn zogenaamde loopbladen gemonteerd. Hier wordt de snelheid omgezet in mechanisch vermogen. De werking van de stoomturbine is op basis van het impulsprincipe en bestaat uit een geïntegreerde tandwielkast.

Voor de vermogensregeling van een stoomturbine kan gebruik gemaakt worden van een smoorklepregeling of een straalbuisgroepregeling. Door deze regeling kan het thermische rendement ten opzichte van volledige belasting afnemen als gevolg van het smooverlies. Dit geeft een nadelig effect met betrekking tot het energieverbruik. Het smooverlies is groter bij een smoorklepregeling, dan bij een straalbuisregeling. Figuur 3.5 geeft een vergelijking van de uitgangsregelprijncipes met straalbuisgroepregeling ("nozzle group valve control") of smoorklep ("throttle valve control"). Ook de vulregeling van een stoommotor ("filling regulation") is in figuur 3.5 ter vergelijking opgenomen. Hieruit is af te leiden dat een vulregeling een beter regelgedrag heeft bij fluctuerende stroomstroom, vergeleken met de smoorklep- of straalbuisregeling bij toepassing van een stoomturbine.



Figuur 3.5 – Vergelijking van de verschillende typen vermogensregelingen (bron: Spilling Technologies GmbH)

Voor stoomturbines die vrijwel altijd op volle belasting opereren, is het smooverlies echter verwaarloosbaar klein.

De stoomturbine (type Spilling) kan geïnstalleerd worden op een betonnen funderingsblok van ca. 500 mm hoogte. Bij montage op een stalen frame moet de montage hierop worden aangepast (bijvoorbeeld met demperelementen of iets dergelijks).



Figure 3.6 – Steam turbine (source: Spilling Technologies GmbH)



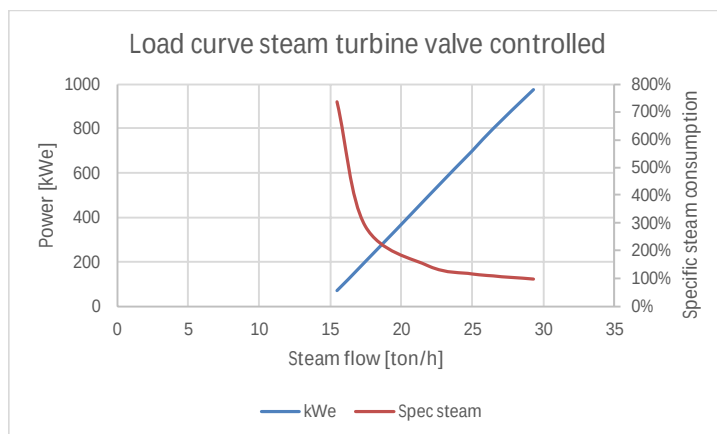
BILFINGER

Data stoomturbine

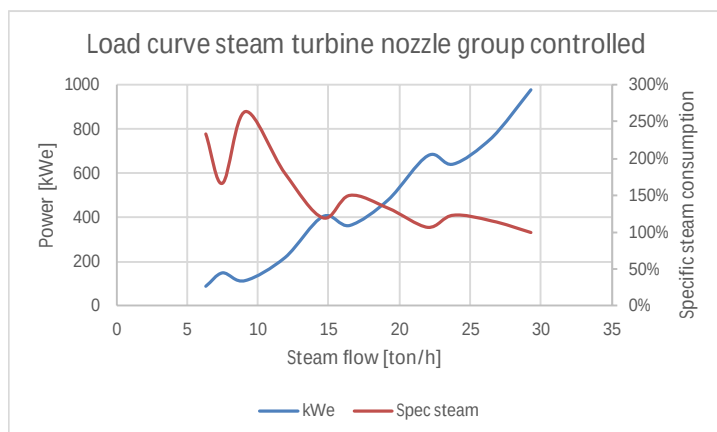
Type stoomturbine:	ééntraps tegendrukturbine, type Spilling STS-C-1
Stoomdruk (turbine-inlaat):	50 barg, verzadigd, droog
Stoomdruk (turbine-uitlaat):	15 barg
Stoomdebiet:	30 ton/h
Vermogen (elektrisch):	998 kWe
Gewicht:	circa 14 tot 15 ton
Afmetingen (LxBxH):	4.200 mm x 3.500 mm x 4.500 mm
Investering (indicatieve prijs):	740 keuro (inclusief commissioning)
Jaarlijkse onderhoudskosten:	ongeveer 15 keuro per 3 jaar voor inspectie. Daarnaast hoeft alleen de turbine-olie regelmatig te worden vervangen (meestal één keer per jaar, circa 2 keuro).
Rendement bij vollast:	isentropisch 58%, mechanisch 98%, elektrisch 97% Totaal 55,1 %.

Een schema van de stoomturbine met de belangrijkste appendages en componenten is weergegeven in de tekening met documentnummer 3242002 in bijlage 13.

Figuur 3.7 geeft de belastingcurve van een smoorklep geregelde turbine en figuur 3.8 geeft de belastingcurve van een straalbuisgroep geregelde stoomturbine. De belastingcurves en technische specificaties van de stoomturbine zijn ook opgenomen in bijlage 5.



Figuur 3.7 – Vermogen [kWe] en specifiek stoomverbruik [%] van een smoorklep geregelde turbine





BILFINGER

Figuur 3.8 – Vermogen [kWe] en specifiek stoomverbruik [%] van een straalbuisgroep geregelde turbine

3.4 Multicriteria-analyse – Kesselring-methode

De toepassing van een stoommotor en stoomturbine worden op verschillende criteria met elkaar vergeleken door middel van een multicriteria-analyse. In dit geval wordt de Kesselring-methode gebruikt. Een korte uitleg van deze methode wordt gegeven in bijlage 6.

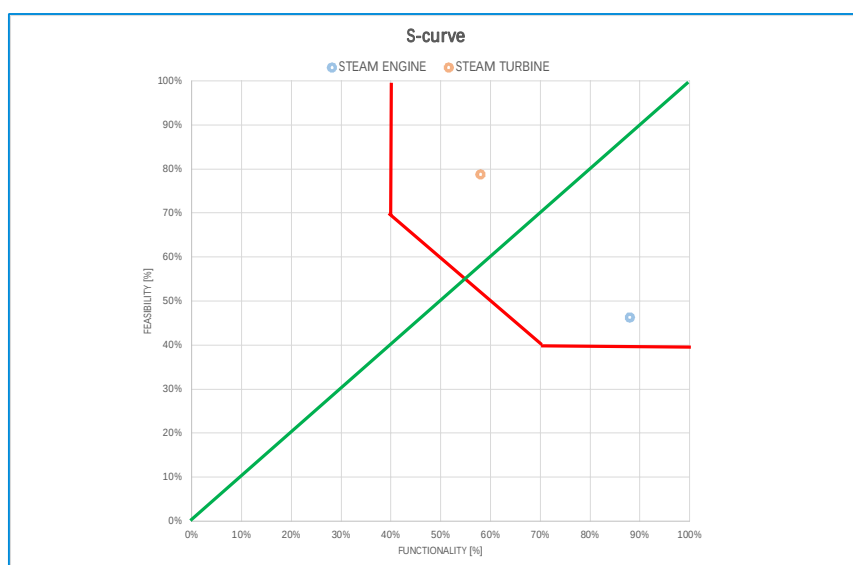
De criteria op functionaliteit en haalbaarheid zoals beschreven in dit hoofdstuk voor zowel een stoommotor als stoomturbine zijn beoordeeld en samengevat. Hieronder volgt een overzicht van de scores en de grafische weergave (S-curve).

Tabel 3.1 – Functionaliteit en haalbaarheid score overzicht voor een stoommotor en stoomturbine

FUNCTIONALITY	Weighing factor (A)	Steam engine			Steam turbine			Maximum
		Score (B)		A x B	Score (B)		A x B	
Part load efficiency	4	Very good	5	20	Moderate	3	12	20
Control range	3	Good	4	12	Moderate	3	9	15
Capability for saturated steam	2	Good	4	8	Moderate	3	6	10
Requirements for boiler feed water	1	Good	4	4	Low	2	2	5
TOTAL				44			29	50
				88%			58%	100%

FEASIBILITY	Weighing factor (A)	Steam engine			Steam turbine			Maximum
		Score (B)		A x B	Score (B)		A x B	
Investment	4	Low	2	8	Moderate	3	12	20
Weight	2	Low	2	4	Good	4	8	10
Foot print	2	Low	2	4	Good	4	8	10
Maintenance	3	High	2	6	Very good	5	15	15
Performance (kW duty / ton steam)	5	Moderate	3	15	Good	4	20	25
TOTAL				37			63	80
				46%			79%	100%

	FUNCTIONALITY	FEASIBILITY
STEAM ENGINE	88%	46%
STEAM TURBINE	58%	79%



Figuur 3.9 – S-curve, stoommotor and stoomturbine



BILFINGER

Het resultaat laat zien dat een stoomturbine lager scoort qua functionaliteit, maar hoger qua haalbaarheid dan een stoommachine. De toepassing van een stoomturbine is de optie die het dichtst bij de rechte lijn en in de rechter bovenhoek van de S-bocht ligt. De toepassing van een stoomturbine scoort in totaal dus hoger in vergelijking met een stoommotor.

3.5 Financiële vergelijking

3.5.1 Investering

Een indicatieve CAPEX-vergelijking wordt beschreven in bijlage 9. Bij deze vergelijking zijn 3 scenario's met elkaar vergeleken en in onderstaand overzicht samengevat. Uitgangspunt bij alle scenario's is dat er ruimte beschikbaar is om de installaties te huisvesten. Het uitgangspunt is dat er geen aanvullende constructieve of bouwkundige maatregelen nodig zijn om het systeem te installeren.

Scenario 0: referentie, stoomreducerstation voor de drukreductie van 50 barg tot 15 barg

Tabel 3.2 – Indicatieve kostenraming van een druk reduceerstation

A. Direct costs	€ 243.000
B. Services and other indirects	€ 47.000
Direct and indirect (A+B)	€ 290.000
C. Contingency and escalation	€ 102.000
D. Total (A+B+C) +/- 40%	€ 392.000

Scenario 1: toepassing van een stoommotor

Tabel 3.3 – Indicatieve kostenraming voor een stoommotor

A. Direct costs	€ 1.872.000
B. Services and other indirects	€ 493.000
Direct and indirect (A+B)	€ 2.365.000
C. Contingency and escalation	€ 828.000
D. Total (A+B+C) +/- 40%	€ 3.193.000

Scenario 2: toepassing van een stoomturbine (straalbuiscgroep geregeld)

Tabel 3.4 – Indicatieve kostenraming voor een stoomturbine (straalbuiscgroep geregeld)

A. Direct costs	€ 1.772.000
B. Services and other indirects	€ 468.000
Direct and indirect (A+B)	€ 2.240.000
C. Contingency and escalation	€ 787.000
D. Total (A+B+C) +/- 40%	€ 3.024.000

Voor de haalbaarheidsberekening in §3.5.2 wordt het investeringsverschil (meerinvestering) van scenario's 1 en 2 ten opzichte van de referentie (scenario 0 reductiestation) gebruikt voor het bepalen van de simpele terugverdientijd.



BILFINGER

3.5.2 Haalbaarheidsberekening

Voor de haalbaarheidsberekening wordt verwezen naar bijlage 10. Er wordt een vergelijking gemaakt tussen een stoommotor en een stoom (tegendruk) turbine. Voor deze berekening worden de uitgangspunten gehanteerd zoals hieronder vermeld:

Stoomdebiet:	30 ton/h
Ingaande druk:	50 barg
Uitgaande druk (tegendruk):	15 barg
Bedrijfstijd:	7200 uur/jaar
Gemiddelde belasting:	80% (ingeschat)
CO ₂ emissie elektriciteit:	0,5 ton/MWh ("grijze" elektriciteit van een energiecentrale)
Tarief	
Elektriciteit:	60 euro/MWh (aanne) ⁶
Stoom prijs:	20 euro/ton (berekend a.d.h.v gasprijs van € 0,24 per Nm ³)
CO ₂ :	50 euro/ton (schaduwprijs, aanname) ⁷

De berekende resultaten beschreven in bijlage 10 zijn samengevat in tabel 3.5. De resultaten op basis van 365 productiedagen zijn tevens opgenomen. De overtollige investering is de extra investering die nodig is in vergelijking met een stoomdrukreducerstation als referentie.

Tabel 3.5 – Overzicht van de economische rentabiliteit voor de toepassing van een stoomexpansiesysteem (stoommotor of stoomturbine) bij 300 productiedagen

Item	unit	Reducer (reference)	Steam engine	Steam turbine	Steam turbine & HP incinerator (+600 keuro)
Indicative investment (excl subs)	[euro]	392.000	3.068.000	3.193.000	3.793.000
Surplus investement	[euro]	0	2.676.000	2.801.000	3.401.000
Generated power	[kWe]	0	921	998	998
Generated energy	[MWh/yr]	0	5.305	5.748	5.748
CO ₂ savings	[ton/yr]	0	2652	2874	2874
Savings electricity	[euro/yr]	0	318.000	345.000	345.000
Savings CO ₂	[euro/yr]	0	133.000	144.000	144.000
Maintenance costs	[euro/yr]	0	-45.000	-7.000	-7.000
External steam	[euro/yr]	0	-242.000	-226.000	-226.000
Yearly savings	[euro/yr]	0	164.000	256.000	256.000
Simple pay back time	[years]	reference	16,3	10,9	13,3

⁶ Het elektriciteitstarief voor MGC is niet bekend, daarom wordt 60 euro/MWh als kengetal voor de Nederlandse industrie verondersteld. Figuur 3.8 laat de haalbaarheid zien voor verschillende elektriciteitstarieven.

⁷ In Europa wordt de werkelijke CO₂-uitstoot geprijsd via het Europese emissiehandelssysteem (ETS). Daarnaast staat in het Klimaatakkoord van Parijs, het Nederlandse Regeerakkoord en de hoofdlijnen van het Nederlandse Klimaatakkoord dat CO₂-beprijzing ingezet moet worden om gevaarlijke klimaatverstoringen te voorkomen. Dat is ook een reden waarom verschillende bedrijven al werken met een CO₂-schaduwprijs.



BILFINGER

Tabel 3.6 - Overzicht van de economische rentabiliteit voor de toepassing van een stoomexpansiesysteem (stoommotor of stoomturbine) bij 365 productiedagen

Item	unit	Reducer (reference)	Steam engine	Steam turbine	Steam turbine & HP incinerator (+600 keuro)
Indicative investment (excl subs)	[euro]	392.000	3.068.000	3.193.000	3.793.000
Surplus investement	[euro]	0	2.676.000	2.801.000	3.401.000
Generated power	[kWe]	0	921	998	998
Generated energy	[MWh/yr]	0	6.454	6.994	6.994
CO ₂ savings	[ton/yr]	0	3227	3497	3497
Savings electricity	[euro/yr]	0	387.000	420.000	420.000
Savings CO ₂	[euro/yr]	0	161.000	175.000	175.000
Maintenance costs	[euro/yr]	0	-45.000	-7.000	-7.000
External steam	[euro/yr]	0	-294.000	-274.000	-274.000
Yearly savings	[euro/yr]	0	209.000	314.000	314.000
Simple pay back time	[years]	reference	12,8	8,9	10,8

Uit de tabellen blijkt dat de stoomturbine een kortere terugverdientijd heeft in vergelijking met de toepassing van een stoommotor. De belangrijkste redenen hiervoor zijn:

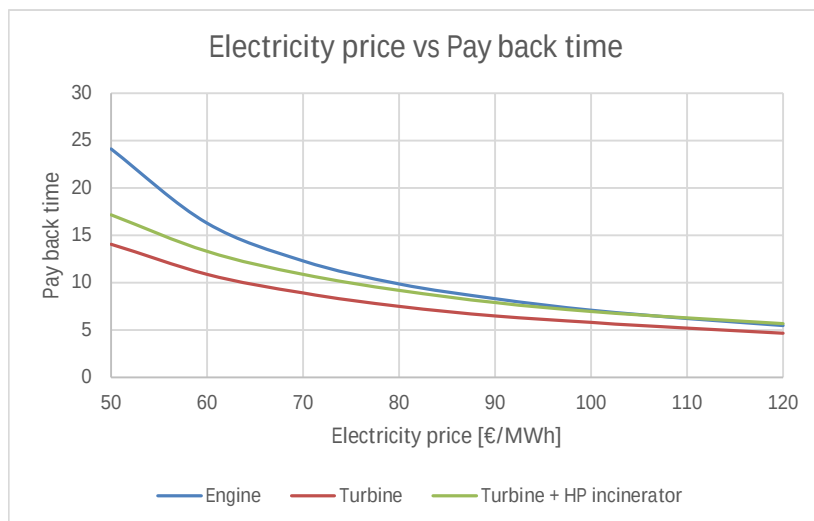
- lagere investeringskosten voor de toepassing van een stoomturbine (zie §3.5.1);
- het opgewekte vermogen van een stoomturbine is hoger, wat resulteert in een hogere elektriciteits- en CO₂-besparing;
- onderhoudskosten voor de toepassing van een stoomturbine zijn zeer laag.

De laatste kolom toont tenslotte de terugverdientijd bij tepassing van een stoomturbine en een extra investering van 600 keuro bij gebruik van een waterpijprecuperatie ketel. De terugverdientijd voor deze optie wordt geschat op ongeveer 11 - 13 jaar.

Voor deze toepassing wordt een (variabele) elektriciteitsprijs van 60 €/MWh als uitgangspunt genomen. Figuur 3.10 laat zien dat wanneer de elektriciteitsprijs ongeveer gelijk is aan 110 €/MWh, de terugverdientijd voor een stoomturbinetoepping de 5 jaar benadert. Met de optie van een stoomturbine in combinatie met een hogedruk waterpijprecuperatieketel, zal de elektriciteitsprijs nog hoger moeten zijn om in 5 jaar terug te verdienen.



BILFINGER



Figuur 3.10 – Elektriciteitsprijs versus terugverdientijd stoommotor en stoomturbine

De terugverdientijd is meer dan 5 jaar, en is met name te wijten aan het feit dat er jaarlijks veel stoom van 15 barg extern betrokken moet worden. De reden hiervoor is dat de stoom na expansie van 50 barg naar 15 barg natte stoom betreft, met een vochtgehalte (=stoomverlies) van circa 7%⁸. Dit betekent dat 15 barg stoom extern aangevuld moet worden, omdat uit de stoombalans is af te leiden dat men in de praktijk niet geheel in eigen stoom kan voorzien bij zowel nominale als maximale stoomvraag. Dit betekent dat 2 ton/u stoom met een druk van 15 barg door een externe partij (Huntsman in dit geval) geleverd moet worden. Op jaarbasis is dit maar liefst 11.300 ton/jaar.

Een mogelijke oplossing is om een kleinere turbine toe te passen, en dan een ander deel door middel van een parallelle reducer aan te vullen (als je stoom reduceert van 50 barg naar 15 barg is deze oververhit). Na menging van beide stromen zou men dus verzadigde stoom hebben van 15 barg. Echter uit de massabalans blijkt dat men dan alle stoom door de reducer moet voeren. Dat komt omdat de enthalpiewaarde van 50 barg stoom en 15 barg stoom heel dicht bij elkaar liggen. Een andere optie is om de stoom van 50 barg te oververhitten voor expansie, zodat er na expansie geen natte stoom ontstaat. Dit kost echter tevens (veel) extra energie (circa 1000 kW). De laatste mogelijkheid is om extra stoom te genereren in de incinerator. Echter dit kost ook extra energie (gas). De stoomprijs is dan wellicht lager, maar dan is de terugverdientijd nog steeds minimaal 7 tot 9 jaar.

⁸ Ongeacht men een stoommotor of stoomturbine toepast



BILFINGER

3.6 Conclusie

Uit de analyse die in dit hoofdstuk is beschreven zijn de volgende bevindingen af te leiden:

- De stoomcondities lijken voldoende potentie te hebben om het verlies aan exergie te compenseren en energie op te wekken bij het verlagen van de druk. Daarbij kan gebruik worden gemaakt van een stoommotor of stoomturbine;
- Ondanks het feit dat een stoommotor een beter regelbereik en een beter deellastrendement heeft, is de overall score qua haalbaarheidscriteria hoger voor een stoomturbine-toepassing. Daarnaast wordt verwacht dat de hoeveelheid geproduceerde stoom (uit de verbrandingsoven en reactor) die moet worden teruggebracht van 50 barg naar 15 barg constant zal zijn. Hierdoor zal de stoomturbine nauwelijks in deellast hoeven te draaien. Als een beter regelbereik gewenst is, verdient een turbine op basis van straalbuisregeling de voorkeur boven een turbine met klep (smoring);
- Een terugverdientijd kleiner dan 5 jaar is niet realiseerbaar, ongeacht of men een stoommotor of stoomturbine toepast. Dit is te wijten aan het feit dat er relatief veel stoom extern betrokken moet worden, als gevolg van het vochtgehalte (=stoomverlies) na expansie in de motor of turbine. Andere mogelijkheden zoals een kleinere turbine, oververhitting voor expansie of extra stoom genereren in de incinerator bieden geen oplossing om de beoogde terugverdientijd van 5 jaar te bereiken.

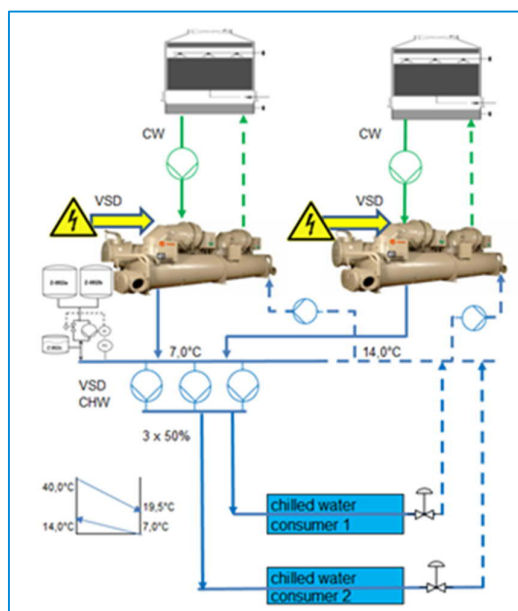


BILFINGER

4 Separate koeltorens voor de chiller plant

Watergekoelde centrifugale koelmachines worden gebruikt voor de productie van “chilled water” (water met een aanvoertemperatuur van 7 °C) welke staan opgesteld in de chiller plant. De condensor van deze koelmachines moet worden gekoeld met koelwater. Dit koelwater kan afkomstig zijn van het centrale koelwatersysteem. Het koelwater van dit systeem wordt geproduceerd door middel van centrale koeltorens en vervolgens via een leidingsysteem gedistribueerd naar verschillende verbruikers, en in dit geval de koelinstallatie. Het voordeel hiervan is dat er geen aparte koeltorens hoeven te worden geplaatst voor de koelmachines. Het nadeel hiervan is echter dat het koelwater uit de centrale koeltorens een vaste aanvoertemperatuur heeft, die in dit geval niet lager is dan 26° C. Hierdoor wordt de jaargemiddelde COP beperkt tot een bepaald maximum.

Een alternatief is het toepassen van een specifieke aparte koeltoren per koelmachine (zie ook het schema in figuur 4.1). In dat geval kan de aanvoertemperatuur (veel) lager worden dan 26 °C, afhankelijk van de heersende natte boltemperatuur. Hierdoor is de jaargemiddelde COP veel hoger, wat resulteert in een lager energieverbruik van de koelmachines. Dit vraagt echter om extra investeringen (koeltoren, pompen, waterbehandeling etc.). Als deze op het dak van de koelinstallatie worden geplaatst, zal ook het gebouw structureel aangepast moeten worden.



Figuur 4.1 – Schema met aparte specifieke koeltoren per koelmachine

Voor deze studie wordt de extra investering van een aparte koeltoren ten opzichte van een aansluiting op het centrale koelwatersysteem afgewogen tegen de jaarlijkse energiebesparing. Dit wordt uitgezet in een vergelijking waarin de terugverdientijd van bovenstaande extra investering wordt berekend.



BILFINGER

4.1 Uitgangspunten

Koelmachine (chiller)

Type:	York, centrifugale koelmachine met watergekoelde condensor
Maximaal koelvermogen per koelmachine:	3.500 kW
Aantal koelmachines:	2
Gemiddelde koelmachine belasting:	83%
Chilled water retour:	13,5 °C
Chilled water toevoer:	7 °C
Bedrijfstijd:	7.200 uur/jaar
COP @ 100% belasting:	6,4

De COP wordt bepaald aan de hand van de koelwatertemperatuur (afkomstig van de koeltorens). Deze is in onderstaande tabel aangegeven bij verschillende deellastcondities. In dit geval wordt uitgegaan van een gemiddelde belasting van 80% over het gehele jaar. Bij lagere gekoeld watertemperatuur wordt de COP hoger.



Project:

Unit Tag:

Engineer:

Customer:

Rating Program: XEngine 1.0.7531

Software Version: YW 20.03a

Date: 09/04/2020 11:32:51

Partload Data (Minimum Condenser Water Temperature)										
CEFT (°C)	% LOAD									
	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
27.00°	6.394	6.832	7.153	7.147	6.982	6.680	6.162	5.359	4.311	2.864
24.00°	6.950	7.558	8.104	8.388	8.455	8.176	7.616	6.721	5.352	3.387
21.00°	7.387	8.381	9.198	9.663	10.02	10.09	9.619	8.545	6.961	4.466
18.00°	7.818	9.017	10.19	11.05	11.75	12.24	12.39	11.48	9.267	5.925
15.00°	8.292	9.544	11.28	12.54	13.78	14.91	15.72	15.34	13.31	8.893
12.00°	8.703	10.03	11.96	13.82	16.17	18.30	20.57	21.94	20.16	13.43
9.00°	9.145	10.59	12.61	14.82	17.95	21.93	27.31	31.14	-	-
6.00°	9.196	10.59	12.36	14.63	17.44	-	-	-	-	-
5.00°	9.353	10.78	12.56	14.88	17.34	-	-	-	-	-

* values are in COP.R

Rated point is 60% or higher efficiency compared to design operation point.

Rated point is 70% or higher efficiency compared to design operation point.

Rated point is 80% or higher efficiency compared to design operation point.

Tabel 4.1- COP van de koelmachines bij verschillende koelwatertemperaturen en deellastcondities

Centraal koelwatersysteem

Uitgaande ontwerptemperatuur (zomer en winter): 26 °C

Bij toepassing van een centraal koelwatersysteem is uit tabel 4.1 af te leiden dat de gemiddelde COP gelijk is aan 7,5 (en constant blijft).

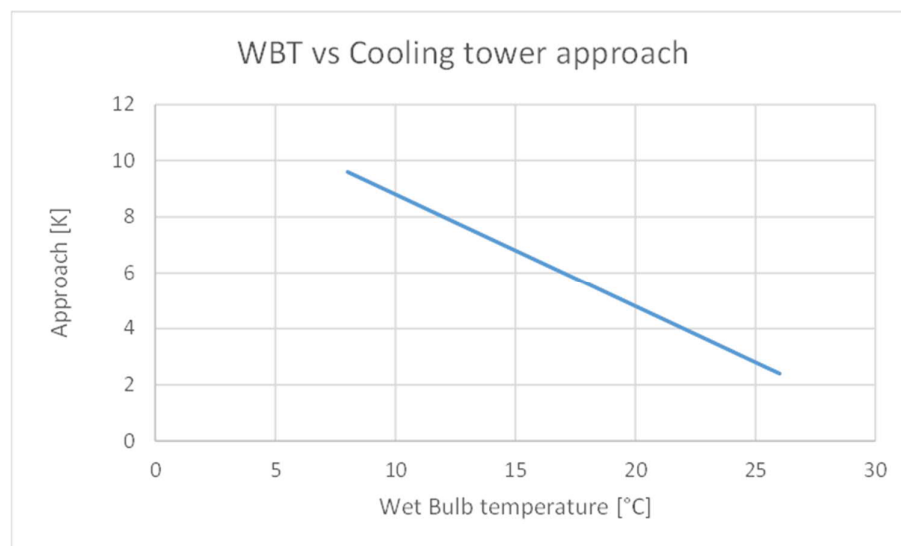


BILFINGER

Koeltorens (specifiek voor de koelmachines)

Type:	Open koeltoren
Capaciteit maximaal:	4.050 kW
Aantal:	2
Ingaande ontwerptemperatuur (zomer):	33 °C
Uitgaande ontwerptemperatuur (zomer):	27 °C
Ontwerp natte boltemperatuur:	22 °C
Approach:	ontwerpbelasting (4050 kW) approach = 5K, bij 83% belasting approach = 4 K

Voor de berekening van de natte boltemperatuur is gebruik gemaakt van de uurlijkse waarden van KNMI weerdata Rotterdam uit 2019. Aan de hand van de uurlijkse waarden kan de uitgaande koelwatertemperatuur van de koeltoren worden berekend door middel van de zogeheten "approach". Dit is het verschil tussen de gekoeld watertemperatuur van een koeltoren, en de natteboltemperatuur. Bij een hogere natteboltemperatuur wordt de approach kleiner. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de vuistregel dat elke 2 K verlaging van de natteboltemperatuur, een verhoging van 0,8 K in approach geeft, zie ook figuur 4.2. (bron: Koeltorenbboekje GEA Polacel).



Figuur 4.2 – Natte boltemperatuur (in °C) versus approach (in K)

4.2 Berekening

Voor een gedetailleerde berekening wordt verwezen naar bijlage 7. Uit de berekening is af te leiden dat de gemiddelde COP bij toepassing van koelwater van het centrale gekoeld watersysteem 7,5 bedraagt. Bij een separate koeltoren specifiek voor de koelmachines is deze een stuk hoger, namelijk 10,1. De jaarlijkse energiebesparing wordt hiermee gelijk aan ruim 1.300 MWh/jaar aan elektriciteit (€ 97.000 per jaar). De meer-investering van een separate koeltoren per koelmachine ten opzichte van een aansluiting op het gekoeld waternet is berekend op 246.000 euro (+/-40%).

4.3 Conclusie

Het energiebesparingspotentieel van een specifiek koeltorensysteem voor de koelmachines is hoog ten opzichte van een aansluiting op het gekoeld waternet. Deze bedraagt meer dan 1.300 MWh elektriciteit per jaar. Dit resulteert in een jaarlijkse financiële besparing op energie van 97.000 euro per jaar. De extra investering van 246.000 verdient zich terug in ongeveer 2,5 jaar. Deze maatregel is na overleg met MGC geïmplementeerd in het installatietechnische ontwerp.



BILFINGER

5 Stoomtracing versus elektrische tracing

Heat tracing is een vorm van verwarming die er voor zorgt dat leidingen en apparatuur, welke gevuld zijn met vloeibare producten, vorstvrij gehouden worden of op de gewenste temperatuur blijven. Daarbij kan gebruik worden gemaakt van zogeheten stoom-tracing of elektrische tracing (verwarmingslint of kabel). De vraag is welke vorm van tracing in economische en ecologische zin de voorkeur heeft.

5.1 Uitgangspunten

Voor de vergelijking tussen stoomtracing en elektrische tracing is rekening gehouden met het volgende:

- Stoomtracing:
 - o het elektrische energieverbruik en de bijbehorende kosten (tegen een bepaald E-tarief) voor de voedingswaterpompen van de stoomopwekking is meegenomen;
 - o het verbruik en de kosten van waterbehandeling om het retourcondensaat te conditioneren voordat het wordt omgezet in stoom is meegenomen.
- Er wordt geen rekening gehouden met de energie die benodigd is voor het opwekken van stoom, aangezien het hier gaat om gerecupereerde stoom.
- Elektrische tracing:
 - o het elektrische energieverbruik en de bijbehorende kosten (voor een bepaald E-tarief) van de elektrische verwarming is meegenomen.
- Als uitgangspunt is leidingwerk genomen met een gemiddelde diameter van 300 mm, en een isolatiedikte van 80 mm. De gemiddelde mediumtemperatuur is gelijk aan 150°C. Bij een ingeschatte equivalente leidinglengte van 3.500 meter, bedraagt het warmteverlies 361 kW.

In bijlage 14 is de berekening gegeven, waarbij bovengenoemde uitgangspunten zijn meegenomen.

Uit de berekening kan worden afgeleid dat het warmteverlies op basis van een geschatte pijplengte (equivalente lengte 3.500 meter) veel lager is dan de opgegeven waarden van MGC. Gezien de afmetingen van de installatie lijkt het berekende warmteverlies op basis van een equivalente lengte met een totaal van 361 kW een meer realistische waarde. Dit vormt dus ook het uitgangspunt voor de berekening.

5.2 Energiebesparing

De jaarlijkse besparing op elektriciteit bedraagt 2.591 MWh/jaar (inclusief benodigde energie voedingswaterpomp bij toepassing van stoom tracing ten opzichte van elektrische tracing. De CO₂-reductie bedraagt 1.296 ton/jaar. De jaarlijkse besparing (met aftrek van waterbehandeling) bedraagt netto 146.000 euro/jaar.

5.3 Investerings

De aanleg van stoomtracing is gelijk aan 143 euro/meter⁹. Bij een equivalente leidinglengte van 3.500 meter is dit gelijk aan 500.000 euro (±40%).

De aanleg van elektrische tracing is gelijk aan 64 euro/meter¹⁰. Bij een equivalente leidinglengte van 3.500 meter is dit gelijk aan 224.000 euro (±40%).

De meerinvestering van stoomtracing ten opzichte van elektrische tracing bedraagt 500.000 – 224.000 = 276.000 euro.

⁹ DACE editie 34 B4006, diameter 0,5", schedule 80 type B, inclusief 50% toeslag voor condensaatpotten, kleppen, isolatie, stoom toevoer en condensaatretourleidingen en isolatie

¹⁰ DACE editie 34 D2021.



BILFINGER

5.4 Conclusie

Het toepassen van stoomtracing geeft een forse besparing ten opzichte van elektrische tracing met betrekking tot het jaarlijkse energieverbruik: 2591 MWh/jaar, CO₂-uitstoot: 1.296 ton/jaar en de energiekosten 146.000 euro/jaar.

Deze jaarlijkse besparing is te wijten aan:

- De recuperatiestoom is het resultaat van het verbranden van afvalstromen. Het aandeel van het aardgasverbruik mag als minimaal worden beschouwd, waardoor de benodigde stoom in feite 'gratis' is. Dit betekent dat de benodigde energie lager is bij gebruik van stoomtracing.
- De omzetting bij elektrische tracing is één op één (100% warmteafgifte = 100% elektriciteit). Bij toepassing van andere technieken voor het omzetten van elektriciteit in warmte is dit gunstiger, bijvoorbeeld een warmtepomp.
- Indien er "grijze" elektriciteit wordt gebruikt, wat nu als uitgangspunt wordt genomen, is er geen sprake van CO₂-reductie, maar eerder een verhoging.

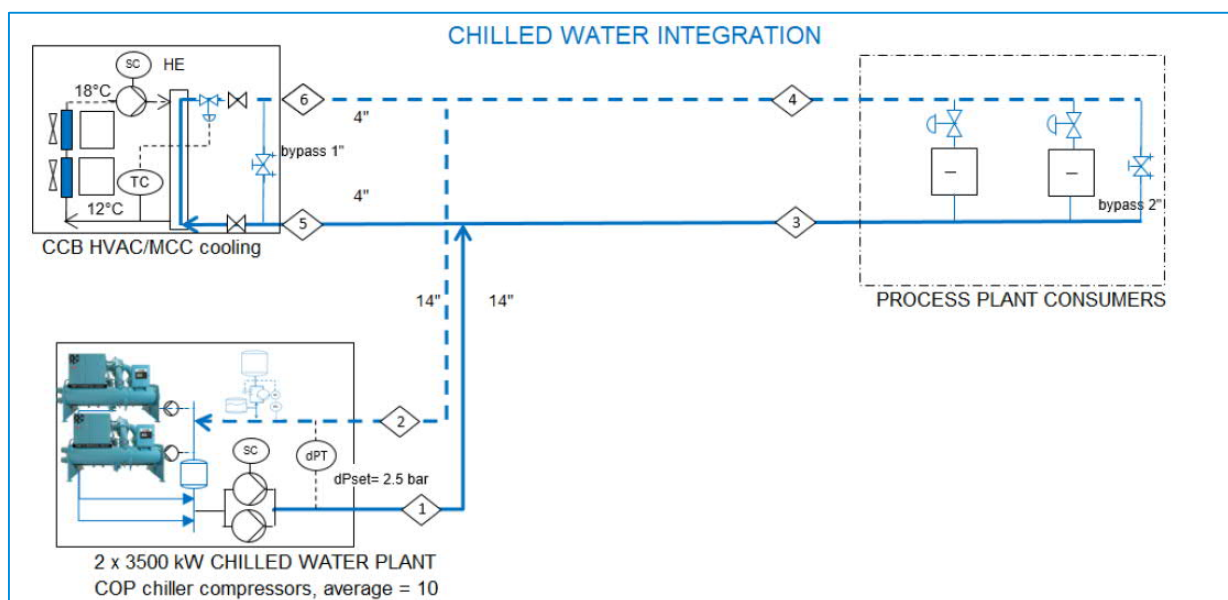
Bij een meer-investering van 276.000 euro van stoomtracing ten opzichte van elektrische tracing, wordt de terugverdientijd hiermee gelijk aan 2 jaar.



BILFINGER

6 Integratie van gebouwgebonden koeling met chilled water systeem

De centrale regelkamer en de MCC-ruimte dienen te worden geconditioneerd om een continu temperatuurniveau te behouden in de ruimte. Voor de gebouwgebonden koeling kan gebruik worden gemaakt van luchtgekoelde split units en/of airconditioning. Dit type gebouwkoeling vraagt echter veel energie. Het idee is daarom om de gebouwgebonden koeling te integreren met het chilled water systeem afkomstig van de energie efficiënte chiller plant (zie figuur 5.1)



Figuur 5.1 – integratie van de gebouwgebonden koeling met de centrale regelkamer (CCB)

6.1 Uitgangspunten

Algemeen

Bedrijfstijd:	7.200 uur/jaar
Elektriciteitsstarief:	60 euro/MWh
Gebouwgebonden koelvraag:	500 kW in de zomer, 300 kW in de winter. Gemiddeld 400 kW.
Elektriciteit:	60 euro/MWh (aanname) ¹¹

Referentie

Koeling door middel van 3 luchtgekoelde koelers
 Redundante koeling (N+1) N = 2. Totaal opgesteld 3 x 250 kW koeling.
 Jaargemiddeld COP: 3 (inclusief energieverbruik distributiepomp en ventilatoren).

¹¹ Het elektriciteitsstarief voor MGC is niet bekend, daarom wordt 60 euro/MWh als kengetal voor de Nederlandse industrie verondersteld..



BILFINGER

Geïntegreerde koeling

Koeling met behulp van 1 warmtewisselaar welke is aangesloten op het chilled water systeem en 2 luchtgekoelde koelers als back-up.

Totaal opgesteld: 1 x warmtewisselaar van 500 kW, en 2 x 250 kW koeling (back-up)

Jaargemiddelde COP: 8 (inclusief energieverbruik alle pompen en de koeltorens).

6.2 Energiebesparing

De gevraagde koelenergie is gelijk aan $7.200 \text{ uur/jaar} \times 0,4 \text{ MW} = 2.880 \text{ MWh/jaar}$.

De elektriciteitsvraag voor de referentie bedraagt $2.880 / 3 = 960 \text{ MWh/jaar}$.

De elektriciteitsvraag bij de toepassing van de geïntegreerde koeling bedraagt $2.880 / 8 = 360 \text{ MWh/jaar}$

De energiebesparing is gelijk aan $960 - 360 = 600 \text{ MWh/jaar}$.

Dit is gelijk aan een besparing op energiekosten van $600 \text{ MWh/jaar} \times 60 \text{ euro/MWh} = 36.000 \text{ euro/jaar}$.

6.3 Investerings

De investering van één luchtgekoelde airconditioning (of koelmachine) met een capaciteit van 250 kW wordt ingeschat op € 100.000 ($\pm 40\%$). Dit is inclusief circulatiepomp, leidingwerk en appendages, instrumentatie en regeltechniek, elektrische bekabeling en aansluitingen en indirecte kosten.

De investering van één platenwarmtewisselaar met een capaciteit van 500 kW wordt ingeschat op € 100.000 ($\pm 40\%$). Dit is inclusief circulatiepomp, 2 x 40 meter 4" leidingwerk aansluiting op de leidingbrug, appendages, instrumentatie en regeltechniek, elektrische bekabeling en aansluitingen en indirecte kosten.

De meer-investering van de toepassing van geïntegreerde koeling (twee luchtgekoelde koelmachines en één warmtewisselaar) ten opzichte van de referentie (drie luchtgekoelde koelmachines) bedraagt $\text{€ } 100.000 - \text{€ } 100.000 = \text{€ } 0$.

6.4 Conclusie

De meer-investering van integratie van de gebouwgebonden koeling met het chilled watersysteem bedraagt € 0, terwijl de jaarlijkse besparing op energie 36.000 euro per jaar bedraagt.

Daarnaast zijn er nog een aantal additionele voordelen aan de geïntegreerde koeling:

- iets lagere jaarlijkse onderhoudskosten, doordat er één luchtgekoelde koelmachine wegvalt;
- meer flexibiliteit, en een hogere redundancy;
- bij uitval van het chilled water systeem bij een calamiteit, kunnen de luchtgekoelde koelmachines het chilled watersysteem (deels) voorzien van gekoeld water.

Zodoende is besloten om de gebouwkoeling van de centrale regelkamer (CCB)/MCC-ruimte te integreren met het chilled water systeem.



BILFINGER

7 Gebouwgebonden verwarming met restwarmte of warmtepomp

Onderdeel van deze energiestudie was een pinch-analyse (zie hoofdstuk 1). In deze studie is een grafische systematische analyse gemaakt om het maximale restwarmtepotentieel van een proces te bepalen. Naast het maximale restwarmtepotentieel, kunnen de minimaal benodigde voorzieningen voor verwarming en koeling worden bepaald. Hieruit is gebleken dat er op een lager temperatuurniveau van 90°C tot 50°C nog een hoeveelheid warmte in het proces zit. Het temperatuur niveau is echter te laag om nog nuttig te worden ingezet voor procesgebonden toepassingen. In het huidige procesontwerp van de MXDA plant is ervoor gekozen om deze stromen af te koelen met behulp van koelwater.

Vanuit energie oogpunt is het temperatuurniveau nog steeds hoogwaardige warmte voor gebouwgebonden verwarming. Naar aanleiding hiervan is besloten om een analyse te doen naar bruikbare processtromen binnen het benodigde temperatuur niveau voor inpassing in een restwarmte uitkoppelingssysteem. De eis aan de processtroom met betrekking tot de gebouwgebonden verwarming, is dat deze 184 kW restwarmte levert met een aanvoertemperatuur van minimaal 70 °C.

Uit de pinch-analyse kwamen 3 verschillende stromen naar voren die genoeg warmte bevatten en de gevraagde temperatuur konden leveren, dit zijn:

#	Omschrijving	T supply [°C]	T target [°C]	Heat [kW]	mxCP [kW/°C]
1	AE-215 product CW	80	40	9160	229
2	AE-314 product CW	79,6	54	746	29
3	AE-152 product CW	80	60	2500	125

Als tweede alternatief, kan de toepassing van een water/water-warmtepomp worden toegepast met een verwarmingscapaciteit van 2 x 92 kW. De warmtebron voor de water/water-warmtepomp is het chilled water circuit. Als gevolg hiervan wordt er dus "gratis" koeling verkregen.

7.1 Uitgangspunten

Referentie

Als referentie wordt een luchtgekoelde warmtepomp beschouwd als vergelijking met de twee alternatieven.

Warmtevermogen warmtepomp:	2 x 92 kWth = 184 kWth
Opgenomen elektrische vermogen warmtepomp:	2 x 37 kWe = 74 kWe
Aantal equivalente vollasturen voor gebouwverwarming:	2.200 uur/jaar
Elektriciteitsstarief:	60 euro/MWh

Inzet van restwarmte

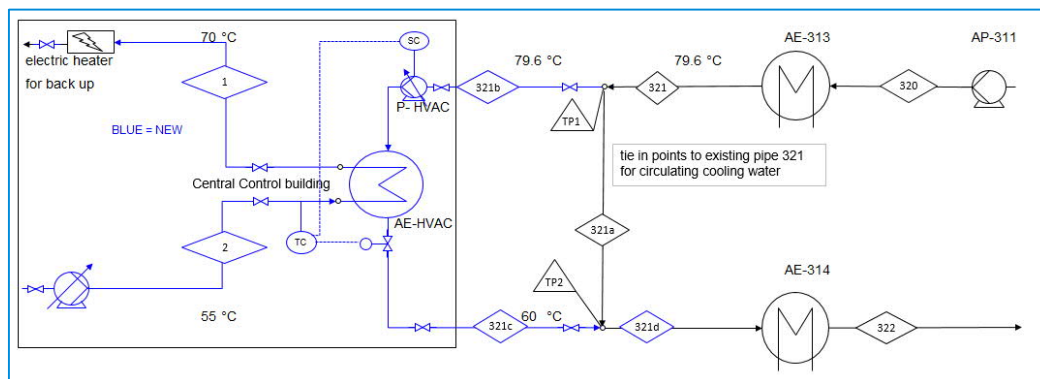
Na onderzoek is gebleken dat processtroom **2** het beste in het scenario valt, hierbij is o.a. gekeken naar ruimte voor inpasbaarheid van de oplossing en welk product in de leidingen zit. In het verdere vervolg van de studie zal een uitwerking gemaakt worden om warmte van de geselecteerde processtroom in te zetten voor HVAC in het centrale controlegebouw van MGC.

In het oorspronkelijke ontwerp van het centrale controlegebouw wordt er gebruik gemaakt van een lokale lucht/lucht-warmtepomp, welke dan ook wordt vergeleken met het inpassen van de restwarmtebron. In bijlage 8 is de berekeningssheet opgenomen waarin het ontwerp van de inpassing van de restwarmtebron wordt getoetst ten opzichte van een lucht/water-warmtepomp.



BILFINGER

De restwarmte zal worden uitgekoppeld tussen warmtewisselaars AE-313 en AE-314, hiertussen wordt een nieuwe warmtewisselaar geplaatst die de warmte over het HVAC systeem zal distribueren voor het centrale controlegebouw. Figuur 7.1 geeft een schema van met de inpassing van de restwarmtebron.



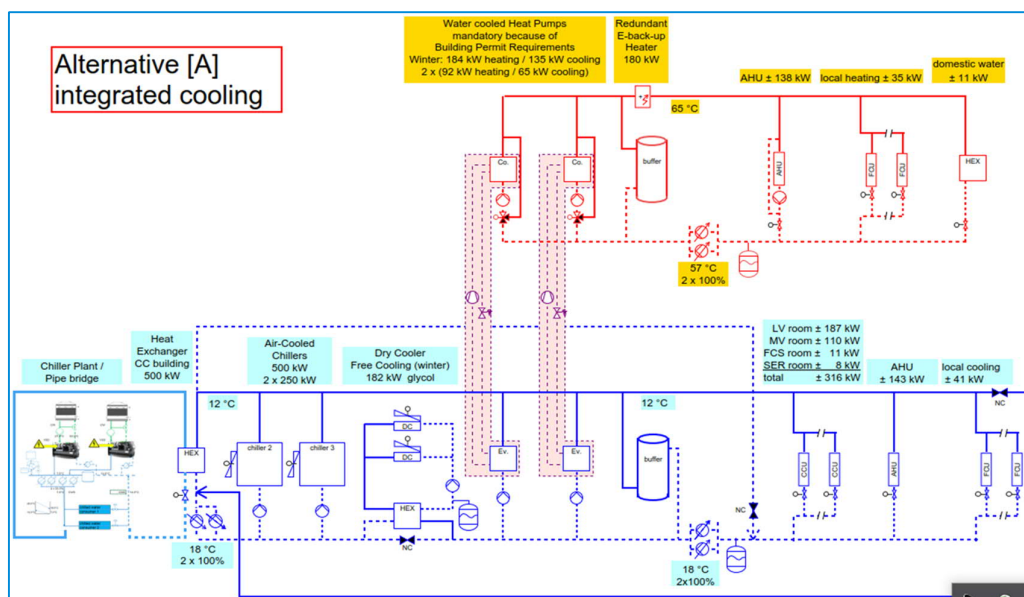
Figuur 7.1 - Inpassing restwarmtebron in het centrale controle gebouw (blauw is nieuw)

De routing van het leidingwerk bestaat uit 2" leidingwerk vanaf de warmtewisselaar welke via de leidingbrug naar de CCB loopt. De installatie bestaat uit twee pompen (2 x 100%), een warmtewisselaar met een capaciteit van 184 kW, een elektrisch verwarmingselement (als back-up), inclusief kleppen, appendages, instrumentatie en regeltechniek.

Warmtevermogen warmtewisselaar:	184 kWth
Opgenomen elektrische vermogen warmtepomp:	0,4 kWe (verwaarloosbaar klein t.o.v. warmtepomp)
Aantal equivalente vollasturen voor gebouwverwarming:	2.200 uur/jaar

Inzet water/water-warmtepomp

Een water/water-warmtepomp kan worden toegepast waarbij het chilled watersysteem kan worden ingezet als warmtebron. In onderstaande afbeelding is dit schematisch weergegeven.



Figuur 7.2 - Inpassing warmtepomp in het centrale controle gebouw met chilled watersysteem als warmtebron

In het schema is eveneens de integratie van de gebouwgebonden koeling met het chilled watersysteem meegenomen (zie hoofdstuk 6). De warmtepomp onttrekt warmte uit het chilled water systeem, waardoor deze als “gratis” koeling kan worden ingezet.

Warmtevermogen warmtepomp:	2 x 92 kWth = 184 kWth
Koelvermogen warmtepomp:	2 x 65 kWth = 130 kWth
Opgenomen elektrische vermogen warmtepomp:	2 x 27 kWe = 54 kWe
Aantal equivalente vollasturen voor gebouwverwarming:	2.200 uur/jaar

7.2 Energiebesparing

De jaarlijkse warmtevraag is gelijk aan $184 \text{ kWth} \times 2.200 \text{ uur/jaar} = 405 \text{ MWh}$.

Het jaarlijkse elektriciteitsverbruik van de luchtgekoelde warmtepomp bedraagt $74 \text{ kWe} \times 2.200 \text{ uur/jaar} = 163 \text{ MWh/jaar}$.

De restwarmte is gratis. Bij de inzet van restwarmte kost enkele pompenergie, welke als verwaarloosbaar klein mag worden beschouwd. Het elektriciteitsverbruik bedraagt in dit geval dus 0 MWh/jaar

Het elektriciteitsverbruik van de water / water warmtepomp bedraagt $54 \text{ kWe} \times 2.200 \text{ uur/jaar} = 119 \text{ MWh}$.

Bij toepassing van de water/water warmtepomp wordt er dan gelijktijdig 286 MWh “gratis” koeling geleverd. Bij een jaargemiddelde COP van 8 van het chilled watersysteem (zie hoofdstuk 6) wordt hiermee jaarlijks $286/8 = 36 \text{ MWh}$ aan elektriciteit bespaard. Het totale elektriciteitsverbruik bedraagt hiermee $119 - 36 = 83 \text{ MWh/jaar}$.

7.3 Investerings

De investering van twee lucht/water warmtepompen met een capaciteit van 92 kW per stuk wordt ingeschat op €92.000 (± 40%). Dit is inclusief circulatiepomp, leidingwerk en appendages, instrumentatie en regeltechniek, elektrische bekabeling, aansluitingen en indirecte kosten.

De investering van één warmtewisselaar met een capaciteit van 184 kW wordt ingeschat op € 110.000 (± 40%). Dit is inclusief circulatiepomp, 2 x 70 meter 2" leidingwerk + aansluiting op de leidingbrug, appendages, instrumentatie en regeltechniek, elektrische bekabeling, aansluitingen en indirecte kosten¹².

De investering van twee water/water warmtepompen met een capaciteit van 92 kW per stuk wordt ingeschat op €138.000 (± 40%). Dit is inclusief circulatiepompen in koel- en verwarmingscircuit, leidingwerk in koel- en verwarmingscircuit, appendages, instrumentatie en regeltechniek, elektrische bekabeling, aansluitingen en indirecte kosten.

¹² Exclusief tracing



BILFINGER

7.4 Conclusie

In onderstaand overzicht is de referentie lucht/water warmtepomp gegeven met beide alternatieven, restwarmte en de water/water warmtepomp.

		Lucht/water warmtepomp (referentie)	Restwarmte	Water/wWater warmtepomp
Energieverbruik	[MWh/jaar]	163	0	83
Energiebesparing	[MWh/jaar]	0	163	80
Kostenbesparing	[€/jaar]	0	9.800	4.800
Schoonmaak	[€/jaar]	0	-4.500	0
Totale besparing	[€/jaar]	0	5.300	4.800
Investering ($\pm 40\%$)	[€]	92.000	110.000	130.000
Δ Investering	[€]	0	18.000	38.000
Terugverdientijd	[jaar]	referentie	3.4	7.9

De toepassing van restwarmte of de inzet van een water/water warmtepomp verhogen de energie-efficiency met betrekking tot de gebouwgebonden verwarming, in vergelijking met een (conventionele) lucht/water warmtepomp.

De investering in een restwarmtesysteem is ongeveer gelijkwaardig ten opzichte van een lucht/water-warmtepomp. De besparing is dermate, dat de terugverdientijd hiermee minder is dan 5 jaar. De inzet van restwarmte is echter wel complexer en vereist meer aandacht in engineering, bedrijfsvoering, onderhoud en schoonmaak als gevolg van vervuiling aan de primaire zijde van de warmtewisselaar. Ondanks een lagere terugverdientijd bij de inzet van restwarmte is daarom gekozen voor de optie van een water/water-warmtepomp met het chilled watersysteem als warmtebron. Bijkomend voordeel is dat hiermee ook bespaard wordt op de benodigde energie voor koeling, en er ook extra leveringszekerheid wordt gecreëerd.



BILFINGER

8 Eindconclusie

Uit de pinch-analyse is af te leiden dat de nieuwe MXDA-fabriek zelfvoorzienend is in de warmtevoorziening. Dit komt door de grote hoeveelheid exotherme warmtestroomafgifte op een hoog temperatuurniveau van de incinerator (naverbrander) en de ammomoxidatie-reactor. De externe warmtebehoefte is hierdoor ook nihil (enkel ter aanvulling tijdens maximaal bedrijf en opstart). Dit betekent dat energiebesparende of duurzame maatregelen op het gebied van de warmtevoorziening voor het proces niet van toepassing is.

Echter, de pinch-analyse laat zien dat er een groot temperatuurverschil is tussen de op te warmen processtromen en af te koelen processtromen. Dit heeft als gevolg een hoog exergieverlies. Nadere analyse wijst uit, dat dit exergieverlies zich met name manifesteert in de reductie van stoomdruk van hogere naar lagere druk. Om het exergieverlies door stoomdrukreductie te compenseren, kan gebruik worden gemaakt van een stoomexpansiesysteem, zoals een stoommotor of stoomturbine. Hiermee kan elektriciteit worden opgewekt. Een ééntraps stoomturbine met een straalbuisgroep geregelde vermogensregeling verdient de voorkeur boven een stoommotor. Hiermee kan een groot vermogen van circa 1 MW elektriciteit worden opgewekt. Op jaarbasis is dit gelijk aan circa 5.300 tot 5.700 MWh elektrische energie. Echter na expansie ontstaat er natte stoom aan de lagedrukzijde, welke extern aangevuld dient te worden. Dit is een forse hoeveelheid op jaarbasis, en om deze reden wordt de toepassing van een stoomexpansiesysteem, met een terugverdientijd van 11 tot 13 jaar, niet als haalbaar beschouwd.

De pinch-analyse laat zien dat er wel een externe koudebehoefte (koeling) nodig is. In die zin kan de inzet van energiebesparende maatregelen of duurzame maatregelen op het gebied van koudevoorziening wel nuttig zijn. In dit kader is gekozen om de chiller plant te voorzien van een separate specifieke koeltoren per koelmachine, in plaats van een aansluiting op het centrale gekoeld watersysteem. Dit geeft een aanzienlijke gemiddelde jaarlijkse rendementsverbetering en daarmee een energiebesparing op elektriciteit van 1.300 MWh. De terugverdientijd van deze maatregel bedraagt hierdoor 2,5 jaar. Deze energiebesparende maatregel is toegepast in het installatietechnische ontwerp.

Door de toepassing van stoomtracing kan jaarlijks 2.591 MWh/jaar worden bespaard ten opzichte van de toepassing van elektrische tracing (als referentie). De besparing op de energiekosten bedragen 146.000 euro/jaar in vergelijking met elektrische tracing. Bij een meerinvestering van 276.000 euro is de terugverdientijd lager dan 2 jaar. Stoomtracing wordt daarom toegepast in plaats van elektrische tracing.

De gebouwgebonden koeling van de centrale regelkamer (CCB) en de MCC-ruimten kunnen worden geïntegreerd met het centrale chilled water systeem. Het rendement in de opwekking van het chilled water met een jaargemiddelde COP van 8 is hoger dan met luchtgekoelde airconditioning (jaargemiddelde COP van circa 3). De jaarlijkse energiebesparing op elektriciteit bedraagt circa 600 MWh/jaar. De besparing op energiekosten bedraagt hiermee 36.000 euro/jaar. De investering van bovengenoemde integratie ten opzichte van luchtgekoelde airconditioning is gelijkwaardig ($\Delta\text{CAPEX} = 0$ euro). De gebouwgebonden koeling wordt daarom geïntegreerd met het centrale chilled water systeem in het installatietechnisch ontwerp.

Een deel van de externe koudebehoefte op hoger temperatuurniveau is restwarmte, welke ingezet kan worden voor gebouwgebonden verwarming van de centrale regelkamer (CCB) en overige ruimten zoals kantoren. Een alternatief is om gebruik te maken van een water/water-warmtepomp welke zijn warmte onttrekt aan het centrale chilled water systeem. Beide maatregelen hebben een energiebesparend effect in vergelijking met de referentie, een lucht/water-warmtepomp. De toepassing van een water/water warmtepomp heeft de voorkeur boven het gebruik van restwarmte, omwille van complexiteit, onderhoud en schoonmaak. Om deze redenen wordt de toepassing van een water/water-warmtepomp geïmplementeerd in het installatietechnisch ontwerp. Bovendien wordt met deze oplossing extra leveringszekerheid van chilled water verkregen voor de gebouwgebonden koeling. De energiebesparing bedraagt vergeleken met de referentie jaarlijks 80 MWh/jaar (= 4.800 euro/jaar), bij een meerinvestering van circa 38.000 euro. De terugverdientijd is hiermee gelijk aan circa 8 jaar.



BILFINGER

Bijlage 1 **Input processtromen pinch-analyse MXDA-fabriek**
[vertrouwelijk]

Bijlage 2 **Gedetailleerde stoombalans**
[vertrouwelijk]

Bijlage 3 **Incineratormodel Case 3**
[vertrouwelijk]



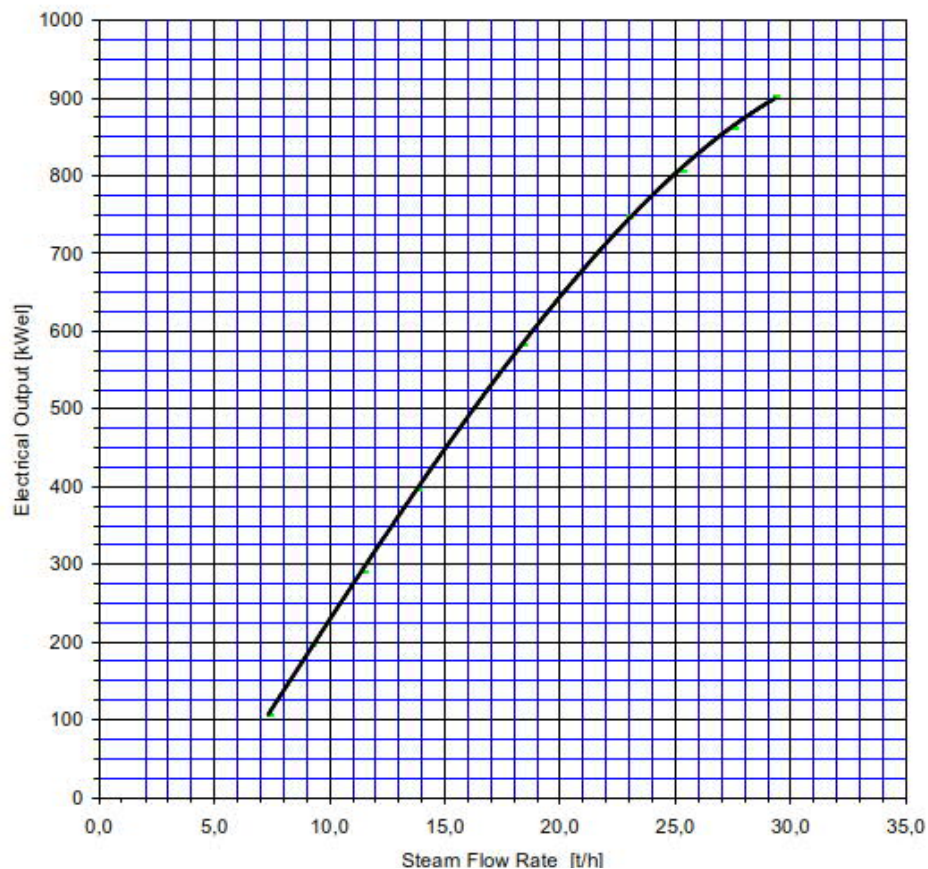
BILFINGER

Bijlage 4 Stoommotor/generator set (Spilling)

SPILLING STEAM MOTOR - Generator - Set

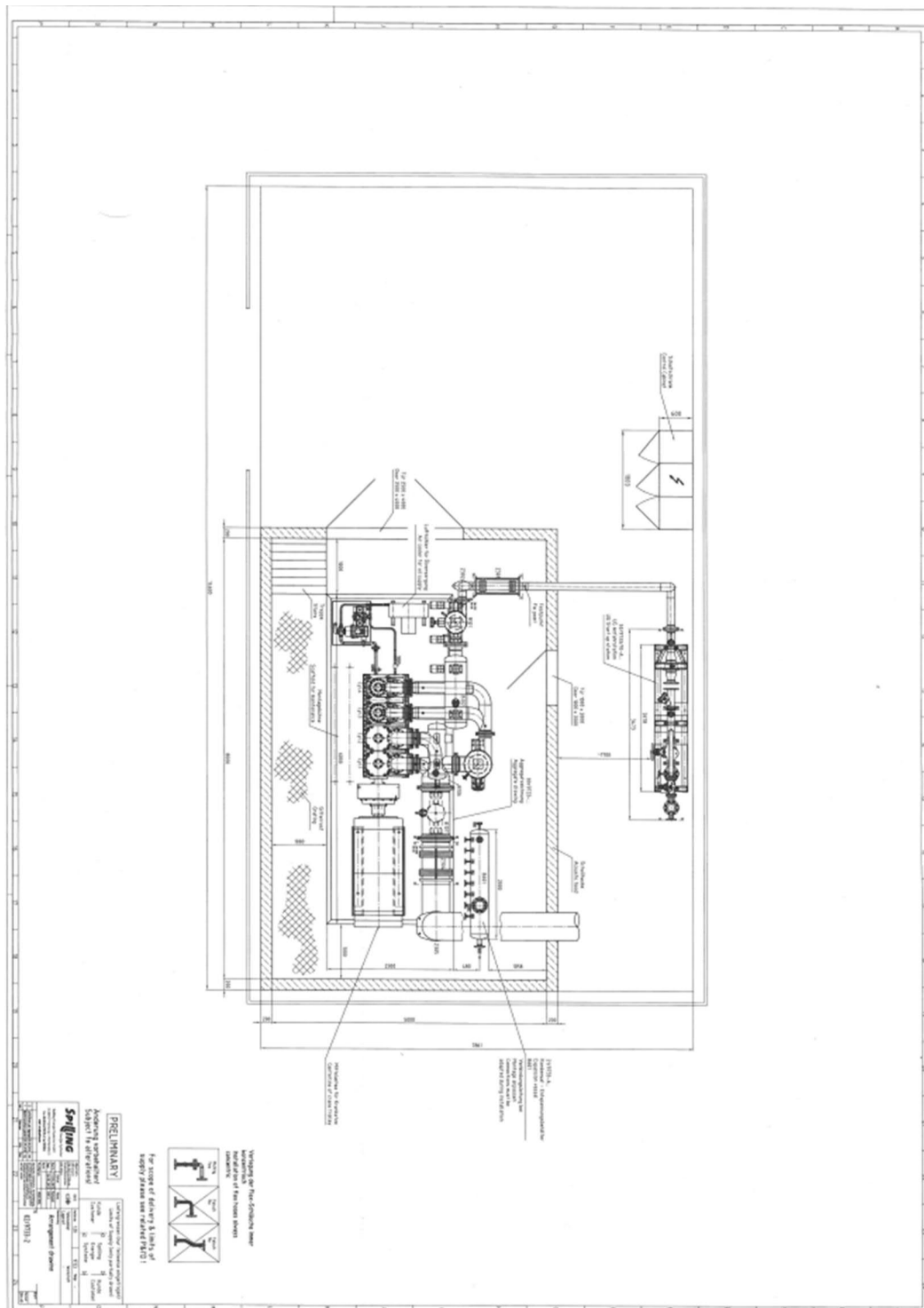
(Electrical Output - Steam Flow Rate)

Engine Type:		4-H12 TS
Number of Cylinders:		4
Number of Expansion Stages:		1
Speed:	[rpm]	1000
Generator Rating:	[kVA]	1.130
Voltage:	[V]	400
Frequency:	[Hz]	50
Boiler (Exit):	[barg] / [°C]	50,0 / s
Inlet - Engine:	[barg] / [°C]	42,0 / s
Outlet - Engine:	[barg]	15,0





BILFINGER





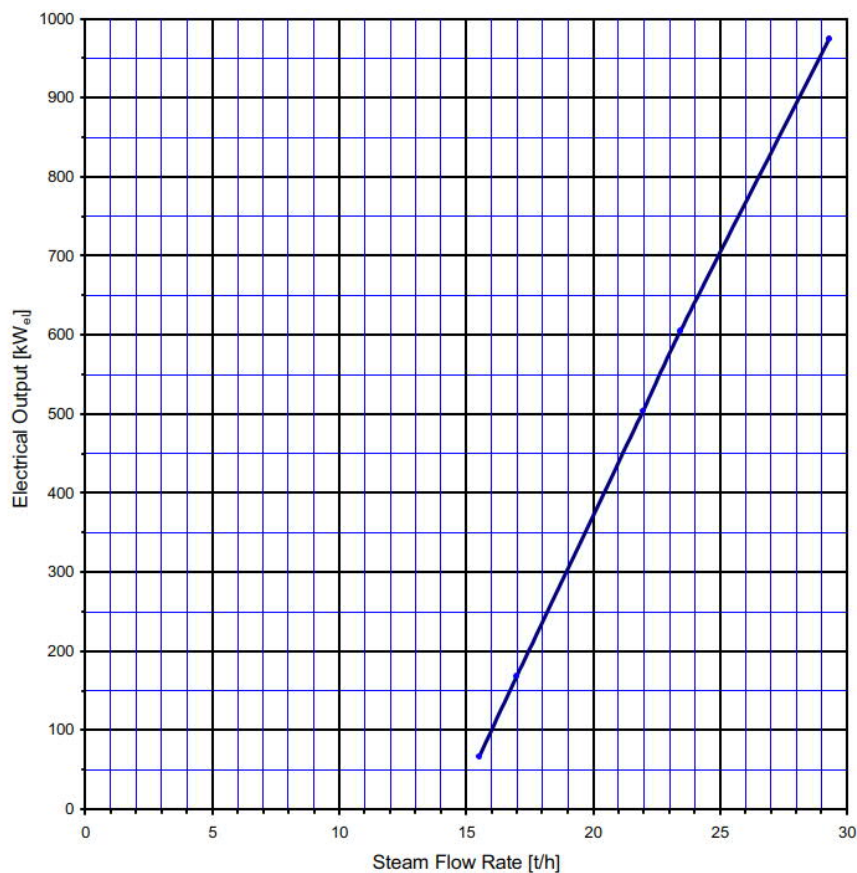
BILFINGER

Bijlage 5 Stoomturbine (Spilling)

SPILLING - Steam Turbine Set vs. Steam Engine Set

(Indicative Performance Diagram based on the Steam Flow Rate, preliminary)

Turbine / Engine Typ:		STS - C - 1
Turbine / Engine Speed:	[min ⁻¹]	8.000
Generator Speed:	[min ⁻¹]	1.500
Generator Rating:	[kVA]	1.220
Voltage:	[V]	400
Frequency:	[Hz]	50
Boiler Outlet:	[barg] / [°C]	
Turbine Inlet:	[bar abs] / [°C]	51/ s
Turbine Outlet:	[bar abs.] / [°C]	16/

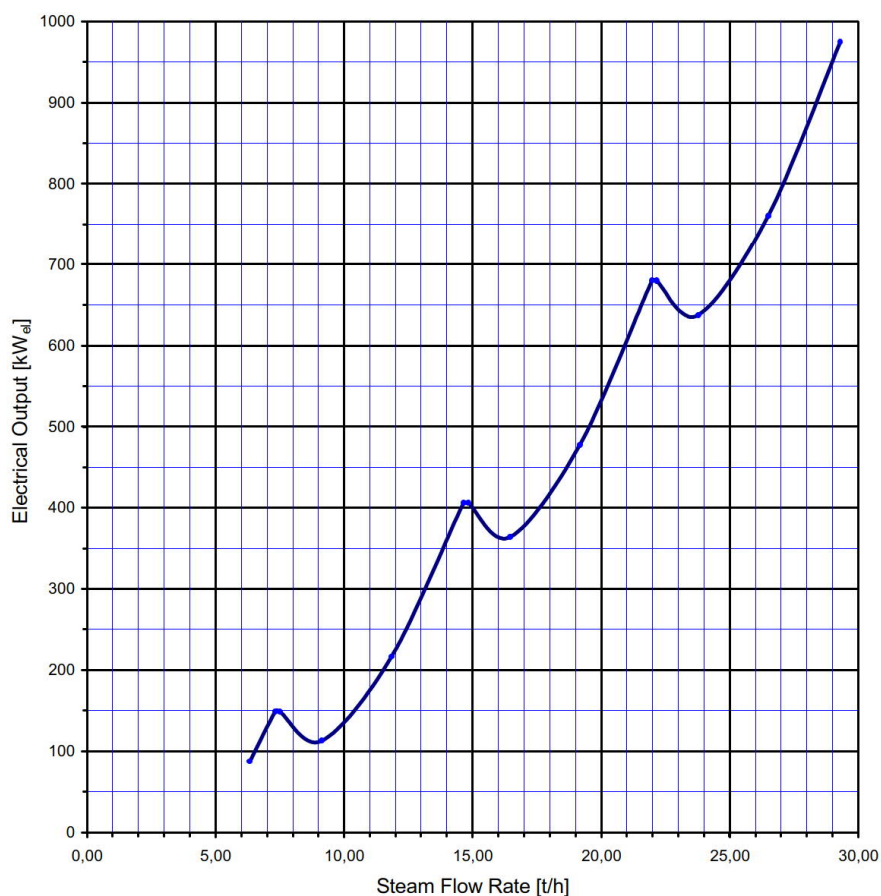




BILFINGER

SPILLING - Steam Turbine Set vs. Steam Engine Set (Indicative Performance Diagram based on the Steam Flow Rate, preliminary)

Turbine / Engine Typ:	STS - C - 1	
Turbine / Engine Speed:	[min ⁻¹]	8.000
Generator Speed:	[min ⁻¹]	1.500
Generator Rating:	[kVA]	1.220
Voltage:	[V]	400
Frequency:	[Hz]	60
Boiler Outlet:	[barg] / [°C]	
Turbine Inlet:	[bar abs] / [°C]	51/ s
Turbine Outlet:	[bar abs.] / [°C]	16/



Bijlage 6 Multicriteria-analyse – Kesselring-methode

The mca method is developed by the Technical University of Twente by F. Kesselring. This evaluation technique is originally from the methodical design technology, but it is also a suitable tool for comparing various energy saving measures with each other. Each energy efficient feature is tested on various criteria, classified in functionality and feasibility.

Functionality criteria:

- Reliability
- Maintainability
- Technical working life
- Availability / proven technology
- Complexity / ease of use
- Emission

Feasibility criteria:

- Investment
- Energy saving
- Architectural impact
- Required space
- Flexibility / adaptability
- Dependence of third parties

The energy efficient measures (options) are evaluated for each functional and feasible criteria by means of a rating and a weighting factor. The value of the weighting factor can be determined by considering the different criteria with each other.

The rating is a number from 1 to 4. The option which meet the requirements of the criteria the best, gets the highest rating (in this case 4). The weighting factor is a multiplication constant. The criteria that are most important get the highest weighting factor (as mentioned before). The multiplication of the rating with the weighting factor gives the score per criteria. The total score is related as a percentage of the maximum score, see also the example in the table below.

OPTION 1: Night time cooling

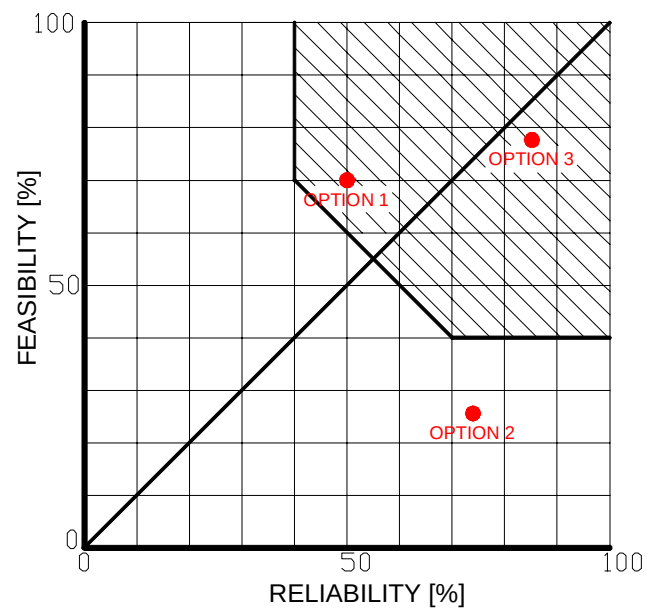
FUNCTIONALITY Criteria	Rating (R)	Weighing Factor (WF)	Score (R x WF)	Max Score (4 x WF)
Reliability	3	5	15	20
Maintainability	2	2	4	8
Etc..	...	...	...	...
TOTAL SCORE			55	80
PERCENTAGE OF MAX SCORE			69%	100%

Example: scoring method

Per option (or energy efficient measure) a percentage of the maximum score will be generated for both the functionality and the feasibility criteria. The percentage for the reliability and the feasibility of the different options are plotted in a diagram called the S-curve (see the example below). One condition is that the score of an option is situated in the shaded area of the S-curve. In this case option 2 will not satisfy and is therefore not suitable. The option that lies *closest to the straight line and in the upper right corner of the S-curve (100% point)* is the best possible energy efficient measure. In the example below, this is option 3.



BILFINGER



Example: S-curve; option 3 has the best score and is the best possible solution, option 2 is outside the marked area and therefore not suitable as possible solution.

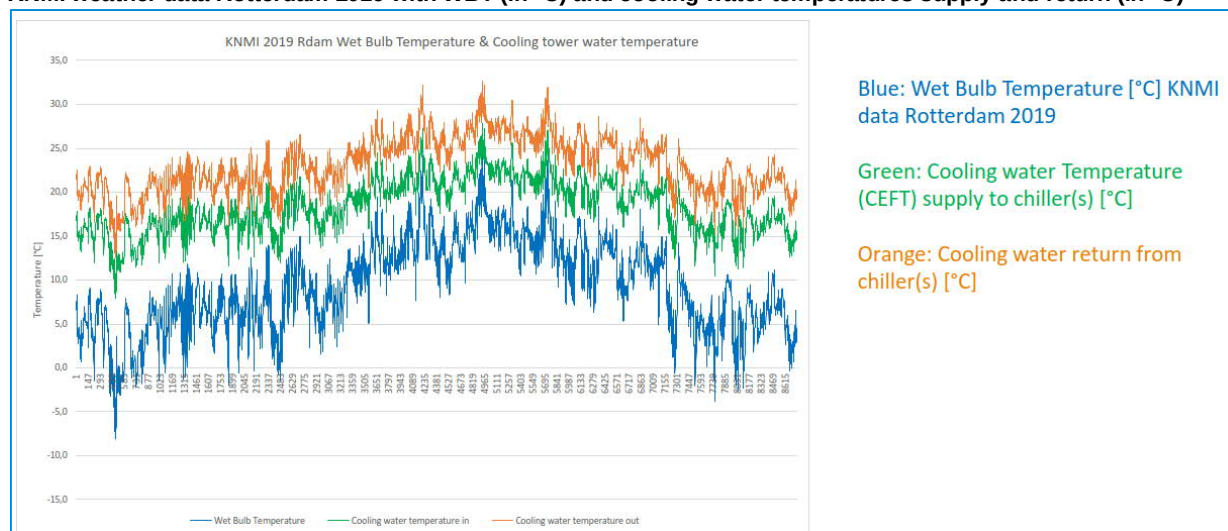


BILFINGER

Bijlage 7 Berekening separate koeltoren versus centraal gekoeld watersysteem

INPUT PARAMETERS			Remarks
Chiller maximum duty	[kW]	3.500	Installed capacity
Number of chillers	[-]	2	
Average chiller load	[%]	83	
Chilled water in	[°C]	13,5	
Chilled water out	[°C]	7	
Operation	[h/yr]	7.200	
Tarif for electricity	[€/MWh]	70	
Average total normal chilled water duty	[kW]	5.800	@ average chiller load
Central cooling system			
Cooling water system	[°C]	26	Minimum temperature of the central cooling water system
Dedicated cooling tower			
COP summer (100% load)	[-]	6,4	Based on data 3500 kW York centrifugal chiller
Cooling tower design	[kW]	4.047	Maximum capacity of cooling tower, in case one chiller
Cooling water in	[°C]	27	Supply temperature to chiller from cooling tower
Cooling water out	[°C]	33	Return temperature from chiller to cooling tower
Design wet bulb temp	[°C]	22	
Minimum approach	[K]	4	At full design load 4047 kW = 5K, at normal lower load (80%) approach = 4 K

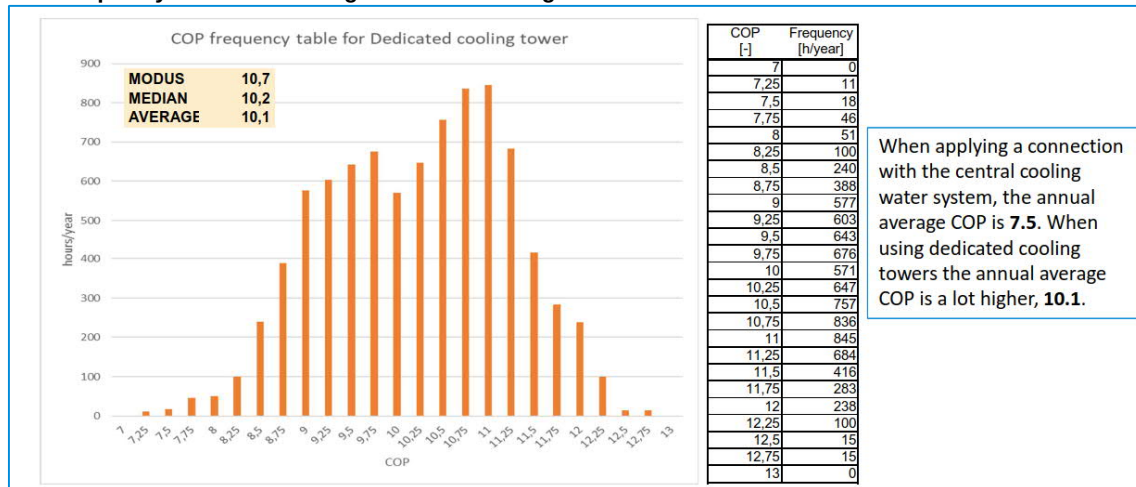
KNMI weather data Rotterdam 2019 with WBT (in °C) and cooling water temperatures supply and return (in °C)





BILFINGER

COP frequency table when using dedicated cooling tower



Energy Consumption

ENERGY CONSUMPTION (Rotterdam weather data 2019)				Remarks
Central cooling water system				
Central cooling water system	[MWh/yr]	5.568		
Annual average COP	[-]	7,5		
Dedicated cooling tower				
With separate cooling tower	[MWh/yr]	4.176		
Annual average COP	[-]	10,1		
Savings				Energy consumption difference by fans and pumps is negligibly small (average difference in absorbed electric power)
Yearly energy savings	[MWh/yr]	1.392		
annual average hourly savings by chillers	kW	193		
Yearly financial savings	[€/yr]	97.000		Savings with regard to energy consumption

Investment for central cooling tower connection and dedicated cooling tower

INVESTMENT				Remarks
Central cooling water system				Estimated length for supply 70 meter and return piping 70 meter (DACE, B4003, 16" type A) (DACE, F2003, 1-column support with couplings in the longitudinal direction) Estimated Direct and indirect costs
Cooling water supply/return piping	[m]	70		
Investment for piping 16"	[€/m]	1.540		
Pipebridge	[€/m]	1.060		
Smaller piping, fittings and valves	[€]	50.000		
Total investment	[€]	414.000		



BILFINGER

INVESTMENT			Remarks
Dedicated cooling tower			
Duty per cooling tower	[kW]	4.047	
Number of cooling towers	[-]	2	
Price per cooling tower	[€/unit]	104.000	including site assistance, SAT, platforms offer Thermica 21-09-2020
Total cooling towers	[€]	208.000	
Piping	[%]	50	Hand factor. Including cooling water, chilled water, blow down and MU water
Total piping	[€]	104.000	
Total re-inforcement	[€]	50.000	Estimated, operating weight of 2 cooling towers is approximately 17.000 kg
Electrical	[%]	3	Hand factor (for heat exchanger as reference)
Total electrical	[€]	6.300	
Testing and miscellaneous	[%]	3	Hand factor (for heat exchanger as reference)
Total testing and miscellaneous	[€]	6.300	
Transport and installation	[%]	25	Hand factor (for heat exchanger as reference)
Total transport and installation	[€]	26.000	
Cooling tower pumps	[m³/h]	580	
Number of pumps	[-]	2	
	[€/pce]	27.000	Source, Grundfoss inline centrifugal pump, 580 m³/h, Δp = 30 m
Total cooling tower pumps	[€]	54.000	
Water treatment	[€]	40.000	Estimated
Total direct costs	[€]	495.000	
Indirect costs = 1/3 of direct costs	[€]	165.000	
Total investment	[€]	660.000	

(Simple) payback time

PAY BACK TIME			Remarks
Additional investment dedicated CT's	[€]	246.000	
Simple PBT	[year]	2,5	



BILFINGER

Bijlage 8 **Berekening restwarmtebenutting gebouwgebonden verwarming**
[vertrouwelijk]

Bijlage 9 **Indicatieve CAPEX vergelijking**
[vertrouwelijk]

Bijlage 10 **Pinch-analyse**
[vertrouwelijk]

Bijlage 11 **Massa- en warmtebalans stoomexpansiesysteem**
[vertrouwelijk]

Bijlage 12 **PFD Stoommotor**
[vertrouwelijk]

Bijlage 13 **PFD Stoomturbine**
[vertrouwelijk]

Bijlage 14 **Berekening stoom tracing versus elektrische tracing**
[vertrouwelijk]