

Ontwerp en constructie van een regenerator voor hygroscopische zoutoplossingen.

Hugo Monteyne (UGent), Filip Bronchart (UGent)

Onderzoek uitgevoerd door: Universiteit Gent

1



Interreg



Vlaanderen-Nederland
Europees Fonds voor Regionale Ontwikkeling

AGENTSCHAP
INNOVEREN &
ONDERNEMEN



Vlaanderen
is ondernemen



Provincie
Antwerpen



Ministerie van Economische Zaken
en klimaat

provincie limburg
gesubsidieerd door de Provincie Limburg



Flanders
State of the Art

Titel	Ontwerp en constructie van een regenerator voor hygroscopische zoutoplossingen.
Proefperiode	n.v.t.
Contactgegevens	Universiteit Gent Sint-Pietersnieuwstraat 41, B4; 9000 Gent Filip Bronchart Filip.Bronchart@UGent.be Hugo Monteyne Hugo.Monteyne@UGent.be
Project	Dit onderzoek vond plaats binnen het project GLITCH. GLITCH zet in op de ontwikkeling van innovatieve energie-efficiënte en klimaatneutrale teelttechnieken en -systemen in de glastuinbouw. https://glitch-innovatie.eu/
Steunvermelding	Dit onderzoek wordt enerzijds mogelijk gemaakt met de steun van het Interreg V programma Vlaanderen-Nederland, het grensoverschrijdend samenwerkingsprogramma met financiële steun van het Europees Fonds voor Regionale Ontwikkeling. Anderzijds wordt het project ondersteund vanuit het Agentschap Innoveren en Ondernemen (VLAIO), de Provincie Antwerpen, Het Vlaams Kabinet Omgeving, Natuur en landbouw, de provincie Limburg (NL) en het Nederlands Ministerie van Economische zaken.



GLITCH

Afkortingen

COP Coefficient of performance

GWP Global Warming Potential

PVC Polyvinyl chloride

WMW Warmtemassawisselaar





Samenvatting / Abstract

De damp-naar-warmtepomp is een nieuw concept van droogtechniek met als doelstelling een *coefficient of performance* (COP) bekomen voor ontvochtiging van 10. Het systeem bestaat uit een warmte-massa-wisselaar en een regenerator. UGent heeft de voorbije 8 jaar kennis en expertise rond beide componenten opgebouwd met o.a.:

- Een functionerende full scale low-flow tegenstroom warmte-massa-wisselaar (WMW) in een tomatenkas van 0.07 ha te Sint-Katelijne-Waver. Deze warmte-massa-wisselaar is het deel van de damp-naar-warmtepomp. In een WMW, de zoutoplossing neemt waterdamp uit de lucht. Hierbij wordt voelbare warmte vrijgegeven.
- De onderzoeksgroep UGent streefde ernaar om in mei 2021 in het Technicum te beschikken over een pilootregenerator. Deze generator is in aanvang van de constructie.

De regenerator heeft 30 kW verdampersvermogen en is van het type "warmtepomp gedreven vacuüm verdamper". Door de hoge efficiëntie van deze ontvochtigingstechniek, de beheersbare energiekosten en het brede toepassingsgebied (groot temperatuurbereik waarbij geen corrosie problemen optreden) is deze techniek baanbrekend t.o.v. alle andere marktbeschikbare droogtechnieken. De in te schatten markt- en klimaatimpact is zeer groot omdat drogen in industriële processen wereldwijd 1) gemiddeld verantwoordelijk is voor 15-25% van de totale energievraag in de industrie en 2) momenteel een COP heeft in de range van 0.5 tot max. 4 wat ver beneden de prestaties ligt van het huidig ontwerp. Deze technologie kan toegepast worden naast in de glastuinbouw in de voedings-, hout-, textiel- en chemische industrie.

De uitdagingen in dit project zijn:

- Ontwerp van het warmtepomp systeem op hoge temperatuur.
- Ontwerp van de verschillende onderdelen die zowel temperatuurbestand als corrosiebestand dienen te zijn in een omgeving van een zeer corrosieve zoutoplossing.
- Materiaal selectie
- Koelmiddel selectie
- Constructie
- Het in werking brengen/testen van de prototype verdamper



Inhoudstafel

2. Inhoudstafel

Afkortingen	3
Samenvatting / Abstract	4
Inhoudstafel.....	5
1. Toepassingsmogelijkheden van de damp-naar-warmte-pomp	6
2. Technologie	7
2.1. Achtergrond.....	7
2.2. Huidige toestand	8
3. Corrosie	9
4. Hoge temperatuur warmtepomp.....	11
5. Procesvat	11
6. Alternatieve uitvoeringen	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.



1. Toepassingsmogelijkheden van de damp-naar-warmte-pomp

De mogelijkheden voor de damp-naar-warmte-pomp vloeien voort uit het bewijs dat industriële droogprocessen energie-intensief zijn. Enkele feiten om te illustreren:

- Drogen is wereldwijd verantwoordelijk voor 12 tot 20% van het energieverbruik in de industriële sector (Milind en Kota, 2005; Raghavan et al., 2005; Gremmen, van Haperen, & Lamerichs, 2009).
- Minea (2011) en Mujumbar (2007) stellen dat 25% van de industriële energie wordt gebruikt voor het drogen in de geïndustrialiseerde landen.
- Het aandeel van de energie die voor het drogen wordt gebruikt, is gerelateerd, worden enkele gemiddelde waarden genoemd door Kowalski en Pawlowski (2011): voeding en landbouw 12%, papier 33%, hout 11%, keramiek en bouwmaterialen 11%, textiel 5%.

Ondanks de grote potentiële energiebesparingen bij de industriële droogprocessen, is het drogen momenteel verre van efficiënt. Enkele feiten om te illustreren:

- Het is bekend uit de omkeerbare thermodynamica dat een theoretische COP kan worden bereikt van 50 tot 150 voor een relatieve vochtigheid van 50 tot 75%. De meeste droogprocessen zijn echter gebaseerd op verwarming en het verwijderen van vochtige, warmere lucht en de toevoer van droge, koudere lucht (verder "verwarmen en ventileren" genoemd) met een COP van 0,5 (in plaats van een waarde tussen 50 en 150) voor kamertemperatuur die oploopt tot 1 voor hogere temperaturen .
- De best beschikbare droogtechnieken op de markt behalen een COP tussen 1 en 4. Onze technologie van de damp-naar-warmte-pomp, met een verwachte maximale COP van 10, presteert veel beter op het gebied van energie-efficiëntie. De damp-naar-warmte-pomp vermindert dus met een orde van grootte de energie-input in vergelijking met de huidige droogmethoden.
- De damp-naar-warmte-pomp wordt elektrisch aangedreven en kan volledig werken op hernieuwbare energie als bron. Beide kenmerken zorgen ervoor dat de uitrol van dit apparaat de samenleving ten goede zou komen in termen van een grote vermindering van het gebruik van fossiele brandstoffen.

Afgezien van deze energie (efficiëntie) argumenten, heeft onze damp-naar-warmte-pomp vele andere commerciële voordelen:

- Het is één en dezelfde technologie voor alle temperatuur-bereiken, in tegenstelling tot de beste momenteel beschikbare droogtechnieken.
- Het vloeibare droogmiddel maakt energieopslag mogelijk die de fluctuaties van de productie van hernieuwbare energie kan verminderen.





- Het vergemakkelijkt het verminderen van geurhinder en verhoogt de kwaliteit van droogprocessen.
- Het heeft vergelijkbare investeringskosten als de huidige beste beschikbare droogtechnieken.

Deze feiten laten zien waarom de impact van de damp-naar-warmte-pomp moet worden geclassificeerd als "baanbrekend". De technologie kan zelfs worden beschouwd als een belangrijke pijler voor de (Europese) industriële transitie.

2. Technologie

2.1. Achtergrond

In de tekst van dit rapport wordt de COP (prestatiecoëfficiënt) voor ontvochtiging vaak gebruikt om rendementen te vergelijken. De definitie is

$$COP = \frac{\text{latente warmte omgezet naar voelbare warmte}}{\text{energieinput}}$$

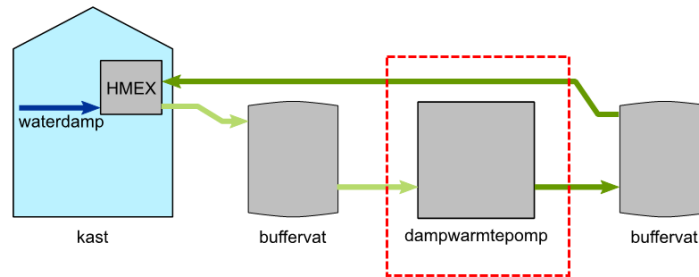
De damp-naar-warmte-pomp is een technologie die is ontstaan uit onderzoek ondersteund door een ILVO-doctoraatsbeurs (2010-2014) waarin Filip Bronchart op basis van een thermodynamische analyse onderzoekt wat de werkpunten zijn om te slagen in een meer klimaatneutrale glastuinbouw. Dit gaf onder meer aan dat de COP van de huidige ontvochtigingstechniek veel lager is dan op basis van een thermodynamische analyse haalbaar lijkt. Dit duidt op een belangrijk energiebesparingspotentieel. Als volgende stap werd daarom een efficiënt ontvochtigingsconcept ontwikkeld, genaamd "damp-naar-warmte-pomp". De naam damp-naar-warmtepomp geeft aan dat de energie die aanwezig is in de damp van de lucht wordt omgezet in warmte met behulp van een pomp (dus om de exergieverschillen te overbruggen). Deze damp-naar-warmte-pomp bestaat uit 2 gekoppelde entiteiten:

- een tegenstroom low-flow warmte-massa-wisselaar: opstijgende lucht komt in contact met een kleine hoeveelheid geconcentreerde zoutoplossing die naar beneden stroomt, waardoor de lucht droger en warm wordt. De zoutoplossing neemt vocht op en verdunt in concentratie. Een zoutoplossing die teveel verdund is neemt geen vocht meer op en dient terug geconcentreerd te worden.
- een efficiënte regenerator die de verdunde zoutoplossing opnieuw concentreert.





Werking damp-warmte-pomp



In dit onderzoek zijn ook meerdere massa-warmte-wisselaars getest met o.a. een resulterende octrooiaanvraag (niet meer actief, zie IP). In een volgend project (EXEKas, 2014-2017, realisatie klimaatneutrale glastuinbouw) werd de damp-naar-warmte-pomp verder ontwikkeld:

- op semi-praktisch niveau werd een massa-warmte-wisselaar uitgerold op een tomatenkas van 0,07 ha. samen met de firma Maurice Kassenbouw
- werd in samenwerking met E2 systems een regenerator gebouwd voor de herconcentratie door middel van mechanische dampcompressie.

De massa-warmte-wisselaar functioneerde goed, maar de regenerator faalde als gevolg van corrosieproblemen. Het project toonde echter aan dat de voorgestelde COP van ~ 10 haalbaar is. In het vervolgproject GLITCH (Interreg, 2018-2021), over klimaatneutrale glastuinbouw, wordt de generator, als onderdeel van de damp-naar-warmte-pomp, verder ontwikkeld. De geplande generator is van het type "warmtepomp aangedreven vacuümverdamper". In het kader van het GLITCH-project is het ontwerp en de bouw van de regenerator gepland.

2.2. Hoe ver staat de ontwikkeling van de damp-naar-warmtepomp?

De huidige status van de damp-naar-warmte-pomp is:

- Een massa-warmte-wisselaar op ware grootte in een kas van 0,07 ha is beschikbaar. Deze installatie kan gekoppeld worden op de ontwikkelde regenerator
- Een regenerator is in aanvang van de bouwfase (tegen 05/2021) in het GLITCH-project.
- Het vooropgestelde projectdoel was om minimaal een COP van 8 te halen. De modelmatige verwachtingen tonen echter aan dat een COP van 10-11 haalbaar is. Deze hogere COP bleek haalbaar door een efficiënter design van de warmtepomp.

De algemene werking van de generator wordt hierna weergegeven.

De regenerator (zie afb.) Wordt gekenmerkt door:

- Unieke combinatie van materialen om de kosten te verlagen en de fysieke uitdagingen van druk en corrosie te weerstaan. De belangrijkste materialen zijn titanium, SAF2507, PP, PVC-C.



- Koelmiddel R1233ZD voor hoge temperaturen en lage / geen GWP
- Hoge temperatuur warmtepomp
- Modulerende regeling door inverter compressor en elektronisch expansieventiel
- Hoge COP
- isentropische efficiëntie van de compressor van ~ 60% van Dorin

3. Corrosie

Calcium chloride oplossing is een geschikte zoutoplossing voor deze toepassing. Het is niet giftig, is een goedkoop product maar is echter zeer corrosief.

De standaard soorten roestvrijstaal zoals RVS-304 en RVS-316 zijn niet bestand. Zelfs na langdurig onderzoek werd er geen alternatief gevonden voor het duur en moeilijk verwerkbaar titanium die wel corrosie bestand is tegen CaCl₂.

Kunststoffen zijn doorgaans wel bestand tegen CaCl₂ maar worden echter beperkt door de proces temperatuur en ze hebben een veel te lagere warmtegeleidbaarheid bij toepassing in een verdamper

Gezien het proces op 85°C wordt uitgevoerd zijn echter nog enige kunststoffen zoals PVC-C, PC en PP die in aanmerking komen voor de piping.

4. Hoge temperatuur warmtepomp

Hoe hoger de temperatuur die een warmtepomp moet leveren hoe lager de COP wordt. De commerciële warmtepompen hebben een temperatuurbereik tot 60°C. Eénmaal boven de 60°C wordt sterk ingeboet in COP. Als zowel de warmtebron als de warmteafgifte op een hoge temperatuur liggen kan er overgeschakeld worden op een ander koelmiddel om toch nog een hoge COP te bekomen. In deze toepassing dient het verschil tussen condensatietemperatuur van het koelmiddel (warmteafgifte van de warmtepomp) en de verdampingstemperatuur van het koelmiddel (warmtebron van de warmtepomp) slechts 10 graden Celsius te zijn. Momenteel worden er veel nieuwe koelmiddelen ontwikkeld door de grote vraag in de industrie om naar hogere temperaturen te kunnen gaan en de internationale doelstelling om milieuvriendelijke koelmiddelen te hebben.

Twee nieuwe koelmiddelen kwamen in aanmerking: R1234ZE en R1233ZD. Beide koelmiddelen zijn milieuvriendelijk en kunnen gebruikt worden voor een werkingsgebied tussen 50 en 90°C. De haalbare COP voor beide koelmiddelen is gelijkaardig. Beide koelmiddelen worden in de literatuur aangeduid als geschikte koelmiddel voor hoog temperatuur warmtepompen.

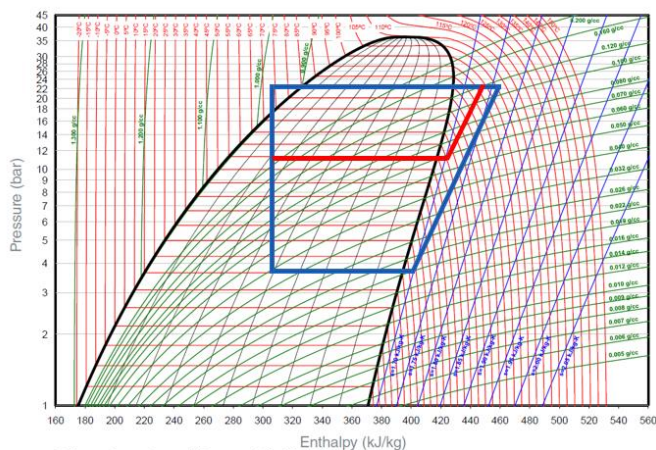
R1234ZE

Het voordeel van R1234ZE is de absolute druk boven 1 bar bij een verdampingstemperatuur van 15°C waardoor de warmtepomp eveneens extra warmte uit de omgeving kan halen om de warmtebalans van het proces in evenwicht te houden of om het proces met behulp van de



warmtepomp op te starten zonder gevaar om in onderdruk te functioneren. De Duitse compressor fabrikant Bitzer publiceert reeds werkingsgegevens van bepaalde compressoren werkend met R1234ZE weliswaar voor een lagere temperatuurrange. De fabrikant was bereid de motor aan te passen waardoor een hoger temperatuurbereik mogelijk is.

Het nadeel van R1234ZD is de vrij hoge druk (22 bar absoluut) bij een condensatietemperatuur van 85°C. Hogere drukken zorgen voor een hogere mechanische belasting van de compressor wat resulteert in een kleinere levenscyclus. Dit is dan ook de belangrijkste reden om niet te kiezen voor R1234ZD.



R1233ZD

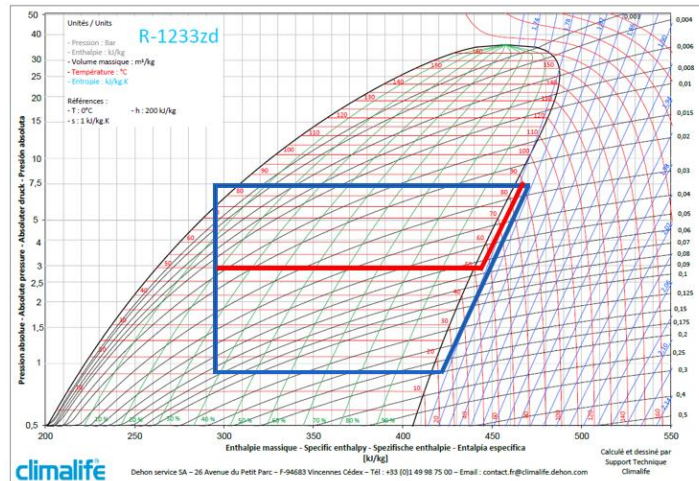
Het koelmiddel R1233ZD heeft dan het voordeel met lagere drukken te werken. Bij een condensatietemperatuur van 85°C is de druk slechts 7.5 bar. Verdampen op 15°C om opstartwarmte aan de serre te kunnen onttrekken zou dan wel bij onderdruk gebeuren. Hier dient de keuze gemaakt te worden tussen:

- Aparte warmtepomp voor opstart en aanvullende warmte
- Elektrische weerstanden
- Werken met R1233ZD bij onderdruk

De testopstelling wordt voorzien van elektrische weerstanden voor de koude opstart.

Het nadeel van het koelmiddel R1233ZD is dat deze nog nieuwer is dan R1234ZE waardoor er nog geen compressor fabrikanten data publiceren voor hun compressoren werkend met R1233ZD.

De onderzoeksgroep heeft een fabrikant gevonden (DORIN) die bereid is mee te werken aan het onderzoek waarbij de nodige ondersteuning wordt geleverd om te kunnen werken met het koelmiddel R1233ZD.



Een bijkomend probleem bij het toepassen van een nieuw koelmiddel is de zoektocht naar geschikte koeltechnische componenten. Er werd slechts één fabrikant (Danfoss) gevonden waar een bestaand elektronisch expansieventiel kon aangepast worden door het invoeren van nieuwe parameters in de software van de controller.

5. Procesvat

Alhoewel het bij aanvang van het onderzoek het geweten was dat een procesvat in titanium een oplossing is werd er toch nagegaan of er geen alternatieve materialen waren die prijsgunstiger zijn en die in Europa kunnen geproduceerd worden. Titanium is een dure grondstof, prijsgunstige alternatieven komen niet enkel het beperkt project budget ten goed maar is eveneens een voordeel voor een snellere marktintroductie. Polycarbonaat, PVC-C, polypropyleen, glasvezel versterkt polyester en zelfs glas werden onderzocht als alternatief. Niettegenstaande de materialen op zich voldoende corrosiebestand zijn en voldoende thermische weerstand hebben bleek de oplossing enkel economisch verantwoord voor glasvezelversterkte kunststof. Zowel voor polycarbonaat, polypropyleen en PVC-C was de grote diameter gecombineerd met de grote wanddikte niet mogelijk om te produceren voor stukwerk. De constructie in gebogen glas en in glas segmenten was eveneens veel duurder dan de constructie in glasvezel versterkt polyester. Deze laatste en de constructie in titanium waren de overgebleven opties. Uiteindelijk bleek de aankoop van een titanium procesvat in China prijsgunstiger te zijn dan een glasvezel versterkt polyestervat in Europa geproduceerd.

6. Alternatieve uitvoeringen

Tijdens het design van de verdamper werden in totaal 3 verdamperen uitgetekend waarbij tenslotte het 3^{de} ontwerp werd goedgekeurd en de onderdelen werden besteld.



Omwille van bescherming van IP, die belangrijk is om te slagen in een succesvolle ontwikkeling, kan het eindontwerp niet getoond worden. De Fig heeft wel een beeld van het 1^{ste} ontwerp.

Het eindontwerp resulteerde in een materiaal selectie bestaande uit een titanium procesvat, titanium warmtewisselaars en piping in PVC-C. De constructie is aangevat.

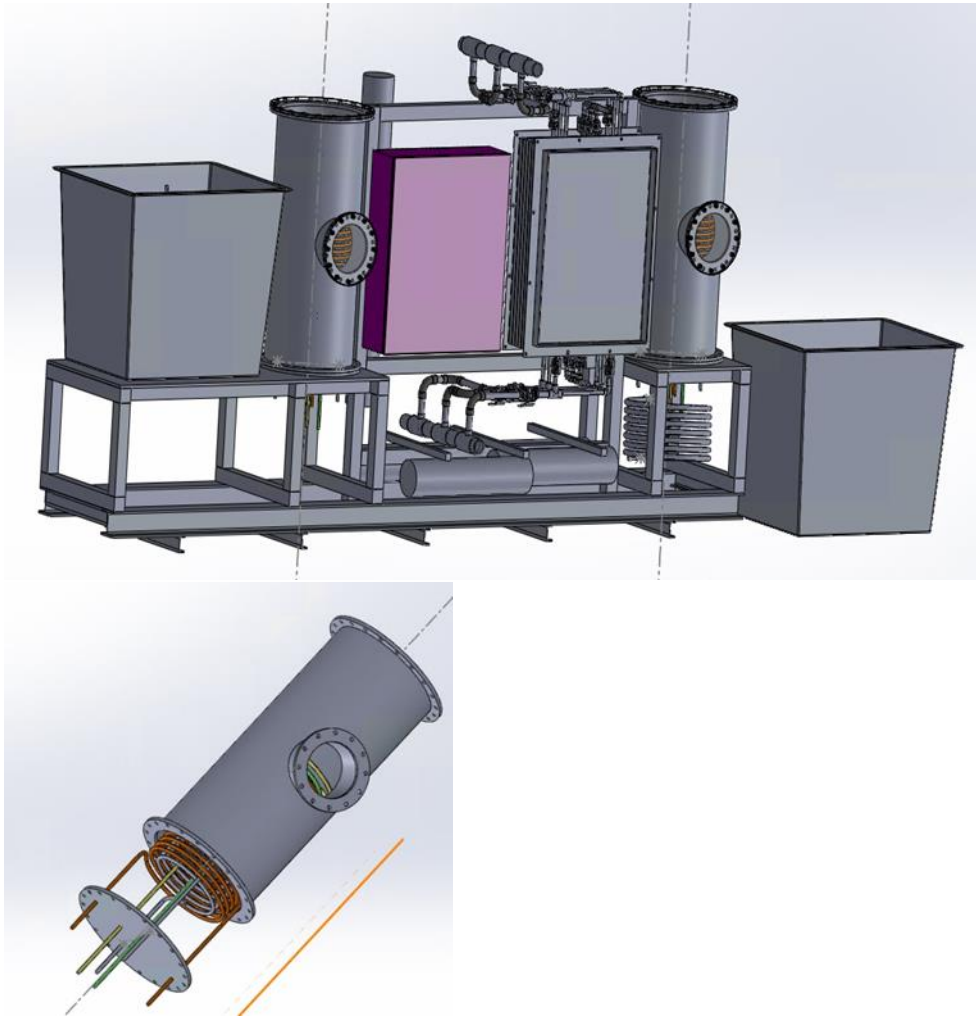


Fig. 2 2 Overzichtsbeeld van het eerste ontwerp. Tijdens het design proces werd duidelijk dat dit ontwerp teveel technische risico's bevatte, waardoor een aangepast ontwerp werd uitgewerkt.



7. Conclusies

- Ondanks de grote potentiële energiebesparingen bij de industriële droogprocessen, is het drogen momenteel verre van efficiënt.
- Een massa-warmte-wisselaar op ware grootte in een kas van 0,07 ha is beschikbaar. Deze installatie kan gekoppeld worden op de regenerator die in dit project werd ontworpen en waarvan de meeste componenten zijn aangekocht.
- Het vooropgestelde projectdoel was om minimaal een COP van 8 te halen. De modelmatige verwachtingen tonen echter aan dat een COP van 10-11 haalbaar is. Deze hogere COP bleek haalbaar door een efficiënter design van de warmtepomp.
- Twee nieuwe koelmiddelen kwamen in aanmerking voor het gewenste temperatuursgebied: R1234ZE en R1233ZD. Beide koelmiddelen zijn milieuvriendelijk. R1234ZE resulteert in net iets te hoge drukken bij de maximale temperatuur en kan daardoor compressor belastend zijn waardoor gekozen wordt voor R1233ZD.
- Tijdens het design van de verdampers werden in totaal 3 verdampers uitgetekend waarbij tenslotte het 3de ontwerp werd goedgekeurd en de onderdelen werden besteld.
- Het eindontwerp resulteerde in een materiaal selectie bestaande uit een titanium procesvat, titanium warmtewisselaars en piping in PVC-C.

8. Literatuur

Milind V. Rane, S.V. Kota Reddy, Roshini R. Easow, (2005) Energy efficient liquid desiccant-based dryer, *Applied Thermal Engineering*, Volume 25, Issues 5–6, 2005, Pages 769-781, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.07.015>.

Raghavan, G.S.V., Rennie, T.J., Sunjka P.S., Orsat, V., Phaphuanqwittayakul, W., Terdtoon, P. (2005) Overview of new techniques for drying biological materials with emphasis on energy aspects. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 22, 02, 195-201

Gremmen, H.G.J.; Haperen, P.F. van; Lamerichs, J.M.W.J. (2009) A socio economic perspective on co product exploitation. *Total Food. Sustainability of the Agri-Food Chain / Waldron, K., Moates, G., Faulds, C., Royal British Society of Chemistry - ISBN 9781847557506 - p. 3 - 14.* <https://doi.org/10.1039/9781849730785-00003>

Minea, V. 2011. Dual-energy source heat pump, 10th IEA Heat Pump Conference, May 16 - 19, Tokyo, Japan

Mujumdar, A.S. 2006. *Handbook of Industrial Drying*, 3rd Ed; CRC Press: Boca Raton, FL.





GLITCH

S.J. Kowalski, A. Pawłowski, (2011) Intermittent drying of initially saturated porous materials, Chemical Engineering Science, Volume 66, Issue 9, 2011, Pages 1893-1905, ISSN 0009-2509, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.01.044>.

