

Emissieloos frietdrogen

Onderzoek naar de mogelijkheid om emissieloos te drogen
in een frietproductieproces die bedrijfseconomisch
optimaal is

Onderzoeksrapport

Vertrouwelijk



Auteur:	Sven Gommers (00064723)
Organisatie:	Synergo Consultancy B.V.
Bedrijfsbegeleiding:	Rien Melis
Opleiding:	Energie- & Procestechnologie (AOT) (EPT-Voltijd)
Instituut:	HZ University of Applied Sciences
Afstudeerdocent:	J.T.H. Hoeijmakers
2e Examiner:	B. Romboud
 Versie:	 1.0
Datum:	16-6-2017
Plaats:	Goes

Emissieloos frietdrogen

Onderzoek naar de mogelijkheid om emissieloos te drogen
in een frietproductieproces die bedrijfseconomisch
optimaal is

Onderzoeksrapport

Vertrouwelijk

Auteur:	Sven Gommers (00064723) Schans 13, Philippine, 4553DA +31-(0)625168853 gomm0004@hz.nl
Organisatie:	Synergo Consultancy B.V. s-Gravenpolderseweg 2 c 4460 AS, GOES, Nederland 0113-235100, info@synergo.com
Bedrijfsbegeleiding:	Rien Melis r.melis@synergo.com +31113235100 +31611860581
Opleiding:	Energie- & Procestechnologie (AOT) (EPT-Voltijd)
Cursus:	1617 AvTI-EPT Voltijd 4e jaar Afstuderen Febr.
Instituut:	HZ University of Applied Sciences
Afstudeerdocent:	J.T.H. Hoeijmakers jhoeijm@hz.nl
2e Examiner:	B. Romboud b.romboud@hz.nl
Versie:	1.0
Datum:	16-6-2017
Plaats:	Goes

Samenvatting

Deze samenvatting is representatief voor het gehele onderzoek dat uitgevoerd is van 30 januari 2017 t/m 31 mei 2017 door afstudeerder Sven Gommers bij advies- en ingenieursbureau Synergo B.V. te Goes.

Eén van de specialisaties van Synergo is het ontwerpen van frietproductieprocessen. Hierbij zijn al verschillende stappen emissieloos gemaakt. De opdracht is om te onderzoeken of dit ook mogelijk is om dit bij de droogstap voor het frituren uit te voeren. Hier wordt namelijk relatief hete vochtige lucht afgevoerd met aanhangend zetmeel. Dit veroorzaakt in eerste instantie geurproblemen, maar de energie die deze lucht bevat kan nog gebruikt worden. De onderzoeksvraag die hierbij opgesteld is, luidt als volgt:

“Welke emissieloze droogmethode in een frietproductieproces is bedrijfseconomisch optimaal?”

Uit vooronderzoek bleken er twee potentiële methodes om de droger emissieloos te maken. Een belangrijk detail hierbij is dat de oplossingsmethodes additioneel zijn, dit wil zeggen dat deze methodes de mogelijkheid bieden om bij een bestaande frietdroger toegevoegd te kunnen worden. De twee methodes die onderzocht zijn, zijn de volgende:

1. Droger uitbreiden met condensor
2. Droger uitbreiden met een warmtepomp

Beide oplossingsmethodes zijn gemodelleerd in Excel op basis van realistische drogergegevens. In combinatie met literatuuronderzoek en de uitkomsten hiervan was het mogelijk de hoofdvraag te beantwoorden. Uit onderzoek is gebleken dat een warmtepompdroger bedrijfseconomisch het meest optimaal is van de twee onderzochte methodes. Daar de warmtepompdroger de mogelijkheid biedt het droogproces bedrijfstechnisch naar huidige normen te laten verlopen en daarnaast wel een vermindering brengt in geuruitstoot. Tevens is het mogelijk om energetisch winst te maken doordat er minder thermische energie in de droger benodigd is. Weliswaar komt er een extra elektrische energievrager die fors is, de compressor. Maar de som van de elektrische en thermische energie is samen minder dan de huidige droogsituatie. Deze conclusie verandert wel op het moment wanneer het warm water van variant 1 gebruikt kan worden bij derden (industrieterrein, stadsverwarming), dan zal variant 1 het best geschikt zijn.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	I
Inhoudsopgave	II
1 Inleiding	1
2 Theoretisch kader	2
2.1 Drogen	2
2.2 Droogmethodes	6
3 Methode	12
3.1 Oplossingsmethodes	12
3.2 Massa- en energiebalans frietproductieproces	12
3.3 Massa- en energiebalans toevoeging condensor (methode 1)	15
3.4 Massa- en energiebalans toevoeging warmtepomp (methode 2)	16
4 Resultaten.....	18
4.1 Deelvraag 1	18
4.2 Deelvraag 2	22
5 Discussie	32
6 Conclusies en aanbevelingen.....	33
7 Nawerk.....	34
7.1 Bibliografie	34
7.2 Bijlagen	35

1 Inleiding

Synergo is een advies- en ingenieurbureau te Goes dat gespecialiseerd is in de voedingsmiddelenindustrie. Eén van de specialisaties is het ontwerpen van frietproductielijnen. Bij deze processen zijn reeds al vele optimalisaties uitgevoerd. Alleen bij de droogstap voor het frituren liggen nog mogelijkheden voor optimalisatie. Hier wordt namelijk nog relatief hete vochtige lucht afgevoerd met aanhangend zetmeel. Dit veroorzaakt in eerste instantie geurproblemen, maar tevens is het onnodig om de thermische-energie van de waterdamp niet te gebruiken. Deze situatie vraagt om optimalisatie, dus onderzoek naar verbetering.

In dit onderzoek wordt er gezocht naar een oplossing om vooral de geurproblemen te verminderen tot zelfs te verwijderen. Hierbij zal gekeken worden naar methodes die toegepast kunnen worden op de huidige droogtechnieken, zodat het interessant is voor klanten (frietfabrikanten) de techniek aan te schaffen om zo sneller aan geurvergunningen te voldoen en de omgeving tevreden te houden. Uit vooronderzoek is gebleken dat er twee mogelijke oplossingen zijn, de informatie uit dit vooronderzoek is terug te vinden in het theoretisch kader. De twee oplossingsmogelijkheden berusten allebei op het principe om het vocht dat door de lucht is opgenomen in de droger te condenseren. Dit heeft als reden dat in het vocht aanhangend zetmeel aanwezig is, en dat zetmeel veroorzaakt de geurproblemen. De eerste oplossingsmethode is door de huidige droogtechniek uit te breiden met een condensor, zodat het vocht uit de natte lucht wordt verwijderd. De tweede oplossingsmethode is om de huidige techniek uit te breiden met een warmtepomp. Hierbij wordt een extra kringloop aan het proces toegevoegd, die de warmte van de vochtige lucht naar koude lucht verpompt. Ook hierbij condenseert het vocht uit de afgevoerde lucht uit de droger.

Er zijn al eerdere onderzoeken uitgevoerd naar de mogelijkheid om warmtepompen te gebruiken bij drogen. Dit zijn batch testopstellingen geweest, deze onderzoeken wezen uit dat het principe mogelijk is en ook energie-efficiënt is. Wel is er een verschil dat deze warmtepompen maar een deel van de afvoerlucht gebruiken als energiebron. Bij dit onderzoek is het juist de bedoeling te onderzoeken of het mogelijk is om de hele afvoerlucht te gebruiken en deze te condenseren.

Tijdens het vooronderzoek is er een onderzoeksvraag geformuleerd op basis van het omschreven probleem, dit is de volgende vraag:

“Welke emissieloze droogmethode in een frietproductieproces is bedrijfseconomisch optimaal?”

Hierbij zijn ook deelvragen opgesteld met sub-deelvragen, deze zijn:

1. Welke droogtechnieken zijn toepasbaar op frieten?
 - a. Wat voor vocht en hoeveel dient verwijderd te worden en hoe kan dit?
 - b. Welke randvoorwaarden zijn er voor het drogen van een friet?
 - c. Wat zijn de reeds gehanteerde technieken en kunnen deze verbeterd worden?
 - d. Is er een mogelijke vernieuwende techniek?
 - e. Hoe ziet de bepaalde techniek er procesmatig uit (PFD)?
 - f. Is de techniek emissieloos?
 - g. Wat zijn de voor- en nadelen van deze techniek?
2. Hoe kan de optimale droogmethode objectief aangetoond worden?
 - a. Wat is het energetische rendement van het gehele frietproductieproces met de variërende droogtechniek aan de hand van een energie- en massabalans?
 - b. Wat is de terugverdientijd van een bepaalde techniek?
 - c. Wat is het verschil in geuruitstoot van de huidige techniek en de nieuwe situatie en de financiële waarde hiervan?

2 Theoretisch kader

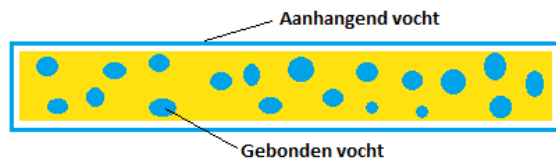
In het theoretisch kader zal de theorie die nodig is om het benoemde probleem in de inleiding op te lossen uitgewerkt zijn. Hierbij zal gebruik gemaakt worden van verschillende literatuur. Deze literatuur zal verwezen zijn in de tekst en zal ook te vinden zijn in de literatuurlijst.

2.1 Drogen

Om friet te drogen is er een droogtechniek benodigd. De huidige meest toegepaste techniek is luchtdrogen. Gedurende dit literatuuronderzoek zal het boek Handbook of Industrial Drying Fourth Edition (Mujumdar, 2014) als naslagwerk worden gebruikt. Dit boek voorziet veel theorie over drogen en de daarbij horende methoden. Hiermee kan bepaald worden welke methoden geschikt zullen zijn voor het drogen van friet.

Vooraleer de verschillende methodes behandeld worden, zal de scheidingsmethode drogen behandeld worden.

De eenheidsbewerking drogen is een thermisch proces dat beschreven kan worden als het verwijderen van vocht om een droog product te verkrijgen. Vocht kan in twee verschillende vormen aanwezig zijn, namelijk gebonden en ongebonden. Bij gebonden vocht zit het vocht in de vaste stof of zelfs binnenin de microstructuur van de vaste stof. Gebonden vocht oefent een lagere dampspanning uit dan de vloeistof zelf. Ongebonden vocht hangt aan de vaste stof.



Figuur 2-1 Aanwezige soorten van vocht

Wanneer een natte vaste stof thermisch gedroogd wordt, zijn er twee processen die voorkomen. Deze zijn:

1. Energieoverdracht, meestal warmte van de omgeving om het ongebonden vocht aan het oppervlak van de vaste stof te verdampen.
2. Overdracht van het interne gebonden vocht naar het oppervlak van de vaste stof, om vervolgens in proces 1 over te gaan.

De drijvende kracht achter het verdampen berust op de snelheid waarmee de twee bovengenoemde processen verlopen. Het eerste proces, de energieoverdracht, kan op basis van drie verschillende soorten energietransporten plaatsvinden. Dit kan namelijk door convectie, geleiding of straling. Tevens is een combinatie van deze drie technieken mogelijk. Proces 1, het verwijderen van het oppervlakte vocht is afhankelijk van de omgevingstemperatuur, de luchtvochtigheid, de luchtvolumestroom, het blootgelegd oppervlak, en de druk. Proces 2, de overdracht van het interne vocht naar het oppervlak, is afhankelijk van de fysische eigenschappen van de vaste stof, de temperatuur en het vochtgehalte. In een droogproces kan een van de twee bovengenoemde processen een beperkende factor betekenen. Alhoewel deze tijdens het droogproces tegelijkertijd plaatsvinden. Er is niet 1 standaard ontwerp voor een drooginstallatie, aangezien de eigenschappen per te drogen product erg verschillen. Daarom is het belangrijk om terug te vallen op de basis van de massa- en energiebalansen gecombineerd met de eigenschappen van de materialen voor het ontwerpen of kiezen van een droger. Tevens zal een droger niet recht evenredig met de capaciteit vergroten. Fabrikanten van drogers hebben over het algemeen een kleine reeks aan verschillende drooginstallaties, daarom is het interessant om de basiskennis te verbreden en zo dus zelf specialist te worden.

Het drogen vindt plaats door de verdamping van de vloeistof te beïnvloeden door warmte toe te voegen. Deze warmte kan op verschillende manieren toegevoegd worden zoals eerder vermeld, dus met behulp van convectie (directe drogers), door geleiding (contact of indirecte drogers) en door straling. 85% van de industriële drogers zijn van het type convectie droger met behulp van hete lucht of verbrandingsgassen. Alle verschillende methodes voegen warmte toe aan de oppervlaktegrenzen van het te drogen product, dus de warmte zal zich altijd door conductie in het product moeten

verplaatsen. De vloeistof zal eerst naar de grens van het materiaal moeten verplaatsen voordat het weg getransporteerd kan worden door de drager (lucht). Transport van vocht in een vaste stof kan plaatsvinden door een van de volgende diffusie mechanismen (diffusie is het willekeurig bewegen van deeltjes):

- Vloeistof diffusie, wanneer de temperatuur van de natte vaste stof onder het kookpunt van de vloeistof is.
- Damp diffusie, wanneer de vloeistof binnen in de vaste stof verdampt.
- Knudsen diffusie, als het drogen plaatsvindt bij heel lage temperaturen en drukken (vriesdrogen).
- Hydrostatische drukverschillen, wanneer de interne verdampingssnelheden de snelheid van het damptransport overschrijden door de vaste stof naar de omgeving.
- Combinatie van de bovengenoemde mechanismen.

Doordat de fysische structuur van de te drogen vaste stof zal veranderen gedurende het drogen, kunnen de vocht transport mechanismes ook veranderen in de loop van het drogen.

2.1.1 Externe condities

Bij het bovengenoemde proces 1 is al vermeld dat de omgevingscondities belangrijk zijn. Deze condities zijn luchtvochtigheid, temperatuur, richting en hoeveelheid van de luchtstroom, de fysische eigenschappen van het te drogen materiaal en de ondersteuningmethode van het product (bijvoorbeeld een transportband) voor de te drogen stof. Het externe drogen is vooral belangrijk in het begin van het droogproces. Hierbij moet het ongebonden vocht verwijderd worden, maar dit kan niet te snel verlopen, omdat de binnenkant van de te drogen stof nog niet uniform opgewarmd is en dus krimp kan veroorzaken. Dit brengt de structuur van de friet ten nadele. Een ander gevolg kan zijn dat de stof uitgedroogd wordt.

Verdamping ter hoogte van het oppervlak van de te drogen stof is afhankelijk van de verplaatsing van vocht van het oppervlak naar de omgevingslucht door de grenslaag van de stof. Er wordt dus massa verplaatst tussen twee verschillende aggregatietoestanden, hiervoor is warmte benodigd. Om aanhangend vocht te verdampen, moet de volgende formule gebruikt worden:

Vergelijking 2-1 Verdampingswarmte

$$Q = m * h_{vap}$$

Bij een frietproductieproces van 15 ton friet per uur zal er in de droger ongeveer 18 ton aan totaalgewicht per uur passeren. Hiervan is gemiddeld 3% aanhangend vocht. Dus dit is 600 kg per uur aan aanhangend vocht. De warmte hiervoor benodigd bij een temperatuur van 40°C is:

$$Q = \left(\frac{600}{3600} \right) * 2400 = 400 \text{ kW}$$

2.1.2 Interne condities

Doordat er van buitenaf warmte toegevoegd wordt, zal de vochtige vaste stof langzaam opwarmen, dit terwijl aan de buitenkant vocht aan het verdampen is. Dit is dus het bovengenoemde proces 2. Doordat er aan de buitenkant massa verdwijnt en aan de binnenkant vocht opwarmt zal er een verplaatsing van vocht van binnen naar buiten plaatsvinden. Deze verplaatsing vindt plaats doormiddel van verschillende mechanismes, namelijk: diffusie, capillariteit, stijging van de interne druk door inkrimping tijdens het drogen. De verplaatsing van het vocht is de controlerende factor van het droogproces. De variabelen als luchtsnelheid en temperatuur die de oppervlakteverdamping verbeteren, zijn bij het interne proces minder van belang. Wat wel belangrijk is bij het interne proces is een hoge binnentemperatuur en langere verblijfstijd.

2.1.3 Droogmechanisme

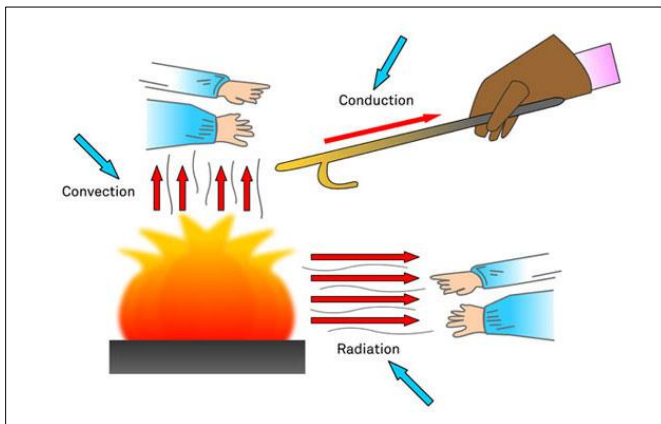
Een natte vaste stof bevat gebonden en ongebonden vocht. Om het ongebonden vocht te verwijderen moet het droogmechanisme evaporatie plaatsvinden. Evaporatie vindt plaats wanneer de

dampspanning van het vocht gelijk is aan de maximale dampspanning die mogelijk is bij de heersende temperatuur. Dit kan bereikt worden door de temperatuur van het vocht te verhogen naar het kookpunt. Wanneer het te drogen materiaal hittegevoelig is dan kan er gekozen worden om de druk te verlagen naar een vacuüm, een gevolg hiervan is dat het kookpunt zal dalen dus kan er bij een lagere temperatuur geëvaporeerd worden. Wanneer de druk extreem is verlaagd tot onder het tripelpunt zal al het vocht bevroren zijn, als hier dan warmte aan toegevoegd wordt zal het bevroren vocht verdampen. Dit is het principe van vriesdrogen.

Elke vaste stof heeft een bepaald droogpatroon, hierbij wordt het vochtgehalte weergegeven ten op zichte van de tijd. Uit ervaring van Synergo blijkt dat een friet droogproces eerst snel verloopt doordat het verdampingspotentieel groot is en vervolgens zal de richtingscoëfficiënt kleiner worden omdat het gebonden vocht vanuit de kern naar de buitenkant moet treden. In het eerste gedeelte zal het aanhangende vocht verdampen, dit is ongeveer drie tot vijf procent van de totale massa van de friet. Deze verdamping vindt snel plaats aangezien het aanhangend vocht makkelijk beschikbaar is voor verdamping. Doordat er warmte aan de friet wordt toegevoegd zal deze door convectorie binnendringen in de friet waardoor het gebonden (interne) vocht naar buiten zal verplaatsen. Dit proces zal langzamer verlopen, waardoor het beschikbare vocht minder wordt en dus de verdampingssnelheid naar beneden gaat. De doelstelling is om minimaal tien procent intern vocht te verdampen, dit heeft met proceskwaliteit te maken, maar hierover volgt later meer (hoofdstuk 3.2). Bij het drogen zal er dus totaal ongeveer vijftien procent vocht (intern en aanhangend) verdampt moeten worden. Dit komt overeen met 3,5% toename in drogestofgehalte, want als er bij de 20% droge stof 3,5% bijkomt, zal er bij de 80% vocht 3,5% afaan. Hierdoor verandert de verhouding. De vaste stof zal gelijk in massa blijven, dus de massa van het vocht verminderd en is dus verdampt.

2.1.4 Verwarmingsmethodes

Als volgt zullen de verschillende verwarmingsmethodes (zie figuur 2-1) behandeld worden, met daarbij de toepasbaarheid en de bijbehorende soorten drooginstallaties.



Figuur 2-2 verwarmingsmethodes (Welsh Assembly Government)

2.1.4.1 Convectorie

Convectorie is het verwarmen van de vaste stof door middel van het gebruik van hete lucht of gas. Met die warmte is het mogelijk voor het vocht om te verdampen, het verdampte vocht zal door het droogmedium meegenomen worden. Er zijn verschillende droogmedia beschikbaar voor convectorie, namelijk: Lucht, inert gas, verbrandingsgassen of oververhitte stoom. Drogers die berusten op het principe convectorie worden ook wel directe drogers genoemd. Gedurende het verwijderen van het aanhangende vocht, zal het oppervlak van de te drogen stof de natteboltemperatuur aannemen van het droogmedium. Wanneer het gebonden vocht verdampt wordt zal de te drogen stof de droge boltemperatuur aannemen van het droogmedium. Bij het drogen met oververzadigde dampen zal de vaste stof de verzadigingstemperatuur van de damp bij de heersende druk aannemen. Voorbeelden

van convectiedrogers zijn: wervelbeddrogers, flashdrogers, rotatie drogers, sproeidrogers, botsingsdrogers, banddrogers en bed drogers.

2.1.4.2 Conductie

Bij conductiedrogers, ook wel indirecte drogers genoemd, wordt de warmte voor verdamping doorgegeven door verwarmingsoppervlaktes waar de te drogen vaste stof zich over of mee verplaatst. Het verdampte vocht wordt afgevoerd door middel van een vacuüm of een gasstroom. De vacuüm techniek wordt vooral toegepast bij hittegevoelige materialen. Conductiedrogers zijn ten op zichte van convectiedrogers thermisch efficiënter. Voorbeelden van indirecte drogers zijn: rotatie drogers met interne stoompijpbundels en trommeldrogers.

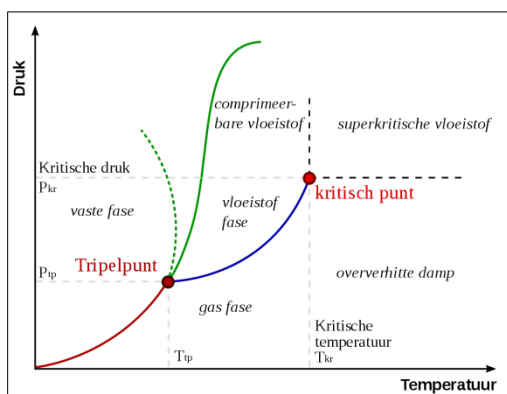
2.1.4.3 Straling

Verdamping door straling kan plaatsvinden door het gebruik van verschillende bronnen van straling, met golflengtes variërende van het zonnespectrum tot microgolf. Maar zonnestraling dringt bijna tot niet binnen het te drogen materiaal. Infrarood is een vaak gebruikte methode bij het drogen van coatings, dunne platen en vliezen. De meeste vochtige materialen zijn slechte geleiders van radiofrequentie (50-60 Hz), maar de impedantie zakt wel. Hierdoor zal de weerstand voor warmtetransport verminderen. Hierdoor is het interessant om deze techniek te combineren met convectie, want een droger alleen op basis van radiofrequentie is bedrijfseconomisch niet interessant.

2.1.5 Temperatuur en druk bij drogen

Over het algemeen zijn drogers atmosferisch uitgevoerd, ofwel met een lichte onder- of overdruk voor veiligheidsredenen. Daarnaast zijn er ook vacuüm drogers, deze worden gebruikt bij materialen die gevoelig zijn voor hogere temperaturen. Want doordat er een lagere druk heerst, zal het kookpunt daarmee ook verlagen. Ook wordt er vacuüm toegepast bij processen waar zuurstof niet gewenst is. Qua temperatuur is het efficiënter om hogere temperaturen te gebruiken, hierdoor is er een lagere gasvolumestroom nodig en ook kleinere apparatuur voor het gevraagde vermogen. De keuze voor lagere temperaturen kan een gevolg zijn van restwarmtestromen die beschikbaar zijn. Een nadeel is dat deze drogers zullen toenemen in omvang.

Een variant op het vacuümdrogen is vriesdrogen, hierbij wordt er onder vacuüm gedroogd met een temperatuur onder het tripelpunt (zie figuur 2-3) van water. Het principe is dat het water in de vaste fase direct sublimeert in waterdamp. Een voordeel van deze techniek is dat de warmtevraag voor verdamping een stuk lager is, daartegenover staat dat het creëren van het vacuüm weer meer energie kost. Wat tevens een voordeel is van deze techniek, is dat de productkwaliteit beter behouden blijft.



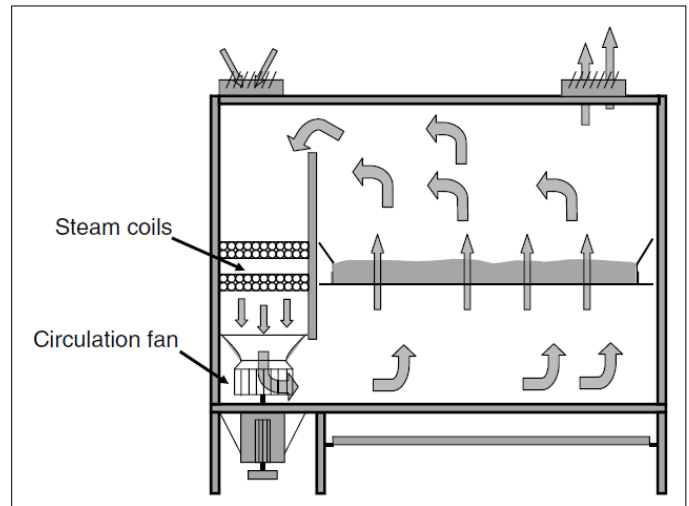
Figuur 2-3 Fase diagram (Wikipedia, 2014)

2.2 Droogmethodes

In dit hoofdstuk worden twee varianten van droogapparaten besproken, de geschiktheid van de twee methodes zijn bepaald gedurende het vooronderzoek. (Mujumdar, 2014)

2.2.1 Banddroger

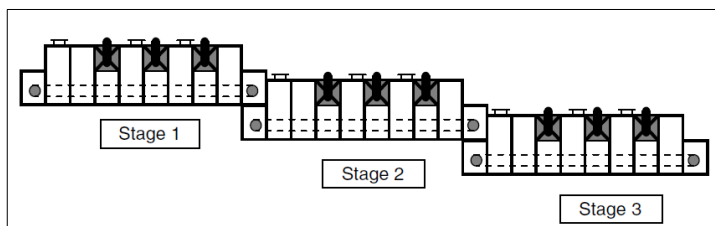
De banddroger is de meest toegepaste droger, hierbij wordt het te drogen product op een lopende band door een droogkamer getransporteerd. Door het gebruik van een lopende band zijn er bijna geen beperkingen in de te drogen stof. Tevens is de capaciteit van een banddroger hoog, en kan een continu proces aan. Ondanks drogen een simpel proces is, is het belangrijk om energieverstopping tegen te gaan. Er zijn verschillende varianten van banddrogers, deze zullen hierna besproken worden. Wel geldt voor alle, dat het te drogen materiaal 1 tot 50 millimeter in diameter moet zijn. Wat met friet van ongeveer 9 millimeter ideaal is. Het meest ideale is dat het product gestapeld kan worden, hierdoor kan de grootte van de droogtunnel verkleind worden. Wel moet er bij lichte producten gelet worden op de richting van de luchtstroom aangezien deze anders kunnen gaan zweven, wat het proces onbestuurbaar maakt. Typische droogtijden van deze droogmethode liggen tussen de 5 en 240 minuten. Droogtijden langer dan dit, zou betekenen dat de tunnel te lang zou worden. (Mujumdar, 2014)



Figuur 2-4 Voorbeeld van een banddroger dwarsdoorsnede (Mujumdar, 2014)

2.2.1.1 Varianten

Op de banddroger zijn enkele varianten, namelijk: enkele doortocht / enkele stap droger, enkele doortocht / meerdere stappen, meerdere doortochten. Ook kan de richting van de luchtstroom gevarieerd worden, namelijk tegenstroom, mee-stroom, boven-onder en onder-boven. De simpelste doortocht variant is de enkele doortocht / enkele stap droger. Hierbij gaat het product één keer door de droger, dit heeft enkele voordelen. De droger is meestal in zones opgedeeld, deze zones hebben elk hun warmtebron en eigen luchtblower. Zodoende kan de temperatuur en snelheid van de lucht goed geregeld worden naarmate het product door de droogtunnel gaat. Nog een praktisch voordeel van een enkele doortocht droger is dat de band gewoon onderlangs teruggedraaid kan worden, hier kan de band dan gelijk schoongemaakt worden. Daarnaast is het nadeel dat heel de droger de banddikte overal even dik is. Om dit nadeel in te dekken, is er variant 2 (zie figuur 2-5), namelijk de enkele doortocht / meerdere stappen. Bij deze variant zal per stap de banddikte minder worden. Hierdoor kan het product na al gedeeltelijk gedroogd te zijn, dieper gestapeld worden. Dit betekent dat elke volgende band trager kan lopen, daardoor zal bij een zelfde doorlooptijd een kleinere droger benodigd zijn. Een extra voordeel is dat bij het veranderen van de droogstap aangekoekte stukken



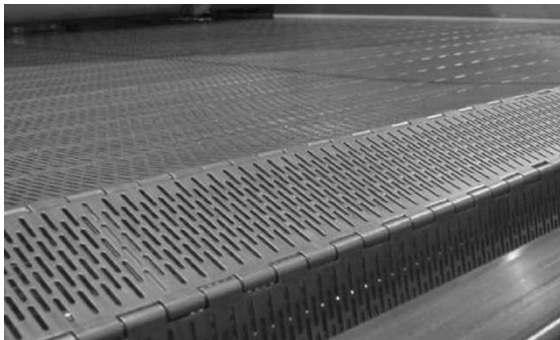
Figuur 2-5 Schematische weergave variant 2 (Mujumdar, 2014)

losgemaakt worden en het product zal gereoriënteerd worden, hierdoor kan elk deel van het product optimaal gedroogd worden. Nadelen zijn dat dit ontwerp meer plek in beslag neemt en dat er hogere kosten aan vast hangen.

Ten slotte is er ook nog de variant met meerdere doortochten. Deze variant heeft dezelfde voordelen als de meerdere stappen droger, alleen heeft de meerdere doortocht variant een kleinere (fysieke) voetafdruk. De banden zijn bij deze variant boven elkaar gerangschikt en lopen in de tegengestelde richting van elkaar. Het product komt vanboven binnen en zal zo naar beneden gaan van band naar band. Twee of drie banden is de norm maar kan zeker uitgebreid worden. Op het gebied van banddikte kan de meerdere doortocht methode hetzelfde als de meerdere stap methode, maar een zone indeling is lastiger bij dit type. Een bijkomend nadeel is dat de banden minder makkelijk schoongemaakt kunnen worden. In tegenstelling tot de nadelen, is dit de meest gekozen banddroger. Dit komt door de relatieve lage prijs en lage (fysieke) voetafdruk, en de mogelijkheid om de banddikte per band te variëren. (Singh & Heldman, 2009)

2.2.1.2 Componenten

De transportband verplaatst het product door de droger, deze band moet sterk genoeg zijn om het gewicht van het product te kunnen dragen en daarnaast moet het zo lang mogelijk zonder onderhoud de functie kunnen uitvoeren. Ook is het belangrijk dat de luchtflow er makkelijk doorheen gaat, maar daarentegen mag het product er niet doorheen vallen. De band zelf is over het algemeen gemaakt van draadgaas of geperforeerde metalen platen (zie figuur 2-6). De vorm van de gaten is cruciaal voor de luchtdoorstroom maar ook voor het voorkomen van vastzittende producten.



Figuur 2-6 Voorbeeld van een transportband
(Mujumdar, 2014)

De droogkast rondom de band is over het algemeen een frame met panelen en deuren. Voor in de voedingsmiddelenindustrie wordt hier vaak gekozen voor roestvrijstaal, dit met betrekking tot roest.

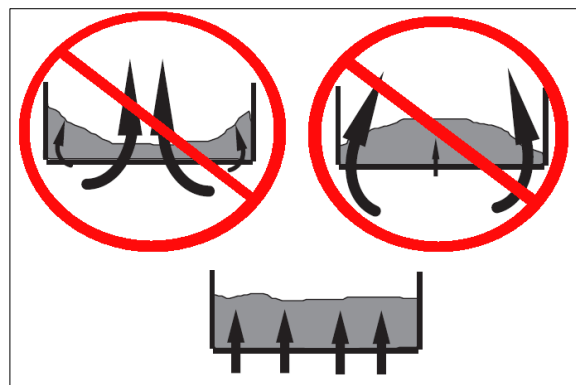
De ventilatoren kunnen ofwel intern als extern geplaatst worden. De ventilatoren die de lucht door het product blazen, zijn vaak andere dan degene die de vochtige lucht afzuigen. Omdat het drogen berust

op de warme luchtstroom is het belangrijk de ventilatoren goed te dimensioneren. Dit betekent genoeg capaciteit maar ook regelbaarheid. Vaak

wordt er gekozen voor een achterwaarts centrifugaal ventilator, deze ventilator heeft een hoog rendement, lage geluidsproductie en relatief lage kosten.

De warmte toevoer aan de lucht gebeurt over het algemeen door het verbranden van aardgas, of door het indirect verwarmen met stoombundels. Maar er zijn nog altijd alternatieven als elektrisch, LPG of stookolie. De warmtebron is meestal in de luchtstroom geplaatst, maar kan ook indirect met een lucht-lucht warmtewisselaar gedaan worden. Dit is afhankelijk van de brandstof en het te drogen product.

De productverspreider is tevens een belangrijk onderdeel van een banddroger. Wanneer het product niet evenredig over de band verdeeld is, zal de weerstand per oneffenheid verschillen. Hierdoor zal de luchtstroom niet overal gelijk zijn, waardoor het product niet overal gelijk gedroogd wordt. Dit is te zien in op figuur 2-7.



Figuur 2-7 Gewenste productverspreiding

2.2.1.3 Selectie en ontwerp

De eerste stap bij selectie van een droger, is om de juiste configuratie te bepalen. De enkele doortocht meerdere stappen is de meest veelzijdige optie die beschikbaar is, maar heeft ook wel de hoogste investeringskosten. Na de keuze van de configuratie, kan de grootte van de droger bepaald worden. Dit kan op basis van theoretische modellen, lab testen of eerdere ontwerpervaring met het te drogen product. Maar de theoretische modellen kunnen geen testen of ervaring evenaren. Aangezien er veel effecten lastig te voorspellen zijn, zoals de doorlating van de band met product. Dit verandert namelijk niet lineair, want bij sommige producten zakt de doorlaatbaarheid opeens wanneer het product door het gewicht op elkaar geperst wordt. Ook bijvoorbeeld zaken als korst harding is lastig te voorspellen, hiervoor zijn lab testen nodig. Bij deze lab testen wordt ook de maximale temperatuur bepaald, aangezien deze invloed heeft op de smaak van het product. Dus vaak worden er empirische modellen gebruikt afkomstig uit opgedane kennis uit het lab.

Omdat de friet op een onregelmatige manier gestapeld is, is het verwarmend oppervlak lastig te bepalen. Daarom wordt er gebruik gemaakt van het volume. De formule die hier dan voor toegepast kan worden is de volgende:

Vergelijking 2-2 Volumetrische warmteoverdracht friet

$$Q = h_v * V * \Delta T$$

Hierbij is Q de warmteoverdracht (kW), h_v is de volumetrische warmteoverdracht coëfficiënt (kW/m³·°C), V het volume (m³) en ΔT het temperatuurverschil (°C).

Het volume is veel makkelijker te bepalen, dan het verwarmend oppervlak. Dit kan alleen wanneer h_v bepaald is voor het product en volumestroom van de lucht.

Om de grootte van alle onderdelen te bepalen zal er een energie- en massabalans gemaakt moeten worden van het droogproces. Dit houdt in een energie- en massabalans over het water, een massabalans over de droge producten en een massabalans over vluchtige componenten. Een voorbeeld van zo een balans is te zien op figuur 2-8. Hierbij zijn vier zones opgedeeld, 1 en 2 zijn de eerste droogstap en 3 en 4 de tweede droogstap. In totaal staan er 4 warmtevragers te zien in de linker kolom, namelijk de warmte voor het product, warmte voor verdamping, warmte die de uitgaande lucht heeft opgenomen en warmteverliezen. De berekening voor het bepalen van deze waardes komt als volgt aan bod.

Product opwarming

De warmte benodigd om de friet op te warmen kan berekend worden met:

Vergelijking 2-3 Opwarming friet

$$Q_{friet} = m_{friet} * c_{p,friet} \Delta T_{friet}$$

Warmte voor verdamping

Voor de warmte te berekenen die nodig is om het water te verdampen, is de verdampingswarmte nodig. Dit is het verschil in enthalpie van de gas- en waterfase van water. Met de volgende formule kan deze warmte bepaald worden:

Vergelijking 2-4 Verdampingswarmte

$$Q_{verd} = m_{verd}(h_{damp} - h_{water})$$

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Total
Product infeed (kg/h)	6,786	6,009	5,614	5,230	—
Product infeed moisture (% wwb)	30	21	15.4	9.2	—
Product discharge (kg/h)	6,009	5,614	5,230	5,000	—
Product discharge moisture (% wwb)	21	15.4	9.2	5.0	—
Evaporation (kg/h)	777	395	384	230	1,786
Product infeed temperature (°C)	25	67	72	77	—
Product discharge temperature (°C)	67	72	77	80	—
Bed depth (mm)	100	100	250	250	—
Bed area (m ²)	15	15	15	15	60
Retention time (min)	8.6	8.6	21.6	21.6	60.4
Air temperature into bed (°C)	140	130	120	110	—
Air temperature out of bed (°C)	67	100	91	92	—
Airflow (normal m ³ /h)	25,000	25,000	25,000	25,000	100,000
Exhaust airflow (normal m ³ /h)	8,100	4,900	4,600	2,900	20,500
Heat to product (kW)	111	13	13	8	145
Heat to evaporated water (kW)	549	279	271	163	1,263
Heat to exhaust air ^a (kW)	108	116	97	63	383
Losses (kW)	10	10	10	10	40
Total heat consumption (kW)	778	418	391	244	1,831

^aThis term refers to the heat required to raise the incoming make-up air temperature to the exhaust air temperature. Remember that all the air in the conveyor dryer enters at the make-up air temperature and ultimately leaves at the exhaust temperature after having been recirculated through the bed numerous times.

Figuur 2-8 Voorbeeld energiebalans berekening (Mujumdar, 2014)

Warmte die de uitgaande lucht opneemt

De lucht zal met omgevingscondities binnen komen in de droger, en met een hogere temperatuur verlaten. Hier is dus warmte voor nodig geweest. Deze wordt bepaald met:

Vergelijking 2-5 Opwarmen lucht

$$Q_{lucht} = m_{lucht}c_{p,lucht}\Delta T_{lucht}$$

Warmteverliezen

Elke droger heeft warmteverliezen. De grootte hiervan is afhankelijk van de hoeveelheid aan isolatie, het verschil van de temperatuur tussen de droger en de omgeving en de grootte van de droger. Dit brengt veel berekeningen met zich mee, maar in de praktijk wordt altijd een verlies van zeven procent aangehouden van de totale warmtevraag van de droger.

2.2.1.4 Procescontrole

Het droogproces heeft verschillende variabelen die geregeld kunnen worden om zo het droogproces anders te laten verlopen naar de wensen van de operator.

Zo is er de luchttemperatuur, dit is over het algemeen de primaire parameter om de droogsnelheid te controleren. Bij een hogere temperatuur zal dit resulteren in een betere warmteoverdracht, dit betekent dan weer dat er meer verdampt zal worden. Hier hangt wel een randvoorwaarde aan vast, namelijk een maximale of minimale temperatuur, dit met betrekking tot productkwaliteit. Wel moet er in acht genomen worden dat de producttemperatuur lager zal zijn als de luchttemperatuur door het koeleffect van het verdampen. Wanneer het product dus te nat uit de droger komt, zal de luchttemperatuur verhoogd moeten worden. Om dit regelbaar te maken, kan er gebruik gemaakt worden van een vochtmetingregeling of met een temperatuurregeling. Bij de vochtmeting zal het vocht gehalte na de droger gemeten worden en waar nodig de temperatuur bijgestuurd worden. Maar dit is

niet altijd praktisch uit te voeren. Een makkelijkere uit te voeren meting is de temperatuur in de droger meten. Samen met de beschikbare data van de luchttemperatuur en lucht volumestroom kan op basis van een model de hoeveelheid warmteoverdracht bepaald worden. Als bijvoorbeeld het vochtgehalte zakt van het product, zal de warmteoverdracht ook zakken. Een temperatuursensor aan de achterkant van de luchtstroom zal deze verlaging in warmteoverdracht merken in de vorm van een temperatuurstijging.

De volgende parameter die gevarieerd kan worden is de verblijftijd. Dit kan bewerkstelligd worden door de band trager te laten lopen. Een gevolg is wel dat de het product hoger gestapeld zal worden. Daarom is het van belang om bij de laagst mogelijke temperatuur er voor te zorgen dat dit ook de laagst mogelijke bandsnelheid is zonder dat het product te hoog gestapeld wordt. Zo kan het proces goed geregeld worden, en zal de regeling niet tegenstrijdige acties gaan uitvoeren. Want als de producthoogte te hoog zou zijn, kan er niet genoeg lucht door, dus wordt er juist minder gedroogd terwijl dat juist het doel was.

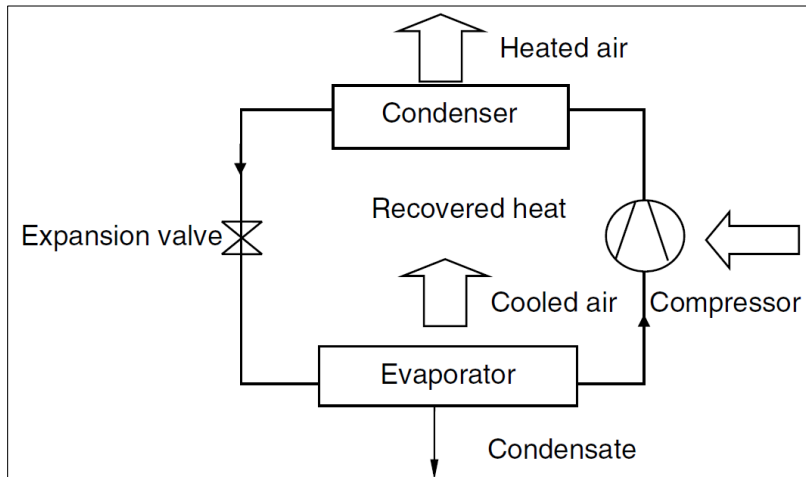
Een semivariabele is de luchtflow, deze kan alleen gevarieerd worden als dat in de ontwerpfase zo bepaald is. Maar dit wordt in de praktijk niet vaak toegepast. Enkel bij variaties in productgewicht, want stel dat het product zou zweven bij te hoge luchtstroom, moet de operator kunnen ingrijpen.

Ook de luchtvochtigheid is van essentieel belang, dit hangt recht evenredig vast aan de droogcapaciteit. Daarnaast zal een te vochtige lucht ook voor corrosie zorgen. Dus wanneer de luchtvochtigheid niet in orde is zal dit er voor zorgen dat de energiekosten omhoog gaan of de productkwaliteit naar beneden. Dit kan geregeld worden met de snelheid van de uitlaatventilator.

2.2.2 Warmtepomp droger (Heat pump dehumidifier; HPD)

Warmtepompen worden steeds meer toegepast in de industrie en zelfs in de woningbouw, maar in de voedingsmiddelenindustrie is dit nog schaars. Maar in theorie zijn warmtepomp ontvochtigers/drogers (Heat pump dehumidifier; HDP) geschikt om voedingsmiddelen te drogen met voordelen ten opzichte van conventionele droogmethodes. Een HPD is namelijk efficiënter, onafhankelijk van de omgevingscondities, heeft betere product kwaliteit en is milieuvriendelijk aangezien de uitgaande vochtige lucht gecondenseerd wordt (O.Perera & Rahman, 1997).

De basiscomponenten van een warmtepomp zijn een expansieklep, twee warmtewisselaars (verdampers en condensator) en een compressor. In figuur 2-3 is een schematische weergave te zien.



Figuur 2-9 Schematische weergave warmtepomp (Mujumdar, 2014)

3 Methode

Het hoofdstuk methode zal beschrijven wat de beoogde onderzoeksstrategie zal zijn gedurende de onderzoeksfase van het afstuderen. Het onderzoeksvoorstel is in de eerste zes weken van het afstuderen opgesteld. Gedurende deze periode is een probleemstelling opgesteld, hierdoor is het probleem en doel duidelijk gemaakt van dit onderzoek. Daaruit volgde een literatuuronderzoek naar de relevante onderwerpen. Eén onderwerp hiervan was het vooronderzoek naar geschikte droogmethodes voor frietdrogen. Tijdens dit vooronderzoek zijn 12 verschillende droogmethodes behandeld, hiervan bleken twee geschikt te zijn voor frietdroging. Deze twee zijn:

- Banddroger (luchtdroger; huidige techniek)
- Heat pump dehumidifier (luchtdroger uitgebreid met een warmtepomp)

De andere methodes bleken niet vernieuwend genoeg of hadden ten op zichte van de huidige techniek geen toegevoegde waarde met het oog op de emissie. Daarom is er voor gekozen om het hoofdonderzoek toe te spitsen op twee droogmethodes. En deze methodes zodoende te onderzoeken en modeleren, om aan te tonen dat het technisch en bedrijfseconomisch haalbaar is om emissieloos friet te drogen.

3.1 Oplossingsmethodes

Het uiteindelijke doel van het onderzoek is een oplossing vinden voor het geurprobleem. De beoogde uitkomst is om de uitgaande luchtstroom afkomstig van de droger te laten condenseren, dit zou kunnen met de volgende twee methodes:

Methode 1 is om de huidige techniek met een banddroger uit te breiden met een condensor om zo de uitgaande vochtige lucht te laten condenseren en dus emissieloos te maken. De vrijgekomen warmte zal dan ergens in het proces hergebruikt worden, dit zal tijdens het onderzoek duidelijk worden, een mogelijke optie is om deze warmte te gebruiken om de blancheur voor te verwarmen.

Methode 2 is om het huidige droogstelsel te combineren met een warmtepomp. Door het gebruik van een warmtepomp zal de luchtstroom een gesloten systeem worden, dit betekent geen emissie. De lucht met het vocht uit de friet zal condenseren op de verdampers van de warmtepomp. Hierdoor wordt er droge koude lucht gecreëerd, deze zal vervolgens bij de condensor van de warmtepomp verhit worden. Hierna zal de lucht weer geschikt zijn voor het drogen van de friet, en is er dus een gesloten kringloop.

De uiteindelijke hoofdvraag die beantwoord zal moeten worden is:

“Welke emissieloze droogmethode in een frietproductieproces is bedrijfseconomisch optimaal?”

Hierbij zijn twee deelvragen opgesteld met sub-deelvragen, de eerste deelvraag luidt:

1. Welke droogtechnieken zijn toepasbaar op frieten?

Deze deelvraag is al deels behandeld in het vooronderzoek tijdens fase 1. Maar de beoogde methode voor de onderzoeksfase is om de twee geschikte droogtechnieken verder uit te werken. En dus de specificaties te bepalen van de capaciteit van de installatie. Dus het doel is om duidelijk te maken hoe de installatie zal werken en hoe deze er technisch uit zal gaan zien.

De tweede deelvraag luidt:

2. Hoe kan de optimale droogmethode objectief aangetoond worden?

Het doel van deze deelvraag is om met behulp van een theoretisch model een objectieve analyse te maken van hoe de twee droogtechnieken ten opzichte van elkaar en ten opzichte van de huidige techniek presteren op technisch en bedrijfseconomisch gebied. Dit zal verwezenlijkt worden met behulp van een massa- en energiebalans.

3.2 Massa- en energiebalans frietproductieproces

Voor een uitgebreide procesbeschrijving van het frietproductieproces kan bijlage 7.2.4 geraadpleegd worden. De massa- en energiebalans van het frietproductieproces is gemaakt met behulp van Excel. Hierdoor kan er gevarieerd worden met verschillende parameters. Eerst en vooral is de massa-balans over het gehele frietproces gemaakt. Hierbij kan de gewenste productiecapaciteit friet ingevoerd worden in kilogram per uur. Vervolgens zullen de verliezen en de gewenste recepten doorgerekend

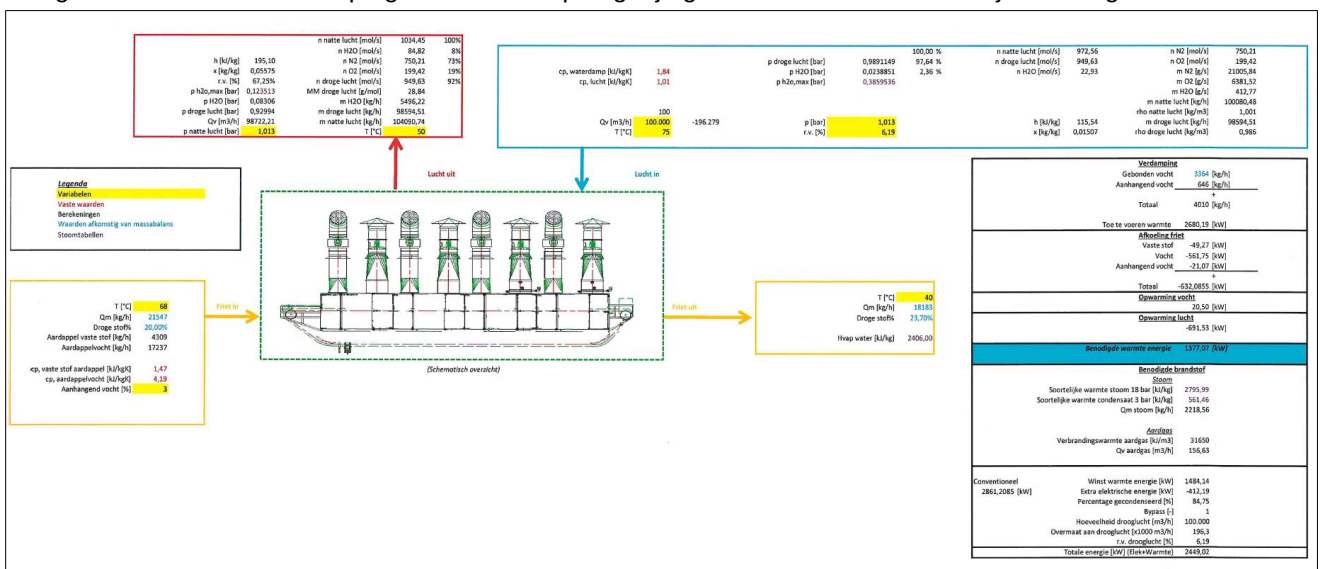
worden, met als resultaat de hoeveelheid aardappelen benodigd. De visualisatie hiervan is te zien op figuur 3-1.

Capaciteit	15000 kg/h
D5% aardappel	4,17 kg/s
Gewenste d5% friet	20%
Gewenste d5% friet	34%

Processtappen	Δm	Drogestofgehalte	Toenmane vaste stof	Verliezen	m% van ontvangst	Massaverlies	Massa [kg/h]
Ontvangst					100%		28743
		Selectie	20,0%	5,0%	95,0%	1437	27306
		Grond/takken/stenen		2,5%	92,6%	683	26624
		Nattte grond		0,5%	92,2%	133	26490
Schillen		Verwijdering schil	20,0%	10,0%	82,9%	2649	23841
Inspectie		Ongesichte aardappels	20,0%	0,5%	82,5%	119	23722
Voorverwarmen			20,0%		82,5%	0	23722
Snijden		Snijverliezen	20,0%	3,0%	80,1%	712	23011
		Zetmeel verwijdering		1,0%	79,3%	230	22780
Sorteren		Sorteer verliezen	20,0%	3,0%	76,9%	683	22097
		Defect verliezen		2,0%	75,3%	442	21655
Blancheren		Productverlies	20,0%	0,5%	75,0%	108	21547
Drogen		Drogestoftoename	23,7%	3,7%	15,6%	3364	18183
Frituren		Verdamping		5,8%	19,7%	3575	14608
		Vetopname	29,5%	4,0%	53,9%	-879	15487
Vriezen		Toename drogestofgehalte	33,5%	0,5%	-1,5%	-228	15259
Verpakken		Sorteer verliezen	34,0%	1,5%	52,3%	229	15030
		Veiligheidsmarge		0,2%	52,2%	30	15000

Figuur 3-1 Massabalans frietproces

Met deze procesgegevens kan er ingezoomd worden op het droogproces. Hiervan is een energie- en massabalans gemaakt. Tevens zijn de variabele parameters geel aangegeven. Deze massa- en energiebalans ziet er uit als op figuur 3-2. Raadpleeg bijlage 7.2.5.2 voor een duidelijker weergave.



Figuur 3-2 Massa- en energiebalans droger

Bij de massa- en energiebalans van de droger zijn er enkele parameters die ingevoerd moeten worden naar wens en realiteit. Dit zijn de volgende:

- Ingaande massastroom friet [kg/h]; afkomstig uit het tabblad *massabalans frietproces* (zie figuur 3-1)
- Drogestofgehalte ingaande friet [%]; afkomstig uit het tabblad *massabalans frietproces*
- Ingaande friettemperatuur [°C]
- Procentuele hoeveelheid aanhangend vocht bij het ingaand product [%]
- Uitgaande friettemperatuur [°C]
- Uitgaande drogestofgehalte friet; afkomstig uit het tabblad *massabalans frietproces*.
- Hoeveelheid drooglucht [m³/h]
- Ingaande droogluchttemperatuur [°C]
- Ingaande drooglucht relatieve vochtigheid [%]
- Uitgaande droogluchttemperatuur [°C]

Met deze waarden wordt het een en ander berekend. Bij de ingaande luchtstroom kan aan de hand van de beschikbare parameters de partiële drukken bepaald worden. Met deze partiële drukken kan de specifieke luchtvochtigheid berekend worden in het aantal kilogram vocht per kilogram droge lucht. Dit kan met de volgende verhouding:

Vergelijking 3-1 Specifieke luchtvochtigheid

$$x = \frac{p_{H_2O}}{p_{droge\ lucht}} * \frac{MM_{H_2O}}{MM_{droge\ lucht}} \left[\frac{kg}{kg} \right]$$

Daarnaast kunnen de molaire massa's van de natte lichtsamenstelling ook worden berekend, vervolgens kan de droge lichtsamenstelling bepaald worden. Dit is van belang bij het gebruik van de enthalpie. Deze enthalpie wordt bepaald met de volgende vergelijking:

Vergelijking 3-2 Luchtenthalpie

$$h = c_{p_{lucht}} * T + x * (h_{verdamping_{water}} + c_{p_{water}} * T) \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Voor de uitgaande luchtstroom van de droger gelden dezelfde rekenmethodes, enkel in een andere volgorde, daar er andere parameters bekend zijn. Hierbij is de toevoeging van het verdampte water in de droger in acht genomen. Deze waarde is afkomstig uit de massabalans van het frietproces (zie figuur 3-1). Na de berekeningen zijn de lichtsamenstelling voor en na de droger bekend.

Vervolgens kan er met de massabalans een energiebalans over de droger gemaakt worden. Deze is opgedeeld uit verschillende warmtevragers. Dit zijn de volgende met bijbehorende gehanteerde vergelijkingen:

Vergelijking 3-3 Vergelijkingen totale warmtevraag frietdroger

- Verdamping vocht: $Q = m_{verdampte\ vocht} * h_{verdamping_{water}}$
- Opwarming (verdampte) vocht: $Q = m_{verdampte\ vocht} * c_{p_{water}} * (T_{uit,friet} - T_{uit,lucht})$
- Afkoeling friet (som van volgende vergelijkingen):
 - Vaste stof: $Q = m_{friet,vaste\ stof} * c_{p_{vaste\ stof\ aardappel}} * (T_{uit,friet} - T_{in,friet})$
 - Vocht: $Q = m_{friet,vocht} * c_{p_{aardappelvocht}} * (T_{uit,friet} - T_{in,friet})$
 - Aanhangend vocht: $Q = m_{aanhangend\ vocht} * c_{p_{water}} * (T_{uit,friet} - T_{in,friet})$
- Opwarming lucht: $Q = m_{drooglucht} * c_{p_{lucht}} * (T_{uit,drooglucht} - T_{in,drooglucht})$

De som van deze warmtevragers is de benodigde warmte (in [kW] aangezien het massastromen zijn) om een frietdroger volgens de ingevoerde parameters te laten functioneren. Met de totale warmte kan er berekend worden hoeveel stoom benodigd is om de droger van de warmte te voorzien. Dit wordt bepaald met de volgende vergelijking:

Vergelijking 3-4 Benodigde stoom

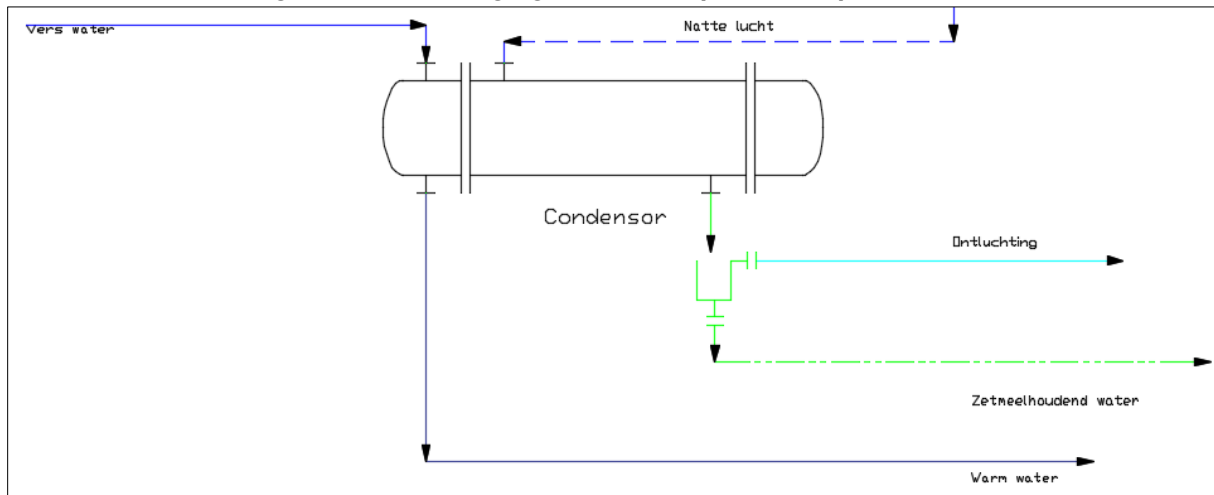
$$Q_m = \frac{Q_{totaal\ droger}}{(h_{stoom,18bar} - h_{condensaat,3\ bar})} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Om de stoom te produceren wordt over het algemeen aardgas gebruikt. De hoeveelheid gas hiervoor benodigd kan berekend worden met de volgende vergelijking:

Vergelijking 3-5 Benodigd aardgas

$$Q_v = \frac{Q_{\text{totaal droger}}}{H_0} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

3.3 Massa- en energiebalans toevoeging condensor (methode 1)



Figuur 3-3 Schematische weergave toepassing condensor (Gommers, 2017)

De eerste oplossingsmethode is om uitgaande lucht te laten condenseren in een condensor (zie figuur 3-3). Ook hiervan kan een energie- en massabalans gemaakt worden. De uitgaande luchtgegevens van figuur 3-2 worden één op één gebruikt in het model van de condensor (voor weergave van het model zie bijlage 7.2.5.4). Zodat het een dynamisch model wordt, waarbij de inputgegevens aangepast kunnen worden. En de resultaten dus mee veranderen.

Om te condenseren moet de lucht een relatieve vochtigheid van 100% hebben. Dit is niet het geval, dus moet er eerst gekoeld worden. Koelen betekent dat de specifieke vochtigheid (x) hetzelfde blijft maar dat de temperatuur en enthalpie dalen, verder verandert er niets aan de samenstelling. Dus de ingaande partiële waterdruk is ook de uitgaande, het verschil is dat dit nu de maximale waterdruk (dampspanning) is. Met deze dampspanning kan in de stoomtabellen de temperatuur bepaald worden. Hierdoor zijn er alle gegevens bekend om met vergelijking 3-2 de enthalpie na de koeling te berekenen. Met als gevolg dat de vrijkomende warmte door koeling berekend kan worden met de volgende vergelijking:

Vergelijking 3-6 Koelingsenergie

$$Q_{\text{koelen}} = m_{\text{droge lucht}} * (h_{\text{na koeling}} - h_{\text{in}}) [kW]$$

Vervolgens kan er gecondenseerd worden, dit gebeurt constant onder een relatieve vochtigheid van 100%. De hoeveelheid condensaat wordt bepaald door de eindtemperatuur. Er wordt een temperatuurverschil van vijf graden gesteld met de ingaande temperatuur van het koelmedium. Hiermee kan de partiële waterdruk van de te condenseren lucht bepaald worden. Waarmee dus de specifieke vochtigheid bepaald kan worden (met vergelijking 3-1). Vervolgens kan de enthalpie van de uitgang van de condensor bepaald worden met vergelijking 3-2. De warmte die vrijgekomen is bij het condenseren is te bepalen met de volgende vergelijking:

Vergelijking 3-7 Condensatiewarmte

$$Q_{\text{condensatie}} = m_{\text{droge lucht}} * (h_{\text{na condensatie}} - h_{\text{na koeling}}) [kW]$$

De som van de condensatiewarmte en de koelwarmte is de vrijgekomen warmte die opgenomen moet worden door het koelwater. Hiermee kan dus het benodigde koelwater berekend worden, met de volgende vergelijking:

Vergelijking 3-8 Massastroom koelwater

$$Q_{m_{\text{koelwater}}} = \frac{Q_{\text{condensor}}}{c_{p_{\text{water}}} * (T_{\text{koelwater}_{\text{uit}}} - T_{\text{koelwater}_{\text{in}}})} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

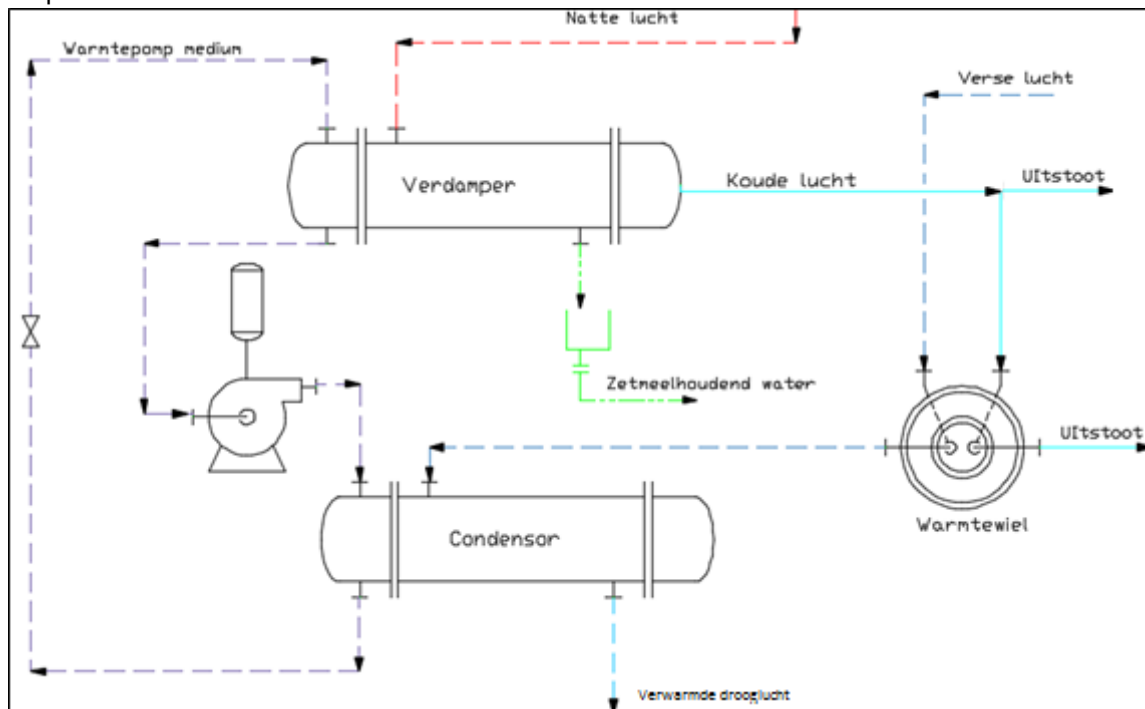
Om te bepalen of het doel bereikt is, dus het vocht uit de lucht te condenseren, kan met de volgende vergelijking bepaald worden:

Vergelijking 3-9 Hoeveelheid condensaat

$$Q_{m_{\text{condensaat}}} = m_{\text{droge lucht}} * (x_{\text{in condensor}} - x_{\text{uit condensor}}) \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

3.4 Massa- en energiebalans toevoeging warmtepomp (methode 2)

De tweede oplossingsmethode is om uitgaande lucht te laten condenseren in een verdamper van een warmtepomp en vervolgens verse lucht op te warmen in de condensor van de warmtepomp. Het proces is schematisch weergegeven op figuur 3-4. Ook hiervan kan een energie- en massabalans gemaakt worden. De uitgaande luchtgegevens van figuur 3-2 worden één op één gebruikt in het model van de warmtepomp (zie bijlage 7.2.5.3). Zodat het model mee verandert bij aanpassingen van de parameters.



Figuur 3-4 Schematische weergave toepassing warmtepomp (Gommers, 2017)

Voor het condenseren in de verdamper (van de warmtepomp) wordt dezelfde methodiek gebruikt als in hoofdstuk 3.3. Het verschil is dat de warmte niet aan koelwater afgestaan wordt maar aan een koelmiddel. Het uiteindelijke koelmiddel zal in de resultaten bekend zijn. De hoeveelheid wordt bepaald aan de hand van de volgende vergelijking:

Vergelijking 3-10 Hoeveelheid koelmiddel

$$Q_{m_{\text{koelmiddel}}} = \frac{Q_{\text{verdamp}}}{(h_{\text{koelmiddel uit}} - h_{\text{koelmiddel in}})} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

In deze vergelijking zijn enthalpiën te vinden van het koudemiddel. Deze zijn te vinden in log(p)-h diagrammen van het betreffende koelmiddel. Welk koelmiddel en op welke druk deze opereert zal in de resultaten verder toegelicht worden. Met de log(p)-h diagrammen kan dan met de delta h over de compressor en de delta h over de condensor ook die energetische vermogens (in [kW]) bepaald worden, door het verschil in enthalpie met de massastroom van het koudemiddel te vermenigvuldigen. Met het vermogen van de condensor (van de warmtepomp) kan dan bepaald worden hoeveel verse lucht opgewarmd dient te worden naar de gewenste luchttemperatuur. Met deze temperatuur kan net als in hoofdstuk 3.3 de luchtsamenstelling berekend worden (x [kg/kg], h [kJ/kg] en r.v. [%]). Om te bepalen of het doel bereikt is, dus het vocht uit de lucht te condenseren, kan met de volgende vergelijking bepaald worden:

Vergelijking 3-11 Hoeveelheid condensaat bij gebruik warmtepomp

$$Q_{m_{\text{condensaat}}} = m_{\text{droge lucht}} * (x_{\text{in verdamper}} - x_{\text{uit verdamper}}) \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

4 Resultaten

In dit hoofdstuk zullen de deelvragen beantwoord worden. In de probleemstelling zijn twee deelvragen opgesteld om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden. Omdat er twee droogtechnieken met elkaar vergeleken zijn. Zal eerst deelvraag 1 beantwoord worden voor de twee methodes, en vervolgens deelvraag 2.

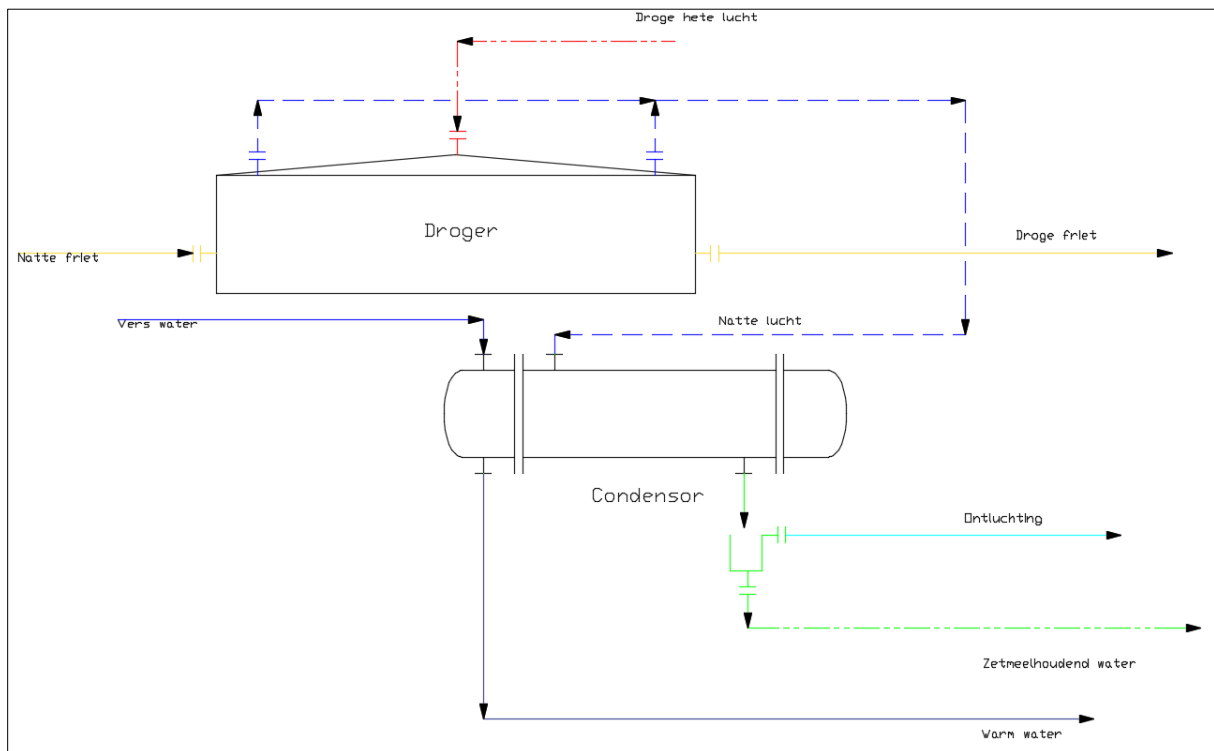
4.1 Deelvraag 1

De eerste deelvraag uit de probleemstelling was de volgende:

3. Welke droogtechnieken zijn toepasbaar op frieten?

4.1.1 Banddroger (luchtdroger uitgebreid met een condensor)

De huidige techniek, namelijk de lucht banddroger, kan uitgebreid worden met een condensor. Dit met als doel om de uitgaande natte lucht van de droger te condenseren, om zo het zetmeelhoudend water af te vangen en dus de geuremissie van het zetmeel die normaliter uitgestoten wordt in de atmosfeer te verwijderen. Om de warme natte lucht te laten condenseren, wordt er water gebruikt. Hierdoor zal het koude water opgewarmd worden, dit warme water kan elders gebruikt worden. In figuur 4-1 is een overzicht te zien van de beoogde opstelling.



Figuur 4-1 Process Flow Diagram van de beoogde opstelling (Gommers, 2017)

4.1.1.1 Voor- en nadelen

De voor- en nadelen van een luchtdroger uitgebreid met een condensor zijn:

Voordelen:

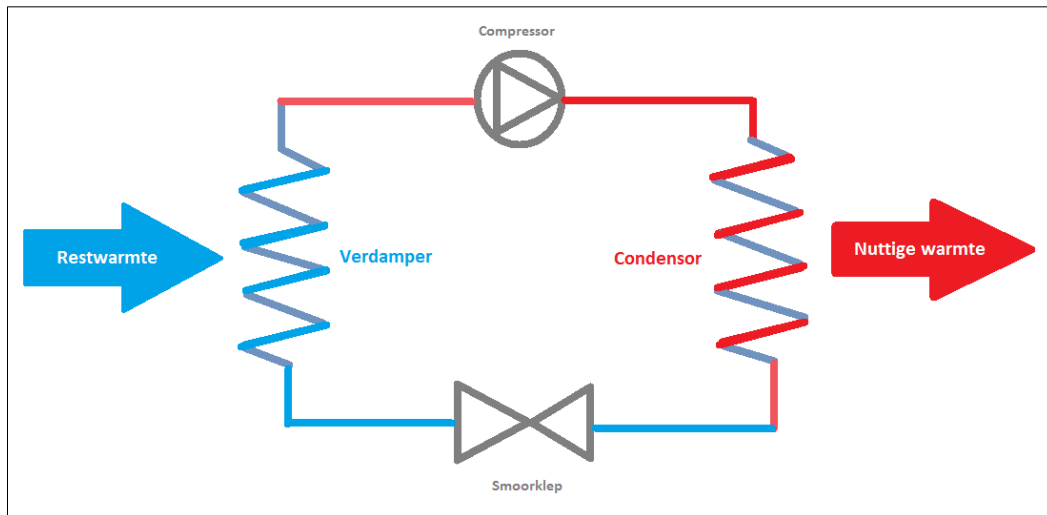
- Condenseert het vocht uit de lucht, dus vermindert de geuroverlast.
- Energieterugwinning in de vorm van warm water (lees 45 °C).

Nadelen:

- Heeft regelmatig onderhoud nodig, door het aankoeken van het zetmeel houdende water.

4.1.2 Heat pump dehumidifier (luchtdroger uitgebreid met een warmtepomp)

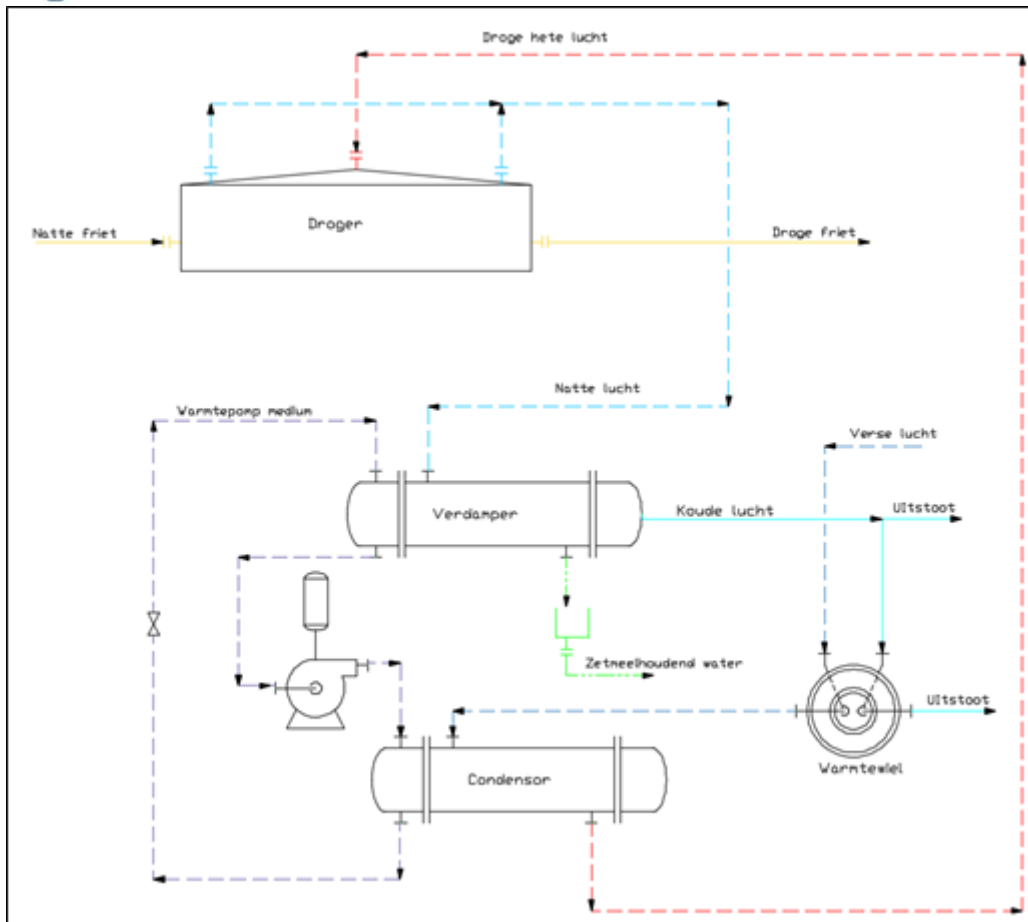
Deze techniek berust ook op het principe om het vocht met aanhangend zetmeel te condenseren om zo een geur reductie te verwezenlijken. Het verschil met een warmtepomp en een condensor is dat de latente warmte die vrijkomt bij het condenseren doorgegeven wordt aan een koelmiddel. Deze latente warmte wordt vervolgens omgezet naar voelbare warmte doormiddel van toevoeging van arbeid met behulp van een compressor. Dit proces is schematisch weergegeven op figuur 4-2.



Figuur 4-2 Schematisch overzicht werkingsprincipe warmtepomp (Gommers, 2017)

4.1.2.1 Principe

De verdamer van de warmtepomp heeft als functie om de lucht te koelen en te ontvochtigen. Dit wordt bewerkstelligd doordat het koelmiddel de warmte van de lucht absorbeert. Het koelmiddel zal een faseovergang maken van de vloeistoffase naar de gasfase. Wanneer de gasfase bereikt is, wordt de druk van het gas verhoogd in een compressor. Hierdoor is het kookpunt ook verhoogd, en is de temperatuur hoger dan de omgevingstemperatuur (bij een hoog genoeg opgevoerde druk). De verkregen warmte uit de verdamer en de mechanische energie van de compressie wordt vervolgens weer getransporteerd naar de omgeving met behulp van een condensor, hier wordt de lucht dus verhit. Nadat de damp van het koelmiddel de condensor verlaat, kan dit nog eens na gekoeld worden. Hier kan nog extra warmte gewonnen worden en het voorkomt flashen bij de drukverlagingstap. De drukverlagingstap komt dus na de condensor. Hierbij wordt de druk van de damp weer terug gebracht naar het niveau van de verdamer. Deze drukverlaging betekent dat er een faseverandering plaatsvindt, namelijk van gas naar vloeistof. Dit wordt bewerkstelligd door een smoorklep of een ander druk verlagend appendage. Vanaf dit punt kan de kringloop weer herbeginnen.



Figuur 4-3 Process Flow Diagram warmtepomp droogsystem (Gommers, 2017)

Op figuur 4-3 is een schematische weergave te zien van een warmtepomp ontvochtiger. Het principe van de droogkamer komt op hetzelfde neer als een banddroger van hoofdstuk 2.2.1. Wat deze techniek anders maakt dan de conventionele luchtdroging, is de methode van de aan- en afzuig van de lucht. Bij deze techniek is het een gesloten systeem. De uitgaande lucht passeert de verdamper van de warmtepomp, wat dus als condensor geldt voor het luchtsysteem. Hier zal het opgenomen vocht uit de friet weer condenseren. Dit is een voordeel met oog op de geurproblemen, want het zetmeel dat deze geurproblemen veroorzaakt is aanhangend aan het vocht. Vervolgens zal de droge koude lucht verwarmd worden door de condensor van warmtepomp. Zo zal deze weer geschikt zijn om de friet te drogen.

Het energetisch rendement van een warmtepomp kan aangetoond worden met de “Coefficient Of Performance”(COP). Deze COP is als volgt opgesteld:

Vergelijking 4-1 COP

$$COP_h = \frac{\text{bruikbare uitgaande warmte}}{\text{ingaaand vermogen}}$$

Door deze formule te combineren met de eerste hoofdwet van de thermodynamica (wet van behoud van energie) kan de vergelijking herleid worden tot:

Vergelijking 4-2 COP eerste hoofdwet

$$COP = \frac{T_{\text{condensor}}}{T_{\text{condensor}} - T_{\text{verdamper}}}$$

Deze benadering kan fysisch niet benaderd worden, maar hiermee kan bepaald worden in hoeverre het koelsysteem van het ideale systeem afwijkt. In de praktijk ligt het rendement zo rond de 40 a 50%.

Om de prestaties van het gehele droogstelsysteem te analyseren, wordt de "Specific moisture extraction rate" (SMER) gebruikt. Deze SMER is gedefinieerd als:

Vergelijking 4-3 SMER

$$SMER = \frac{\text{hoeveelheid water verdampt} \left[\frac{kg}{kWh} \right]}{\text{toegevoerde energie}} \equiv \left(\frac{\text{massastroom verdampt water} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\text{toegevoerde energie} \left[\frac{kW}{s} \right]} \right)$$

4.1.2.2 Voor- en nadelen

De voor- en nadelen van een warmtepompdroger zijn:

Voordelen:

- Heeft een hoge SMER, in het bereik van 1 tot 4. Dit doordat de warmte teruggewonnen kan worden uit de vochtige lucht.
- Doordat een warmtepompdroger op lagere temperaturen kan opereren door de luchtvochtigheid verder te laten zakken, komt dit ten goede bij het te drogen product.
- Een groot bereik van droogcondities. Van -20°C tot 100°C en een luchtvochtigheid van 15 tot 80%.
- Omgevingscondities in de droger kunnen perfect geregeld worden doordat het een gesloten systeem is.

Nadelen:

- Heeft regelmatig onderhoud nodig, door het gebruik van de extra arbeidsintensieve apparaten als de compressor en het koelmiddelfilter. Daarnaast moet het koelmiddel ook verversd worden. Het zetmeel afkomstig uit de vochtige lucht zal ook regelmatig verwijderd moeten worden aangezien dit afzet.
- Een warmtepompdroger brengt hogere aanschaffkosten met zich mee ten opzichte van enkel een condensor.

4.1.2.3 Efficiëntie

Doordat een warmtepomp over de mogelijkheid beschikt om latente warmte uit condensatie om te zetten naar voelbare warmte, zal een warmtepompdroger een hogere SMER hebben dan andere droogsystemen. Dit zal uiteindelijk resulteren in lagere bedrijfskosten, dus zullen de in eerste instantie hogere aanschaffkosten ook sneller terugverdiend worden, in theorie. Een overzicht met de specificatieverschillen tussen verschillende droogtechnieken is te zien in tabel 4-1. De warmtepompdroger die in tabel 4-1 benoemd wordt, is niet met hetzelfde doel ontworpen als die in dit onderzoek. De vernoemde warmtepompdrogers in de literatuur (Mujumdar, 2014) hebben als doel het energieverbruik te verminderen en niet om de emissie terug te dringen. Bij dergelijke warmtepompdrogers wordt ook maar een deel van de uitgaande drogerlucht gebruikt als warmtebron.

Tabel 4-1 Vergelijking droogsystemen (Perera & Rahman, 1990)

Parameter	Conventionele banddroger	Vacuüm droger	Warmtepomp droger	
SMER	0,12 - 1,28	0,72 - 1,2	1,0 - 4,0	[kg water / kWh]
Droogrendement	35 - 40	<= 70	95	[%]
Bedrijfstemperatuur	40 - 90	30 - 60	10 - 65	[°C]
Aanschaffkosten	Laag	Hoog	Gematigde	[-]
Bedrijfskosten	Hoog	Zeër hoog	Laag	[-]

4.2 Deelvraag 2

De tweede deelvraag uit de probleemstelling was de volgende:

4. Hoe kan de optimale droogmethode objectief aangetoond worden?

Maar vooraleer de twee methoden geanalyseerd worden. Zal er bekend moeten zijn wat een reductie in uitstoot voor invloed heeft op de geur. Hiervoor is een geurrapport (SGS Nederland BV, 2016) geraadpleegd dat voor Farm Frites B.V. Oudenhorn is opgesteld, let wel deze informatie is vertrouwelijk! Het geurrapport was opgesteld met als reden een gewenste capaciteitsverhoging van 25 naar 35 ton friet productie per uur (40% verhoging). Dit onderzoek is afgehandeld door SGS Nederland BV, en op 22 januari 2016 gepubliceerd aan Farm Frites B.V. De belangrijkste informatie die voor dit onderzoek geldt, zijn de geuruitstoten in $[Mou_E/h]$ (Geuremissie in miljoen Europese geureenheden per uur) en de hypothetische verandering hierin bij verhoging van de capaciteit. Ofwel het verband in uitstoot en geuremissie. In de tabel 4-2 zijn de geuremissiecijfers van de twee drogers te zien. Hieruit blijkt dat de geuruitstoot procentueel gelijkmatig mee verandert met de capaciteit, en dus ook bij uitstootverhoging/verlaging.

Tabel 4-2 Geuruitstoot frietdroger (SGS Nederland BV, 2016)

Capaciteit		25	35	0,4
		Emissie $[Mou_E/h]$		Stijging%
Droger 1	Sectie 1	4,4	6,1	0,39
	Sectie 2	5,8	8,2	0,41
	Sectie 3	5,6	7,8	0,39
	Sectie 4	7,6	10,6	0,39
	Sectie 5	14	19,1	0,36
Droger 2	Sectie 1	13	18,1	0,39
	Sectie 2	16	22,9	0,43
	Sectie 3	6,4	9	0,41
Totaal		72,8	101,8	0,40

Wat daarnaast ook belangrijk is, is wat er toegelaten is als emissie. Dit is sterk afhankelijk van de plaats van een fabriek/emissiebron, dit heeft te maken met de verspreiding van de geur en de dichtstbijzijnde woonbebouwing. Uitgaande van de provincie Zuid-Holland ligt het afwegingsgebied van de maximale geurblootstelling op de dichtst bij gelegen aaneengesloten woonbebouwing in de 98-percentiel tussen de 0.5 en 5 $[ou_E/m^3]$. In de huidige situatie bij Farm Frites is dit nu 9 $[ou_E/m^3]$ en is een reductie van 45% op de totale uitstoot benodigd (de droger draagt 16% mee aan de totale uitstoot). Een mogelijke oplossing hiervoor is het bouwen van een schoorsteen. Deze schoorsteen zorgt ervoor dat de emissie op ene hoger punt verspreid wordt en dus sneller concentratie verliest. Maar een schoorsteen in deze orde grootte (+/- 35 m) heeft een aanschafwaarde van ongeveer €300.000,- en brengt niets op.

4.2.1 Banddroger (luchtdroger uitgebreid met een condensor)

Wanneer de uitgaande vochtige lucht van de droger door een condensor wordt gestuurd zal het vocht condenseren en energie vrijkomen. Bij een frietproductieproces van 15 ton friet per uur wordt 80.000 m^3/h aan drooglucht gebruikt (gemiddeld heeft deze een relatieve vochtigheid van 80% en een temperatuur van 20°C). Deze lucht neemt het vocht uit de friet op. De volumestroom bedraagt bij de uitgang dan ongeveer 94.000 m^3/h , de lucht heeft een temperatuur van 50°C en een relatieve vochtigheid van 66%. De afvoerlucht wordt in de condensor gekoeld met water van 15°C. De warmte die daarbij vrijkomt is 3400 kW. Doordat de eindtemperatuur van het water vastligt op 45°C (vanwege de luchttemperatuur van 50°C), is de massastroom de variabele in het systeem om ervoor te zorgen dat de energie opgenomen wordt. Deze massastroom zal dan 98.000 kg/h bedragen volgens vergelijking 3-8. Dit komt overeen met 98 m^3/h aan water van 45°C. Wanneer dit water opgewarmd zou worden met aardgas, is er een besparing van €2.377.000,- volgens de berekeningen op tabel 4-3.

Tabel 4-3 Besparing aardgas bij verwarming 98m³/h koelwater naar 45°C

	<i>Besparing aardgas</i>
Vrijgekomen warmte [kW]	3400
Verbrandingswarmte aardgas [kJ/m ³]	31650
Qv aardgas [m ³ /h]	391
Verbruik [J/jaar]	1,08E+14
Verbruik [GJ/jaar]	108.500
Gasprijs 2016 (volgens CBS) [€/GJ]	21,915
Besparing [€/jaar]	€ 2.376.600,40

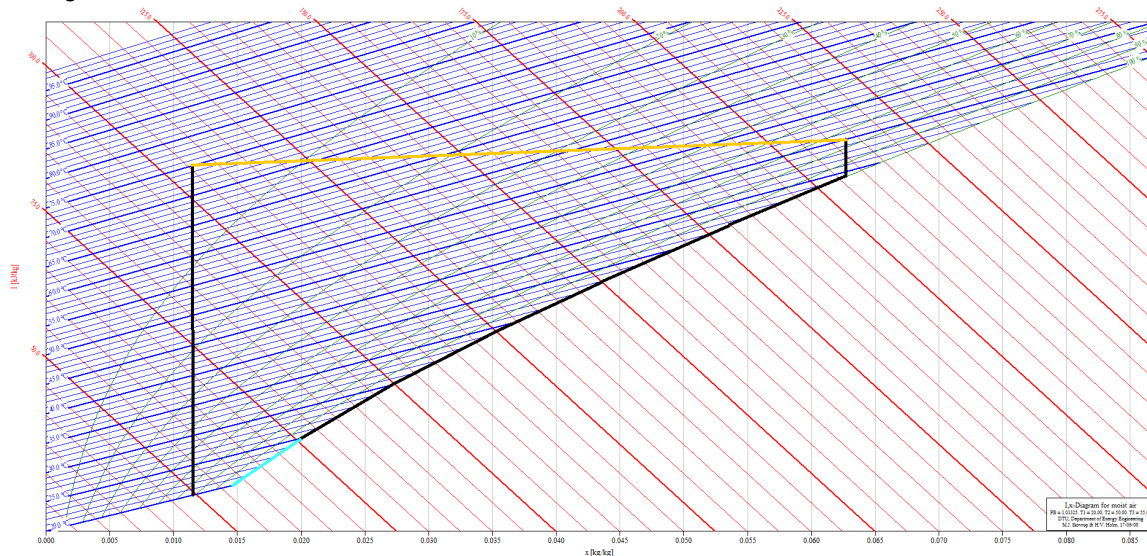
Maar intern kan dit water niet gebruikt worden daar er al genoeg warmte beschikbaar is volgens Synergo, dit zou een vervolgonderzoek kunnen uitwijzen. Wanneer het warm water verkocht zou worden aan derden, denk hierbij aan stadsverwarming of andere industrie. Dan kan dit bijvoorbeeld aan 50% van de gasprijs. De bovengenoemde besparing zal halveren naar €1.188.300,20. Daar gaat nog de aanschafkosten van het koelwater af en de aanschafkostenpost van 320.000,- van de condensor volgens het Price Booklet (Dace, 32).

Doordat de vochtige lucht niet verder dan 20°C gekoeld kan worden (vanwege de koelwatertemperatuur van 15°C), condenseert niet al het vocht dat aanwezig is in de lucht. Door het gebruik van vergelijking 3-9 blijkt dat in deze situatie 91% van het vocht condenseert.

4.2.2 Heat pump dehumidifier (luchtdroger uitgebreid met een warmtepomp)

Een warmtepompdroger gebruikt de energie die nog aanwezig is in de uitgaande droogluchtstroom van de frietdroger. Dit is vooral latente warmte die vrijkomt bij condensatie van het vocht in de lucht. Dit is uiteindelijk ook het hoofddoel om het vocht te condenseren, omdat daarin de geurcomponenten aanwezig zijn. De hoeveelheid warmte die vrijkomt, is afhankelijk van de hoeveelheid lucht en hoe ver er gekoeld kan worden. Naarmate er lager gekoeld kan worden, des te meer vocht er condenseert. Om een dergelijk warmtepompdroger systeem te analyseren als mogelijke oplossing van het geurprobleem is er een model opgesteld (zie hoofdstuk 3.4). In dit model is een frietproductieproces van 15 ton friet per uur aangehouden, hierbij wordt er 80.000 m³/h aan drooglucht gebruikt. Deze drooglucht zal de gewenste hoeveelheid vocht (in deze situatie 4000 kg/h) opnemen en met een temperatuur van 50°C de droger verlaten en met een relatieve vochtigheid van 78,3%. Een verschil met de conventionele droger is dat de ingaande drooglucht een hogere temperatuur en een lagere relatieve vochtigheid heeft. De lucht bedraagt namelijk een temperatuur van 75°C en een relatieve vochtigheid van 6,2%. Dit wordt gerealiseerd met behulp van de warmtepomp. De energie die gewonnen wordt bij het condenseren wordt weer gebruikt om verse lucht op te warmen en droger te maken. De hoeveelheid van de warmte die in de verdamper van de warmtepomp (waar de lucht condenseert) vrijkomt is volgens vergelijking 3-6 en 3-7 3090 kW. Dit is minder energie dan bij de condensor van hoofdstuk 4.2.1, omdat er bij de warmtepomp maar tot 25°C gekoeld kan worden door de beperking van de luchttemperatuur. Minder vermogen wil ook zeggen dat de hoeveelheid gecondenseerd vocht minder is. Met behulp van vergelijking 3-9 is er bepaald dat er 87% van de 4000 kg/h vocht wordt gecondenseerd. Het is het wel mogelijk om volledig te condenseren en dus volledig geurvrij te opereren. Dit kan enkel wanneer de warmtewisseling na de verdamper met de verse lucht wordt uitgeschakeld. Dan kan de uitgaande temperatuur uit de verdamper verlaagd worden tot het punt van 100% condenseren. Dit betekent wel een verhoging in compressorvermogen, en dus elektrische kosten.

Het vocht zal naar de waterzuivering gestuurd worden en de lucht die 25°C bedraagt, wordt afgeblazen. De bovengenoemde kringloop van de warmtepompdroger ziet er in het Mollier-diagram uit als op figuur 4-4 (voor een duidelijkere weergave raadpleeg bijlage 7.2.7). De schuine zwarte lijn is het condenseren, het lichtblauwe lijntje is de warmteoverdracht in het warmtewiel (met een deelstroom van de afgevoerde drooglucht). De verticale zwarte lijn is de warmteoverdracht in de verdamper. En de gele lijn is een denkbeeldige drooglijn, in werkelijkheid zal deze volgens een haaiantandprofiel lopen met constante enthalpie en constante specifieke luchtvochtigheid. Maar omdat de totale droger als black box is doorgerekend op energievlak kan er hier geen beeld van gegeven worden per droogsectie.



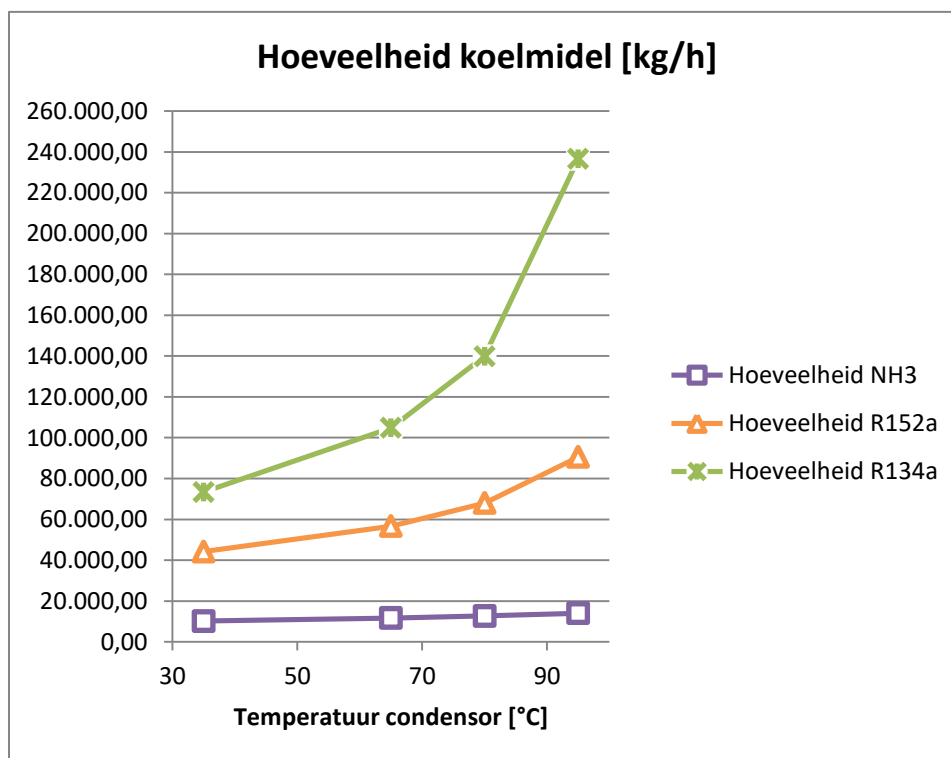
Figuur 4-4 Mollier-diagram warmtepompdroger

De warmte die vrijkomt in de condensor verplaatst zich naar de warmtepomp. In eerste instantie wordt er extra arbeid aan de energie toegevoegd doormiddel van een compressor. Zo heeft het koelmiddel een hoger energetisch niveau, door op een hogere druk en temperatuur te verblijven. Deze energie wordt vervolgens weer afgestaan in de condensor van warmtepomp aan verse drooglucht. De hoeveelheid van deze energie kan bepaald worden door een log(p)-h diagram te gebruiken van het betreffende koelmiddel. Welk koelmiddel het meest optimaal is voor de frietdrogersituatie is bepaald door verschillende koelmiddelen op verschillende werkdrukken te vergelijken. In deze vergelijking zijn drie koelmiddelen geanalyseerd, namelijk:

- NH₃ Ammoniak (R717)
- CH₃CHF₂ 1,1-difluoroethane (R152a)
- CH₂FCF₃ 1,1,1,2-tetrafluoroethane (R134a)

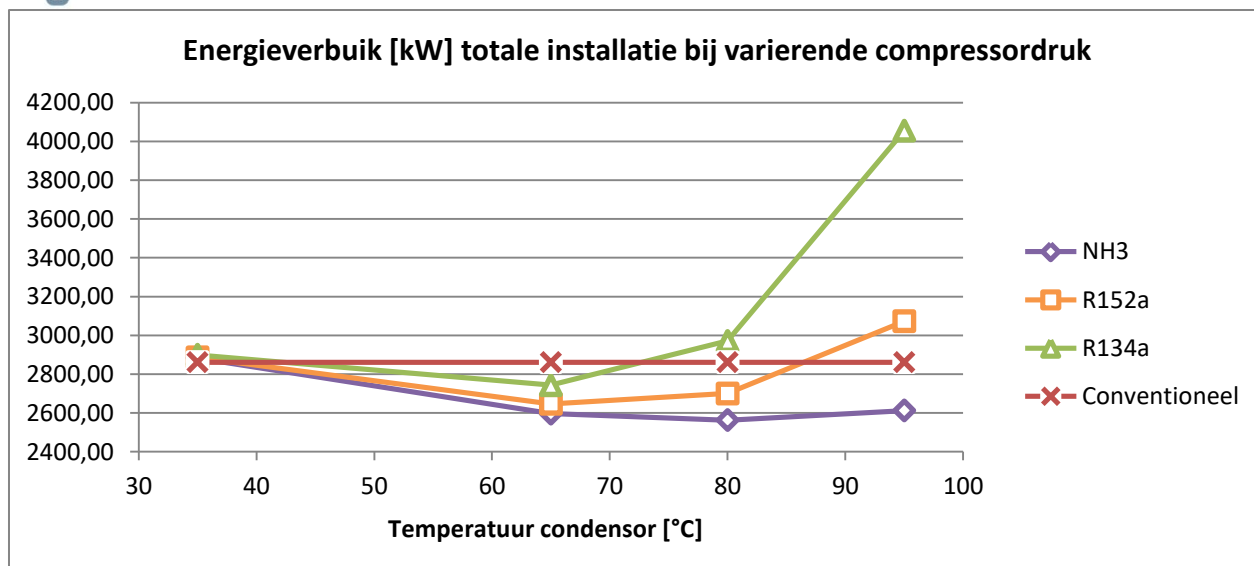
De reden voor het analyseren van deze middelen, is dat ze geschikt zijn voor grote compressorvermogens en foodsafe zijn volgens (De Kleijn Energy Consulting B.V.).

In eerste instantie is er bepaald hoeveel er van het koelmiddel benodigd moest zijn, dat is te zien in figuur 4-5. Hierbij is de temperatuur van de verdamper op 10°C vastgesteld en de (uitgaande) temperatuur bij de condensor gevarieerd tussen de 35 en 95°C.



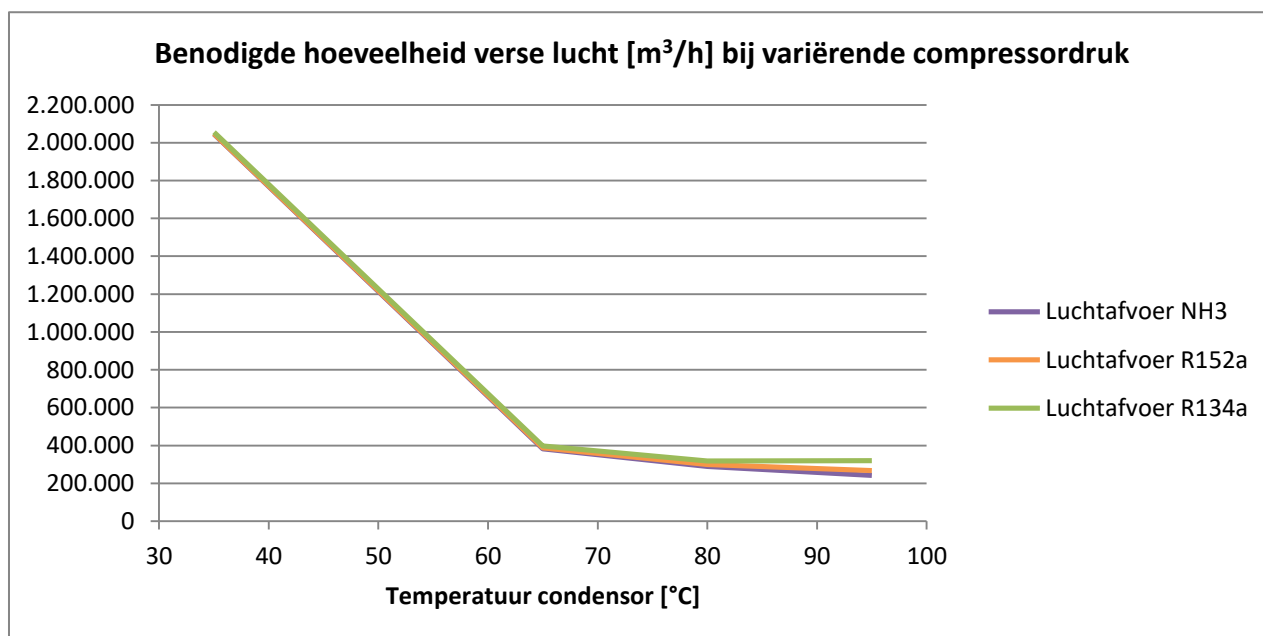
Figuur 4-5 Grafiek met verschillen in hoeveelheid koelmiddel

Vervolgens is er bepaald wat het totale energieverbruik is van de drooginstallatie inclusief het compressor vermogen van de warmtepomp bij variërende compressordruk (=variërende temperatuur condensor). Dit gaf het volgende resultaat van figuur 4-6. De rode lijn is het verbruik zonder warmtepomp.



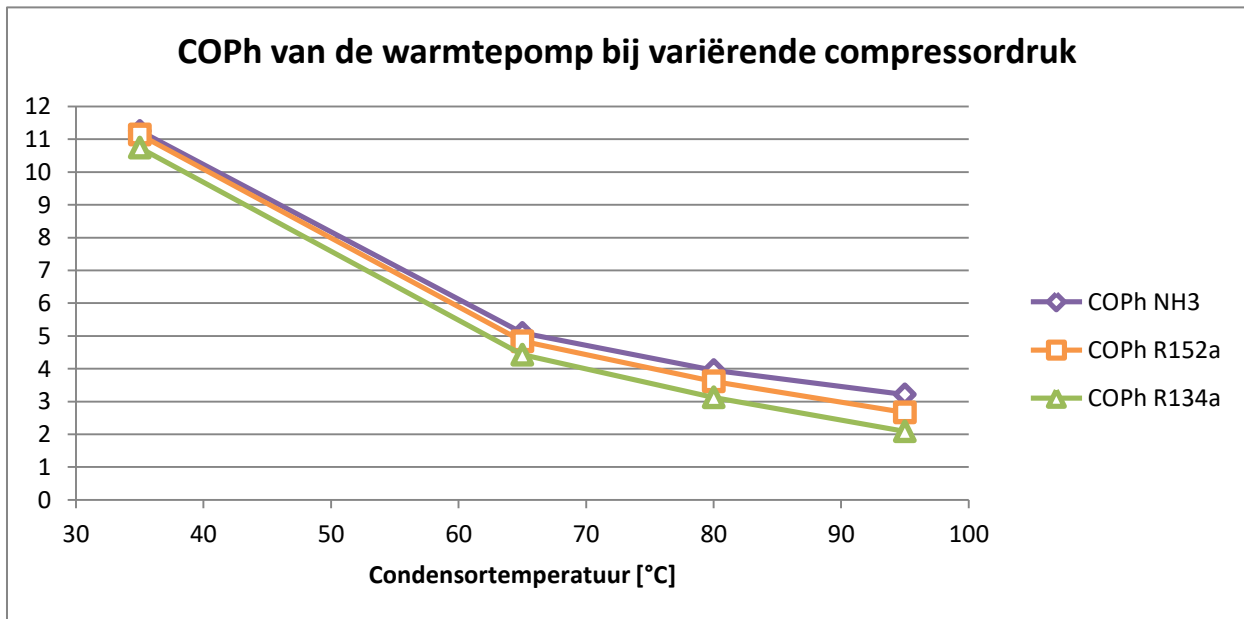
Figuur 4-6 Energieverbruik drooginstallatie met verschillende koelmiddelen

Doordat de compressordruk gevarieerd wordt (dus ook de condensortemperatuur), maar de beschikbare warmte hetzelfde blijft zal de benodigde hoeveelheid verse lucht ook variëren. Dit is in figuur 4-7 gevisualiseerd.



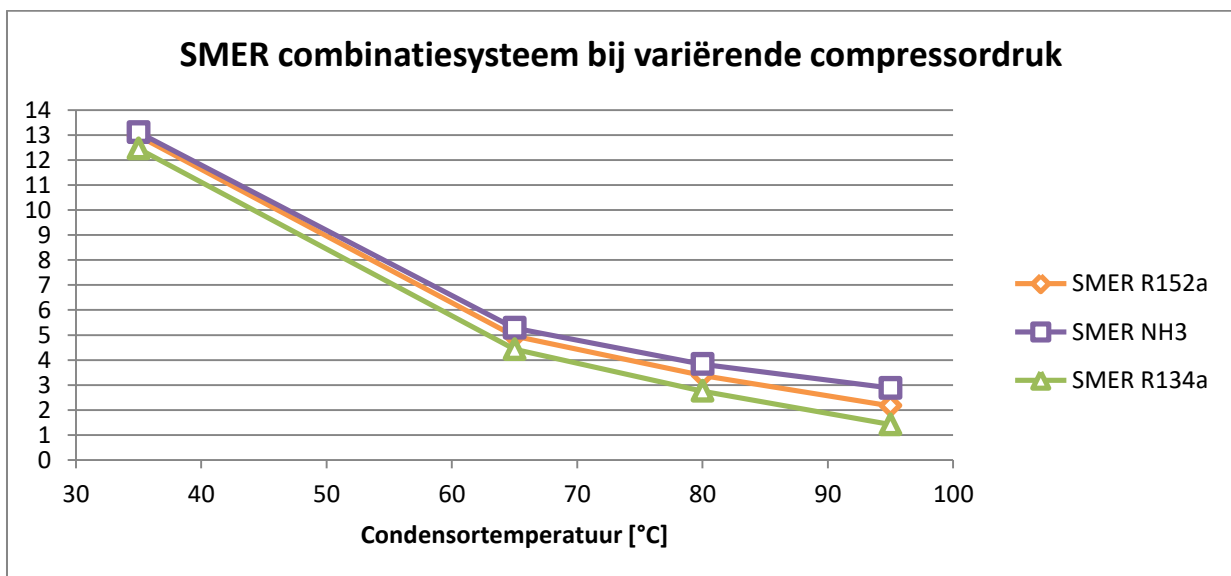
Figuur 4-7 Benodigde hoeveelheid verse lucht met verschillende koelmiddelen

Vervolgens is de prestatie van de warmtepomp geanalyseerd met het bepalen van de COP. Deze wordt bepaald volgens vergelijking 4-1. In deze instantie staat er COPh omdat de warmtepomp als heater (verhitter) wordt gebruikt. Dit betekent dat de nuttige energie de hoeveelheid energie is die afgestaan wordt in de condensor.



Figuur 4-8 COPh van de warmtepomp bij verschillende koelmiddelen

Om de prestatie van de combinatie van de warmtepomp met de frietdroger te bepalen, is de SMER (vergelijking 4-3) bepaald. Deze uitkomsten zijn te zien op figuur 4-9.



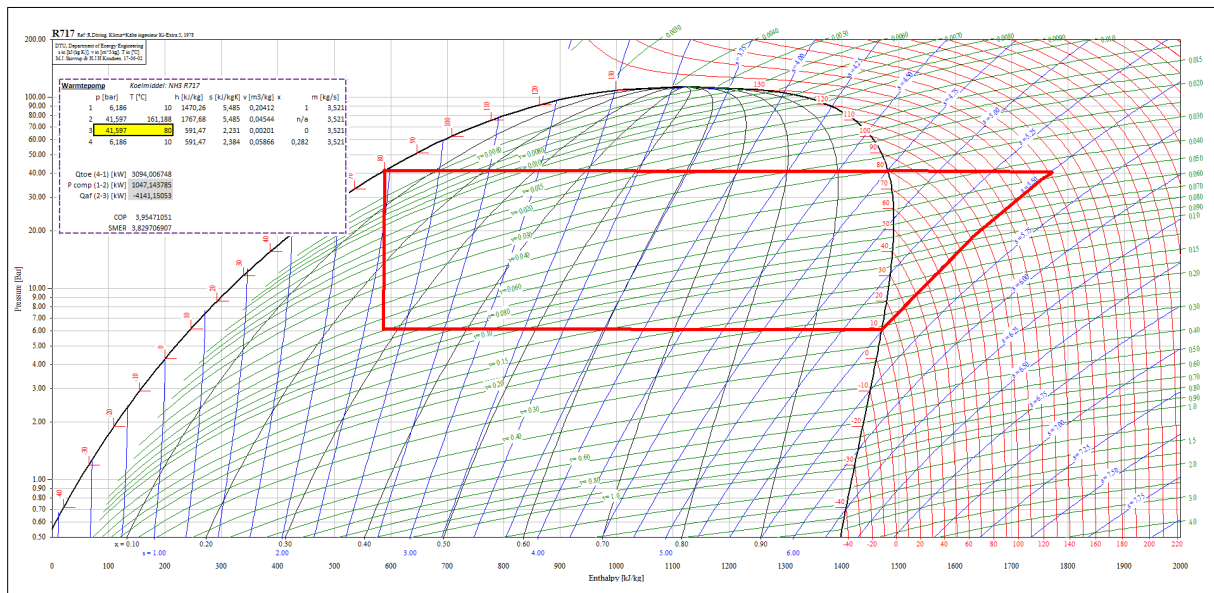
Figuur 4-9 SMER van het combinatiesysteem bij verschillende koelmiddelen

De hierboven getoonde grafieken (figuur 4-5 t/m 4-9) met betrekking tot het bepalen van het optimale koelmiddel, kunnen beschouwd worden als criteria voor een simpele multicriteria-analyse (MCA). Deze MCA is te zien op figuur 4-10. Hierbij zijn er 3 punten gegeven aan het koelmiddel dat per criteria het best scoorde en 1 punt aan het koelmiddel dat het slechtst scoorde.

	COP	SMER [kg/kWh]	Totale Energie [kW]	m koelmiddel [kg/h]	Luchtafvoer [kg/h]	Totaal
NH3	3	3	3	3	3	15
R152a	2	2	2	2	2	10
R134a	1	1	1	1	1	5

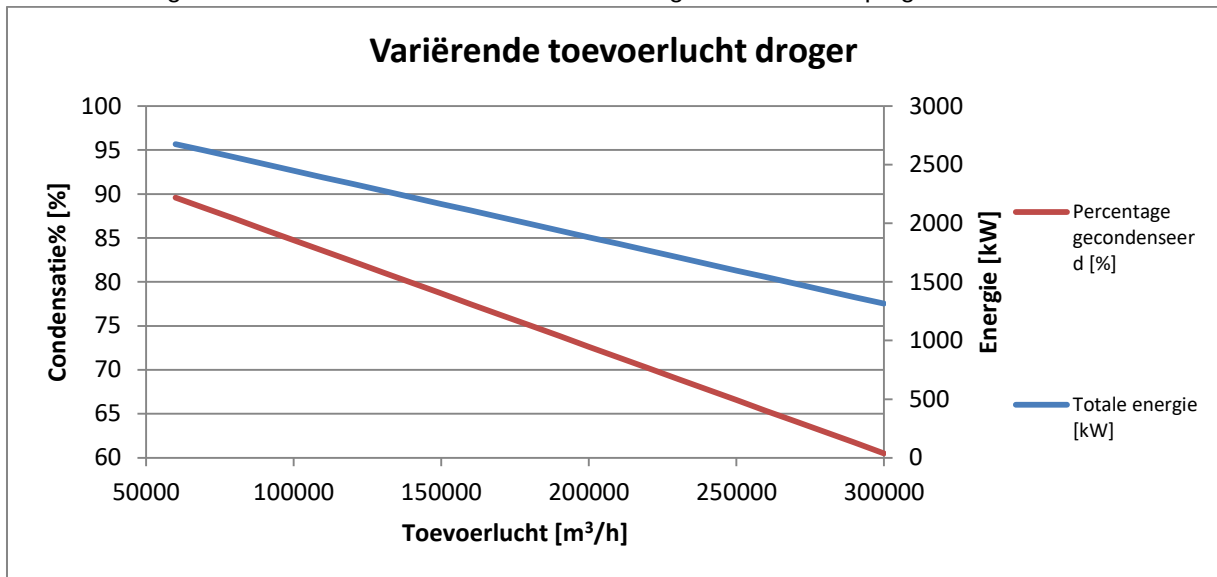
Figuur 4-10 Multicriteria-analyse koelmiddelen

Uit de MCA blijkt dat Ammoniak het meest geschikt is om toe te passen. Uit figuur 4-5 bleek dat het energieverbruik van de totale installatie bij 80°C het laagst was met het gebruik van NH3. Dit zal bij verdere optimalisatie gebruikt worden als werktemperatuur/-druk van de condensor. Bij deze druk bedraagt het compressorvermogen 1050 kW en een condensorvermogen van 4140 kW. Dit komt neer op een COPh van 3,94 en de SMER is 3,83 en er is dus 87% vocht gecondenseerd. De warmtepompcyclus is op figuur 4-11 op een log(p)-h diagram afgebeeld (raadpleeg bijlage 7.2.6 voor een duidelijkere weergave).



Figuur 4-11 Log(p)-h diagram warmtepompcyclus

Maar in eerste instantie is de toegevoerde drooglucht in de droger constant gelaten, terwijl deze bepaald is voor een conventionele droger. Omdat er een overmaat aan verse drooglucht is, kan er hier dus ook mee gevarieerd worden. Het effect hiervan kan gezien worden op figuur 4-12.



Figuur 4-12 Variatie toegevoerde drooglucht

Hierbij is te zien dat er naarmate er meer lucht gebruikt wordt met dezelfde eigenschappen (temperatuur, r.v.) er minder energie nodig is. Dit komt omdat er een overmaat aan hete droge lucht wordt geproduceerd door de condensor. Maar er hangt ook een neveneffect vast aan het gebruik van meer lucht, namelijk het percentage gecondenseerd vocht zal omlaag gaan. En dat is uiteindelijk het doel.

Tevens kan er een financieel gekeken worden naar de prestatie van een dergelijk combinatiesysteem (droger + warmtepomp) ten opzichte van een conventionele droger. Het effect van de warmtepomp is dat er minder thermische energie gebruikt moet worden. Maar daartegenover staat wel dat er elektrische energie bijkomt van de compressor. De financiële balans op basis van de energie in de situatie met een toegevoerde luchtstroom van 80.000 m³/h ziet er uit als in tabel 4-4.

<i>Conventionele droger</i>	[kW]	[J/h]	[GJ/h]	[GJ]	Kosten [€]
Warmte conventioneel	2.861,21	10.300.350.596,48	10,30	90.231,07	€ 1.046.680,43
<i>Warmtepompdroger</i>	[kW]	[J/h]	[GJ/h]	[GJ]	
Warmte	1515,37	5.455.347.837,06	5,46	47.788,85	€ 554.350,63
	[kW]		[kWh] jaarbasis	[MWh] jaarbasis	
Elektrische energie	1.047,14		9.172.979,6	9.172,98	€ 642.108,57
				Totaal	€ 1.196.459,19
				Vershil met conventioneel	€ 149.778,77

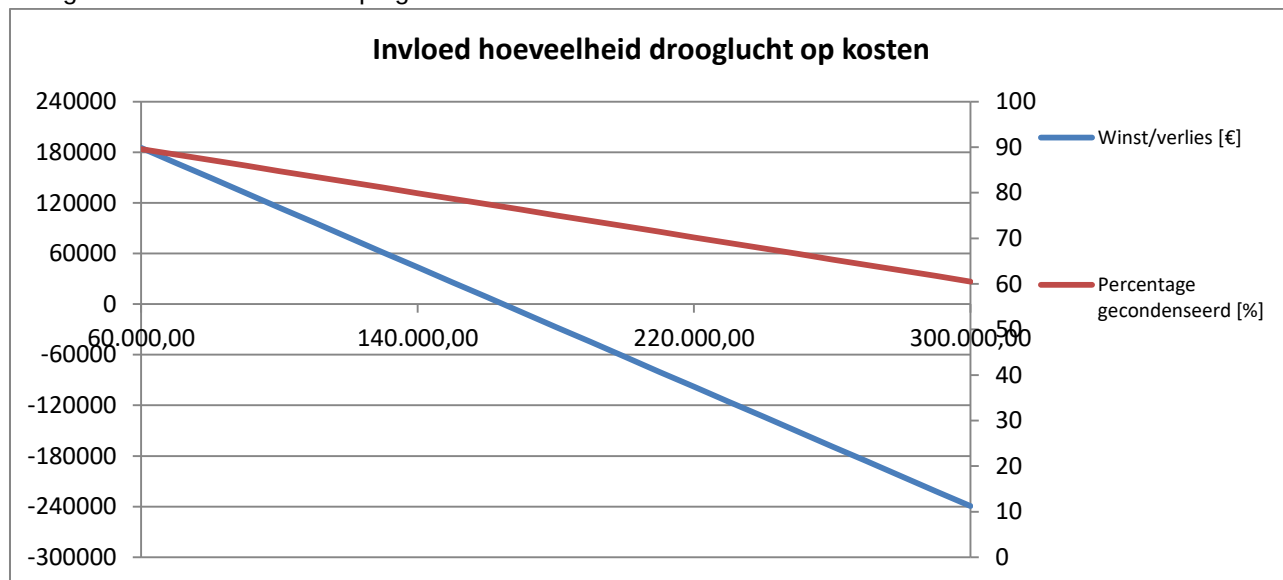
Tabel 4-4 Financiële balans op basis van energie

In tabel 4-4 zijn de randvoorwaarden van tabel 4-5 gehanteerd. De gas en elektriciteitsprijs zijn afkomstig van het CBS (Centraal Bureau voor de Statistiek).

Tabel 4-5 Randvoorwaarden bij financiële berekening

Draaiuren	8.760,00
Gasprijs [€/GJ]	11,60
Elektriciteitsprijs [€/kWh]	0,07
Drooglucht [m ³ /h]	80.000

Wanneer de toegevoerde drooglucht gevarieerd zal worden, gaat dit effect hebben op de totale energiekosten. Dit is te zien op figuur 4-13.



Figuur 4-13 Invloed hoeveelheid drooglucht op kosten

Een ruwe schatting van de aanschafkosten van de warmtepompinstallatie is als volgt opgemaakt:

Tabel 4-6 Aanschafkosten warmtepomp

Verdamper	120.000,00
Condensor	100.000,00
Compressor	300.000,00
Warmtewisselaar	50.000,00
Totaal	570.000,00

Deze kosten zijn op basis van het Dace Price Booklet Edition 32 (Dace, 32). Dit betekent wanneer de droger met 300.000 m³/h drooglucht geopereerd zal worden, de terugverdientijd (exclusief exploitatiekosten) ongeveer 2 jaar en een kwart zal zijn.

5 Discussie

In dit hoofdstuk zullen de punten besproken die tijdens het onderzoek op een bepaalde manier zijn uitgevoerd die tot discussie kunnen leiden. Deze punten kunnen onderzoeksmethodes betreffen of de interpretatie van een bepaald resultaat of de keuze voor een bepaalde oplossingsrichting.

Eerst en vooral is dit onderzoek natuurlijk over het algemeen een theoretisch onderzoek. Geen enkel resultaat is afkomstig van een werkelijke testopstelling, maar de gehanteerde gegevens komen wel uit de praktijk en zijn reëel. Hiermee zal het geproduceerde en gehanteerde Excel-model de realiteit dicht benaderen. Dit kan bevestigd worden door Synergo tot zover het over een huidig frietproces gaat.

Daarnaast is alle gebruikte theorie afkomstig uit gewaardeerde literatuur, deze literatuur is volgens de voorgeschreven methode genoteerd in de bibliografie en alsook correct verwezen in de tekst.

Vervolgens kunnen ook resultaten van het onderzoek bekritiseerd worden. Het doel van de opdracht was om de droger emissieloos te maken. Dit is bij de condensor theoretisch niet haalbaar. Wel wordt er van uit gegaan dat de geur procentueel evenveel afneemt als het gecondenseerde vocht. Dit betekent al een sterke verbetering met 90%. Bij de warmtepompdroger is het wel mogelijk om volledig te condenseren en dus volledig geurvrij te opereren. Dit kan enkel wanneer de warmtewisseling na de verdamper met de verse lucht wordt uitgeschakeld. Dan kan de uitgaande temperatuur uit de verdamper verlaagd worden tot het punt van 100% condenseren. Dit betekent wel een verhoging in compressorvermogen, en dus elektrische kosten. De volledige emissieloze warmtepompdroger kost hierdoor op jaarbasis enkel geld.

Beide oplossingsmethodes zijn er van uitgegaan het vocht in de drooglucht te condenseren. Dit gebeurt in een condensor (of een verdamper in het geval van de warmtepomp), maar het vocht bevat zetmeel. Dit zetmeel veroorzaakt de geur, maar is tevens erg hardnekkig voor vervuiling. Dit betekent dat er in acht moet genomen worden dat de warmtewisseling apparatuur voldoende schoongemaakt zal moeten worden. Een ander discussiepunt is dat bij oplossingsmethode 2 de condensor van de warmtepomp veel energie afstaat. Zoveel, dat het te veel droge hete lucht produceert. Hier zou intern moeten bekeken worden of er voor deze lucht een ander proces of voorziening kan dienen. Maar wanneer de toegevoerde lucht in de droger gevarieerd wordt zal deze overmaat aan lucht juist meer of minder worden. Deze variatie heeft dan weer invloed op het percentage gecondenseerd vocht. Dus wanneer het hoofddoel de emissieloze droger is, zal er geïnvesteerd moeten worden op jaarbasis. Daarentegen, als de installatie zichzelf moet terug verdienen zal er geaccepteerd moeten worden dat er uitstoot blijft. Wel in mindere mate weliswaar. Wat ook een invloed speelt bij de energiekosten is het feit dat de gas- en elektraprijzen niet even zwaar wegen ten op zichte van de energetische waarde.

Echter zal er aan de geurvergunning moeten voldaan worden, wat ook een schoorsteen van €300.000,- kan betekenen die niets opbrengt. Deze terugverdientijd is op basis van een ruwe schatting van de installatie kosten.

Een ander discussiepunt is de hoeveelheid water geproduceerd bij oplossingsmethode 1 (toevoeging van een condensor). Hierbij wordt zo een 98 m³/h aan warm water (lees 45°C) geproduceerd, dit is laag energetische energie en is waarschijnlijk niet te benutten.

6 Conclusies en aanbevelingen

Dit onderzoek is gestart met als doel een oplossing te vinden om emissieloos te drogen bij een frietproductieproces. Dit omdat al eerst de bakoven en vervolgens de schiller emissieloos zijn gemaakt, hierna volgt de droger als derde grootste bijdrager aan de geurproductie. Hiervoor is de volgende hoofdvraag opgesteld:

“Welke emissieloze droogmethode in een frietproductieproces is bedrijfseconomisch optimaal?”

Uit vooronderzoek bleken er twee potentiële methodes om de droger emissieloos te maken. Een belangrijk detail hierbij is dat de oplossingsmethodes additief zijn, dit wil zeggen dat deze methodes de mogelijkheid bieden om bij een bestaande frietdroger toegevoegd te worden. De twee varianten die onderzocht zijn, zijn de volgende:

1. Droger uitbreiden met condensor
2. Droger uitbreiden met een warmtepomp

Beide methodes hebben voor- en nadelen. Zo kan variant 2 wel volledig condenseren, maar dit brengt financieel niets op. In dat opzicht is variant 1 efficiënter, maar dan moet het warm water dat geproduceerd wordt wel afgenomen kunnen worden. Als het water niet afgenomen kan worden dan is een standalone unit als een warmtepomp interessanter. Bij een warmtepompdroger kunnen de droogcondities constant geregeld worden. Daarnaast heeft de warmtepompdroger potentie om zichzelf terug te verdienen, hierbij zal de hoeveelheid geuruitstoot wel weer toenemen. Maar dit kan naar wens van de gebruiker bepaald worden, ofwel een emissieloze droger met jaarlijkse kosten of een droger die minder geuruitstoot heeft en minder energie gebruikt dan de huidige drogers.

Het advies, en daarmee ook antwoord op de hoofdvraag, is dat een warmtepompdroger bedrijfseconomisch het meest optimaal is van de twee onderzochte varianten. Daar de warmtepompdroger de mogelijkheid biedt het droogproces bedrijfstechnisch naar huidige normen te laten verlopen en daarnaast een vermindering brengt in geuruitstoot van bijna 80%. Tevens is het mogelijk om energetisch winst te maken doordat er minder thermische energie in de droger benodigd is. Weliswaar komt er een extra elektrische energievrager die fors is, de compressor. Maar de som van de elektrische en thermische energie is samen minder dan de huidige droogsituatie. Deze conclusie verandert wel op het moment wanneer het warm water van variant 1 gebruikt kan worden bij derden (industrieterrein, stadsverwarming), dan zal variant 1 het best geschikt zijn.

7 Nawerk

7.1 Bibliografie

Button, K. (2015). *Processing sweet potatoes into french fries*. A report submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree, Kansas State University, Food sciences, Manhattan, Kansas.

Centraal Bureau voor de Statistiek. (sd). *Aardgas en elektriciteit, gemiddelde prijzen van eindverbruikers*. Opgehaald van Statline:
[http://statline.cbs.nl/statweb/publication/?dm=slnl&pa=81309ned&d1=0-1,5,8,12,15&d2=0&d3=0&d4=4,9,14,\(l-6\)-l&hdr=t&stb=g2,g3,g1&vw=t](http://statline.cbs.nl/statweb/publication/?dm=slnl&pa=81309ned&d1=0-1,5,8,12,15&d2=0&d3=0&d4=4,9,14,(l-6)-l&hdr=t&stb=g2,g3,g1&vw=t)

Colak, N., & Hepbasli, A. (2009). *A review of heat-pump drying (HPD): Part 2 - Applications and performance assessments*. Elsevier.

De Kleijn Energy Consulting B.V. (sd). Opgehaald van Industrial Heat Pumps:
<http://www.industrialheatpumps.nl/nl/>

Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying* (Fourth edition ed.). Boca Raton London New York: CRC Press Taylor & Francis Group.

O.Perera, C., & Rahman, M. S. (1997). *Heat pump dehumidifier drying of food*. Elsevier Science Ltd.

Perera, C., & Rahman, M. (1990). *Trends Food Science Technology*.

SGS Nederland BV. (2016). *Geuronderzoek januari 2016 Farm Frites te Oudenhorn*. Spijkenisse.

Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2009). *Introduction to Food Engineering*. Academic Press Elsevier.

Synergo. (2013, 5 29). Proces flow diagram.

Toledo, R. T. (2007). *Fundamentals of Food Process Engineering* (Third edition ed., Vol. 12 Dehydration). Athens, Georgia, USA: Springer.

Welsh Assembly Government. (sd). *Hot water on demand*. Opgeroepen op mei 2, 2017, van Applied Science: <http://www.appliedscience.org.uk/contents/?article=8>

Wikipedia. (2014, april 18). *Tripelpunt*. Opgehaald van Wikipedia:
<https://nl.wikipedia.org/wiki/Tripelpunt>

7.2 Bijlagen

7.2.1 Figurenlijst

Figuur 2-1 Aanwezige soorten van vocht	2
Figuur 2-2 verwarmingsmethodes (Welsh Assembly Government)	4
Figuur 2-3 Fase diagram (Wikipedia, 2014)	5
Figuur 2-4 Voorbeeld van een banddroger dwarsdoorsnede (Mujumdar, 2014)	6
Figuur 2-5 Schematische weergave variant 2 (Mujumdar, 2014)	6
Figuur 2-6 Voorbeeld van een transportband (Mujumdar, 2014)	7
Figuur 2-7 Gewenste productverspreiding	7
Figuur 2-8 Voorbeeld energiebalans berekening (Mujumdar, 2014)	9
Figuur 2-9 Schematische weergave warmtepomp (Mujumdar, 2014)	11
Figuur 3-1 Massabalans frietproces	13
Figuur 3-2 Massa- en energiebalans droger	13
Figuur 3-3 Schematische weergave toepassing condensor (Gommers, 2017)	15
Figuur 3-4 Schematische weergave toepassing warmtepomp (Gommers, 2017)	16
Figuur 4-1 Process Flow Diagram van de beoogde opstelling (Gommers, 2017)	18
Figuur 4-2 Schematisch overzicht werkingsprincipe warmtepomp (Gommers, 2017)	19
Figuur 4-3 Process Flow Diagram warmtepomp droogsystem (Gommers, 2017)	20
Figuur 4-4 Mollier-diagram warmtepompdroger	24
Figuur 4-5 Grafiek met verschillen in hoeveelheid koelmiddel	25
Figuur 4-6 Energieverbruik drooginstallatie met verschillende koelmiddelen	26
Figuur 4-7 Benodigde hoeveelheid verse lucht met verschillende koelmiddelen	26
Figuur 4-8 COPh van de warmtepomp bij verschillende koelmiddelen	27
Figuur 4-9 SMER van het combinatiesysteem bij verschillende koelmiddelen	27
Figuur 4-10 Multicriteria-analyse koelmiddelen	28
Figuur 4-11 Log(p)-h diagram warmtepompcyclus	28
Figuur 4-12 Variatie toegevoerde drooglucht	29
Figuur 4-13 Invloed hoeveelheid drooglucht op kosten	30
Figuur 7-1 Basisontwerp frietproductieproces (Synergo, 2013)	37
Figuur 7-2 Aardappelontvangst (Synergo, 2013)	37
Figuur 7-3 Schilproces (Synergo, 2013)	38
Figuur 7-4 Snijproces (Synergo, 2013)	39
Figuur 7-5 Blancheerproces (Synergo, 2013)	40
Figuur 7-6 Droogproces (Synergo, 2013)	40
Figuur 7-7 Frituurproces (Synergo, 2013)	41
Figuur 7-8 Koel- en vriesstap (Synergo, 2013)	41
Figuur 7-9 Kwaliteitscontrole (Synergo, 2013)	42
Figuur 7-10 Verpakkingsproces (Synergo, 2013)	43
Figuur 7-11 Blokschema opslag (Synergo, 2013)	43

7.2.2 Tabellenlijst

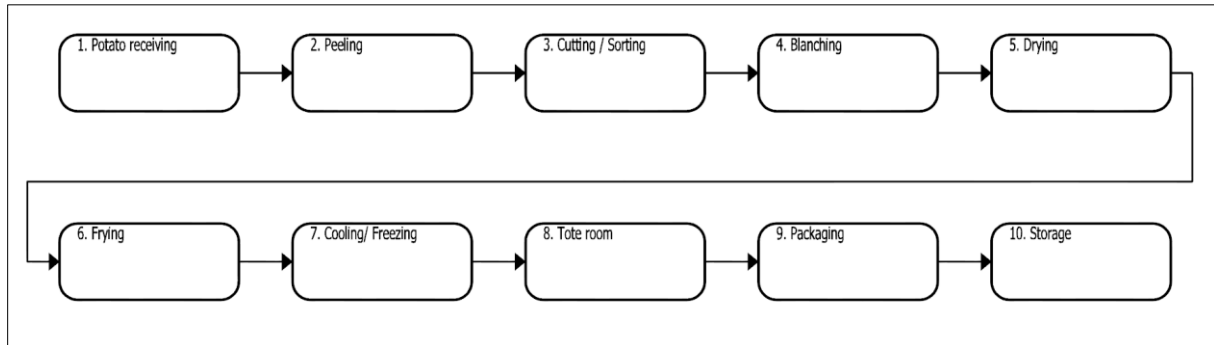
Tabel 4-1 Vergelijking droogsystemen (Perera & Rahman, 1990)	21
Tabel 4-2 Geuruitstoot frietdroger (SGS Nederland BV, 2016)	22
Tabel 4-3 Besparing aardgas bij verwarming 98m ³ /h koelwater naar 45°C	23
Tabel 4-4 Financiële balans op basis van energie	30
Tabel 4-5 Randvoorwaarden bij financiële berekening	30
Tabel 4-6 Aanschafkosten warmtepomp	31

7.2.3 Vergelijkingslijst

Vergelijking 2-1 Verdampingswarmte.....	3
Vergelijking 2-2 Volumetrische warmteoverdracht friet.....	8
Vergelijking 2-3 Opwarming friet	8
Vergelijking 2-4 Verdampingswarmte.....	9
Vergelijking 2-5 Opwarmen lucht.....	9
Vergelijking 3-1 Specifieke luchtvochtigheid	14
Vergelijking 3-2 Luchtenthalpie	14
Vergelijking 3-3 Vergelijkingen totale warmtevraag frietdroger	14
Vergelijking 3-4 Benodigde stoom.....	14
Vergelijking 3-5 Benodigd aardgas	15
Vergelijking 3-6 Koelingsenergie	15
Vergelijking 3-7 Condensatiewarmte.....	15
Vergelijking 3-8 Massastroom koelwater.....	16
Vergelijking 3-9 Hoeveelheid condensaat	16
Vergelijking 3-10 Hoeveelheid koelmiddel	16
Vergelijking 3-11 Hoeveelheid condensaat bij gebruik warmtepomp.....	17
Vergelijking 4-1 COP	20
Vergelijking 4-2 COP eerste hoofdwet	20
Vergelijking 4-3 SMER	21

7.2.4 Procesomschrijving

De afstudeeropdracht betreft een onderzoek naar de meest optimale droogmethode in een frietproductieproces, en tevens is gewenst dat deze techniek emissieloos is. Voordat er ingezoomd kan worden op het droogproces, is het van belang om het totale verwerkingsproces van aardappel tot friet te begrijpen. In figuur 2-13 is een basisontwerp te zien van een frietproces opgesteld door Synergo. In dit proces zijn 10 stappen, deze zullen als volgt verder beschreven worden.

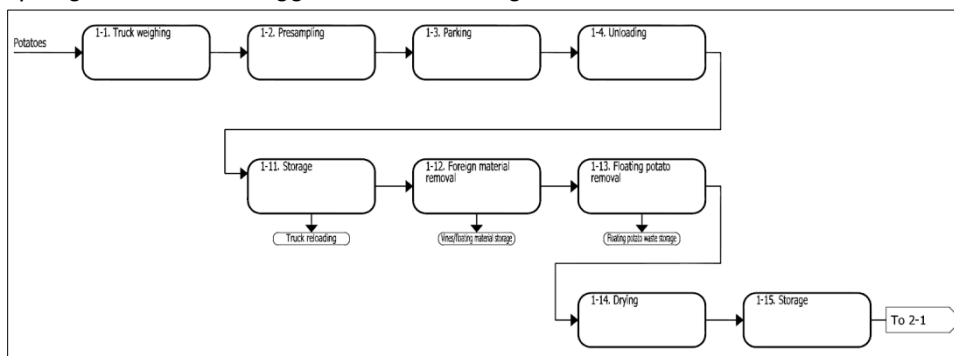


Figuur 7-1 Basisontwerp frietproductieproces (Synergo, 2013)

7.2.4.1 Aardappelontvangst

De aardappels zijn afkomstig van landbouwbedrijven die de aardappels gekweekt hebben. Deze zullen met vrachtwagens gelost moeten worden bij het proces, dit betekent dat er een logistieke uitdaging ligt om het proces te voorzien van voldoende aardappels. Als een proces bijvoorbeeld 15 ton friet per uur produceert zullen er om en nabij 30 ton aardappels per uur geleverd moeten worden, daar het rendement van een type frietproductieproces rond de 50% ligt. De verliezen die voor het rendementsverlies zorgen zullen per stap beschreven worden. Deze 30 ton betekent dat er per uur één vrachtwagen van 30 ton moeten komen. Daarom is er vaak een bunker waar een voorraad aan aardappels ligt, zodat het proces niet stil hoeft te liggen bij logistieke problemen. De aardappels die geleverd worden, zijn nog niet schoongemaakt. Dit betekent dat er nog slikresten, stenen en takken tussen zitten, wat resulteert in onbruikbare massa. De verloren massa is gemiddeld 3% van het totale gewicht wat door de vrachtwagen gelost wordt. Daarnaast heeft een aardappel als eigenschap dat het drogestof percentage heeft van 20%, de andere 80% is gebonden vocht. Bijkomend is er aanhangend vocht, dit is 3% van de totale massa van de aardappel.

De procedure van het eerste deelproces gaat zoals in figuur 2-14 te zien is. Eerst is er dus een weegmoment van de vrachtwagen, dan worden er monsters genomen van de aardappels. Deze monsters moeten de precieze samenstelling en kwaliteit van de geleverde lading aantonen. Vervolgens wordt de levering naar een tussenopslag verplaatst. Voordat de aardappels het frietproces in kunnen worden ze gezeefd, gewassen en gedroogd. Hierna komen de aardappels in een laatste opslag, waar ze klaar liggen voor bewerking.



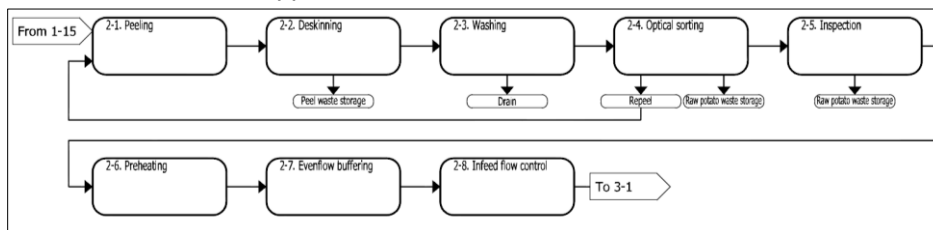
Figuur 7-2 Aardappelontvangst (Synergo, 2013)

7.2.4.2 Schillen

Het schillen heeft natuurlijk als doel om de schil van de aardappel te verwijderen, maar er zijn wel enkele randvoorwaarden, namelijk: minimaal productverlies; maximum schilverwijdering; en minimale vervuiling. Voor het schillen kunnen verschillende methodes gebruikt worden, deze zijn: stoomschillen, door gebruik van loog, door de schil er af te schuren, met behulp van messen of zelfs met vlammen. Op figuur 2-15 is een overzicht te zien van het schilproces, het schilproces begint dus met het schillen, dit wordt gedaan met behulp van stoom van 18 bar. Het is een batchproces, er worden aardappels in een vat geplaatst en het vat wordt afgesloten. Dan wordt het vat op druk gebracht met 18 bar stoom, daarna zal het vat rond de middenas draaien zodat alle oppervlakken van de aardappels in contact komen met stoom. Wanneer dit gebeurd is zal de druk er af gelaten worden met behulp van een expansievat. Door deze abrupte drukval zal de schil loskomen van de aardappel, als gevolg van spontaan koken van het vocht onder de schil. Vervolgens moeten de losse schillen afgevoerd worden, dit gebeurt bij de deskinning. De deskinner heeft borstels waar de overgebleven schillen van de aardappel geveegd worden. De volgende stap is om de geschilde aardappels te wassen. Daarna worden de aardappels optisch gesorteerd, dit is tegelijkertijd een kwaliteitscheck, dus bij niet goed geschilde aardappels zullen deze terug naar de schilstap gestuurd worden. Na de optische sorteerstap komt de inspectie stap hier worden de slechte aardappels er uit gewipt. De goede aardappels zullen na de inspectie voorverwarmd worden voor het volgende proces, namelijk het snijden.

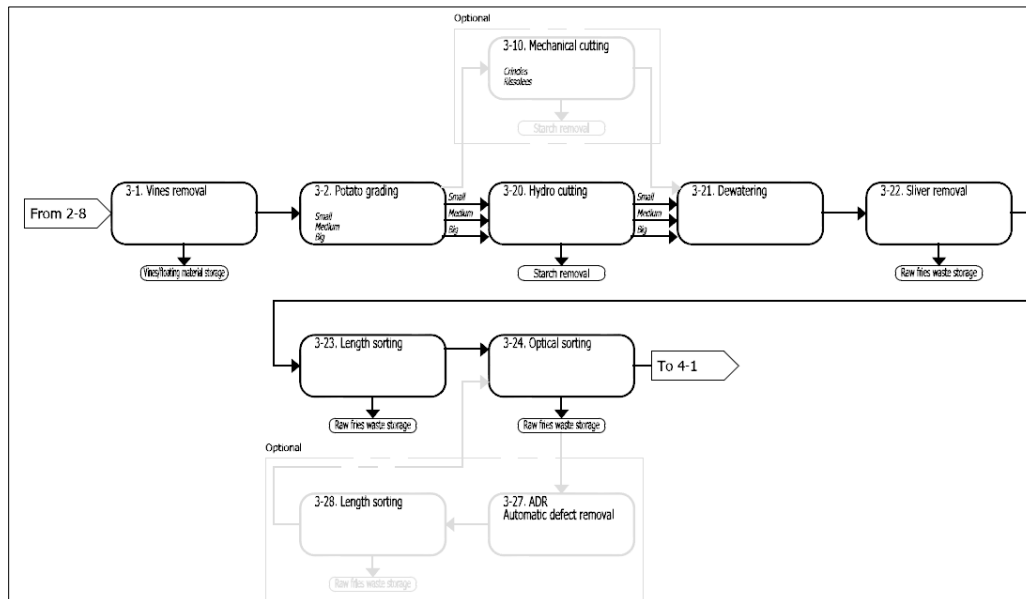
De voorverwarming vindt plaats door gebruik van stoom van 3 bar. Het doel is om de aardappel van twintig graden naar 44 °C te brengen. En het tijdsbestek hiervan is vijf minuten. De preheater is een cilindrisch vat met daarin een draaiende schroefvijzel, waarmee de aardappels verplaatst worden. De stoom zal dan water opwarmen in een warmtewisselaar van twintig naar 58 °C. Het vat zal dan voor de helft gevuld worden met het warme water, het uiteindelijke niveau zal dan door de aardappels hoger zijn.

Omdat het schilproces een batchproces is, betekent dit dus dat er geen constante aanvoer is van geschilde aardappels. Hiervoor is er een buffervat aanwezig, met daarbij een flow control. Deze flow control zal de geschilde aardappeltoevoer na het schilproces constant houden, dit resulteert in een variërend niveau aardappels in het buffervat.



Figuur 7-3 Schilproces (Synergo, 2013)

7.2.4.3 Snijden/sorteren



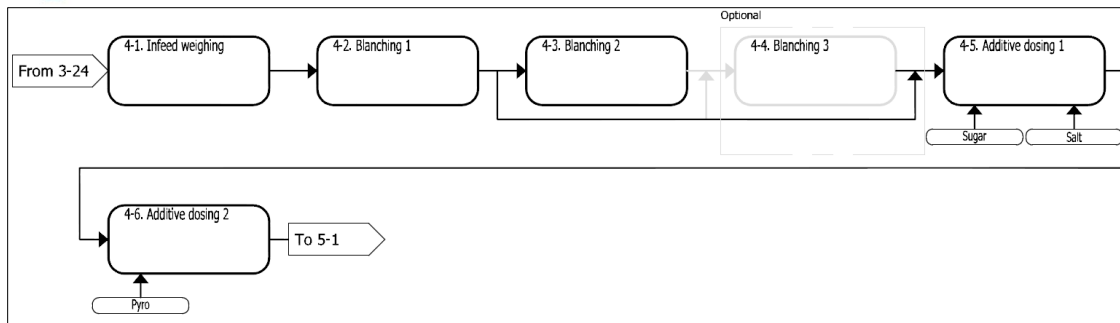
Figuur 7-4 Snijproces (Synergo, 2013)

Om van een aardappel een friet te maken, zal er gesneden moeten worden. Hiervoor wordt een waterstraalsnijtechniek gebruikt. Deze techniek is efficiënt, dat wil zeggen dat er weinig aardappel verloren gaat bij het snijden. Ook is de kans op kneuzingen van de aardappel kleiner dan bij mechanisch snijden. Maar vooraleer de aardappel gesneden wordt, zal deze gegradeerd worden. Niet elke aardappel is natuurlijk niet even groot van omvang. Vervolgens kan er gesneden worden, dit door de aardappel en omringd water door een pomp te sturen. De aardappel zal een snelheid rond de 140 kilometer per uur bereiken. Vervolgens komt er een convergerende leiding waardoor de aardappel in de lengterichting uitgelijnd is, om daarna door een messenset te vliegen. Door het gebruik van water, zal dit na het snijden weer gescheiden moeten worden. De volgende stap is het verwijderen van de snippers. Deze snippers zijn de rondingen van de aardappel die overblijven na het snijden van balkvormige frieten. De afgevoerde splinters zullen in een ander proces gebruikt worden. De friet die verder gaat in het proces zal dan gesorteerd worden op lengte. Met tenslotte een optische controle op onvolkomenheden.

7.2.4.4 Blancheren

Blancheren is een cruciale stap in het produceren van friet, het wijzigt de textuureigenschappen en zorgt voor juist een zachte of vaste beet afhankelijk van de blanchetijd en -temperatuur. Blancheren inactieveert of maakt de enzymen kapot, hierdoor zal de kleur van de friet beter behouden blijven. Na de blancheer stap, kan er zout, suiker en pyrofosfaat toegevoegd worden. Dit wordt pas na het blancheren gedaan omdat anders de enzymen gestabiliseerd worden. Het suiker en het zout zorgen voor een bepaalde smaak en wordt dus bepaald aan de hand van een recept. Het pyrofosfaat zorgt ervoor dat de friet tijdens het drogen niet een grijze tint krijgt. (Button, 2015)

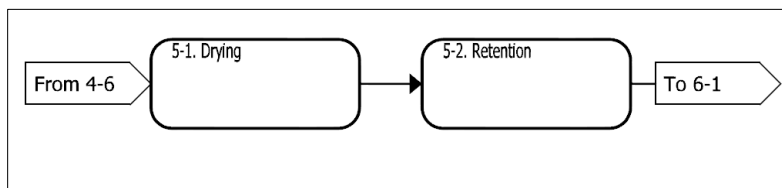
Het blancheerproces is in grote lijnen hetzelfde als de preheating van de aardappels. Dus een groot vat met daarin een schroefvijzel en als warmtemedium water om de friet te blancheren. Wel is er een verschil dat er bij blancheren twee of zelfs drie stappen aanwezig zijn. In de eerste stap wordt de friet van ongeveer vijftientig graden naar 77 gebracht. Vervolgens dienen de andere twee puur om de verblijftijd op de temperatuur van zo een 75 graden te voldoen en zo de bovengenoemde reacties te laten plaatsvinden.



Figuur 7-5 Blancheerproces (Synergo, 2013)

7.2.4.5 Drogen

Het uiteindelijke onderzoek betreft dit deelproces, het drogen. Het droogproces heeft als functie om het drogestofgehalte te verhogen met 2-4 procent, dit percentage is vastgelegd door een recept dat tot stand komt door de eisen van de klant. Drogen wordt gedaan omdat de bakoven anders een stuk groter zou moeten zijn, daar deze anders meer vocht zou moeten verdampen. Ook zal er in de bakoven minder vet opgenomen worden door op voorhand te drogen. Omdat het droogproces het hoofdonderwerp is van dit onderzoek, is er in hoofdstuk 2.1 een uitgebreide uitleg te vinden over de eigenschappen van dit proces. Verder is er na het drogen nog een retentiestap, omdat er nog warmte in de friet zit wanneer die uit de droger komt. Zal het interne vocht nog naar buiten willen, dus het verdampen zal in de retentiestap nog doorgaan. Dit betekent ook dat er wel weer aanhangend vocht zal zijn, aangezien het interne vocht naar de buitenkant treedt. Maar dit is gewenst, dit laagje beschermt de friet wanneer deze in de bakoven zal terechtkomen.

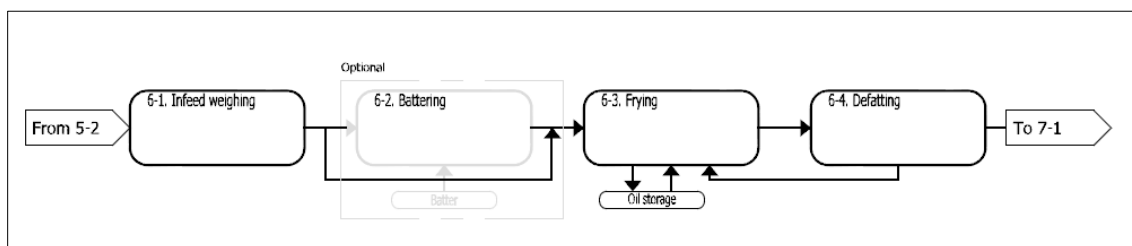


Figuur 7-6 Droogproces (Synergo, 2013)

7.2.4.6 Frituren

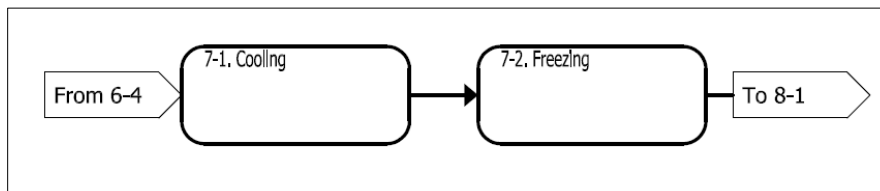
Frituren is een overbrenging van warmte met behulp van convectie in de hete olie en geleiding in het binnenste van de friet. Bij deze stap is er nog altijd vocht aanwezig, ondanks de droogstap, wanneer deze vrijgelaten wordt zal de friet olie opnemen. De olietemperatuur bepaald hoeveel vet er opgenomen zal worden. Bij lage temperaturen zal er namelijk meer olie opgenomen worden. Daartegenover zal bij hogere temperatuur een hardere korst ontstaan. De hoofdfactoren die de smaak, kleur en textuur bepalen van de gefrituurde friet zijn de volgende: het type olie, leeftijd van de olie, de grens tussen de olie en de friet, het vochtgehalte van de friet. Daarnaast hebben de voorbehandelingen als blancheren en drogen een invloed op het opnamegehalte van olie en de uiteindelijke textuur van de friet.

Voor het frituren wordt de olie op een temperatuur gehouden van 193 graden Celsius gehouden, en in de opslag bedraagt de temperatuur van de olie 65 graden Celsius. De friet gaat er in met een temperatuur van veertig graden Celsius en komt er uit met 82 graden Celsius. Dit betekend dat de verblijftijd van de friet maximaal 3 minuten mag bedragen.



Figuur 7-7 Frituurproces (Synergo, 2013)

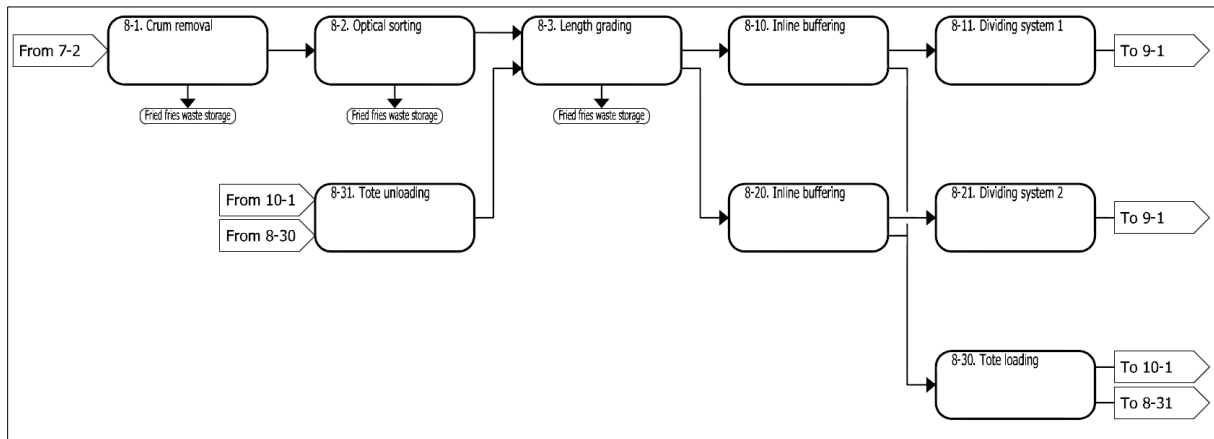
7.2.4.7 Koeling/bevriezing



Figuur 7-8 Koel- en vriesstap (Synergo, 2013)

Na het frituren zal de friet eerst gekoeld worden (zie figuur 2-20), om zo te acclimatiseren na de friturolie van 193 graden Celsius. Vervolgens zal de friet bevroren worden, dit gebeurt in twee stappen. Eerst zal de friet naar min één graden Celsius bevroren worden. Door na de eerste vriesstap nog een trilstap te introduceren kunnen klonteringen nog losgemaakt worden, deze mogelijkheid zit er nog in omdat er zo een 67 procent aan vocht in de friet aanwezig is na het frituren. Nadat de frieten losgetrild zijn van elkaar, kunnen de frieten diepgevroren worden. Het doel is om een maximum temperatuur van -18 graden Celsius te bereiken, dit heeft met wetmatige regelgeving te maken in verband met voedselgezondheid.

7.2.4.8 Kwaliteitscontrole

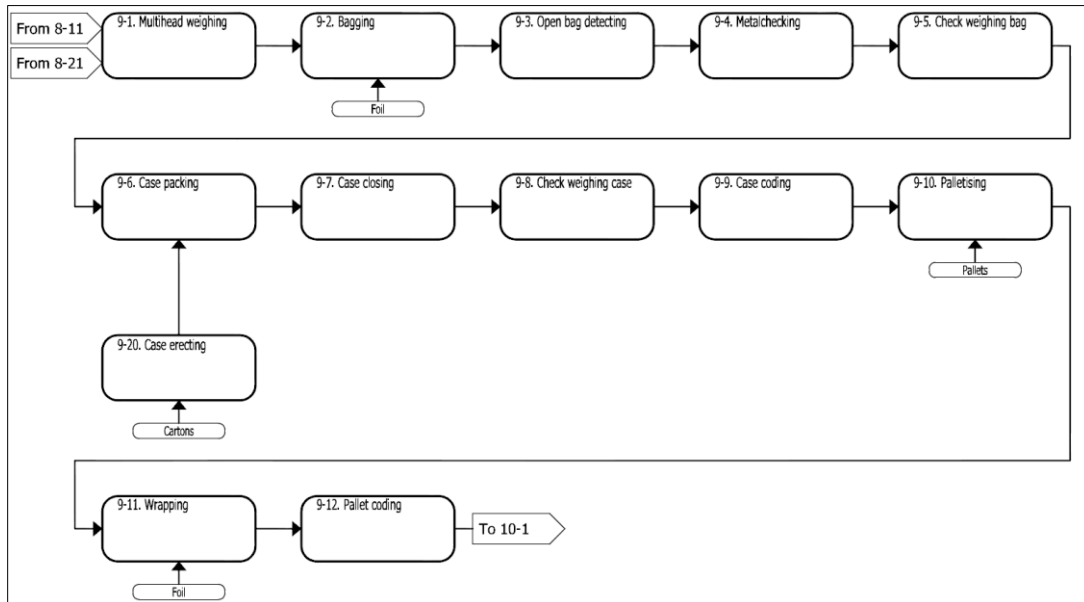


Figuur 7-9 Kwaliteitscontrole (Synergo, 2013)

De kwaliteitscontrole is de laatste stap voordat de bevroren friet verpakt gaat worden. Dus dit is de laatste kans om alle onregelmatigheden eruit te krijgen. In deze stap zijn dat vooral kruimels en harde stukjes van het frituren, of verkleuringen aan de friet zelf door bijvoorbeeld verbranding. Vervolgens zullen de frieten geklasseerd worden op lengte en zo naar bepaalde klanten gaan op basis van de wensen van de klant. Omdat een verpakkingsproces nooit dezelfde capaciteit aankan van de frietlijn, zullen de frieten opgesplitst worden over meerdere verpakkingslijnen. Het kwaliteitscontroleproces verloopt volgens figuur 2-21.

7.2.4.9 Verpakking

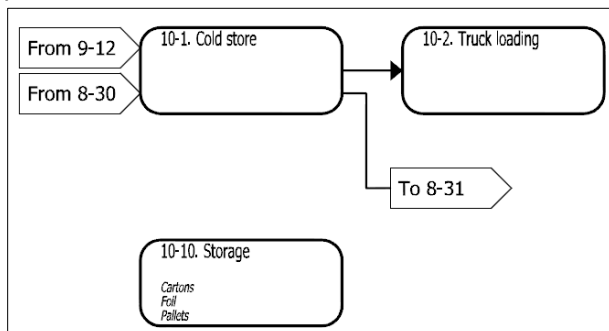
Het verpakkingsproces spreekt eigenlijk voor zich, aan de hand van figuur 2-22. Dus eerst wordt er afgewogen, vervolgens worden de zakken gevuld, waarna er enkele kwaliteitschecks uitgevoerd worden zoals controle op metaal en gewicht. Dan worden de zakken vervolgens in kartonnen dozen geplaatst, hierna volgt er weer een controle op gewicht en vervolgens wordt er gecodeerd. Dan worden de dozen gestapeld op pellets. Als een pellet vol staat zal deze ingepakt worden met folie en ook gecodeerd worden.



Figuur 7-10 Verpakkingsproces (Synergo, 2013)

7.2.4.10 Opslag

De bovengenoemde pellets van hoofdstuk 2.3.9 zullen eerst aankomen in een opslag, aangezien deze niet direct in de vrachtwagen zullen geplaatst worden. Deze opslag moet natuurlijk gekoeld zijn, om de bevroren friet zo te houden. De opslag heeft als functie om de constant geproduceerde friet tijdelijk te kunnen opslaan, aangezien het transport nooit dezelfde capaciteit heeft als een volcontinu proces.



Figuur 7-11 Blokschema opslag (Synergo, 2013)

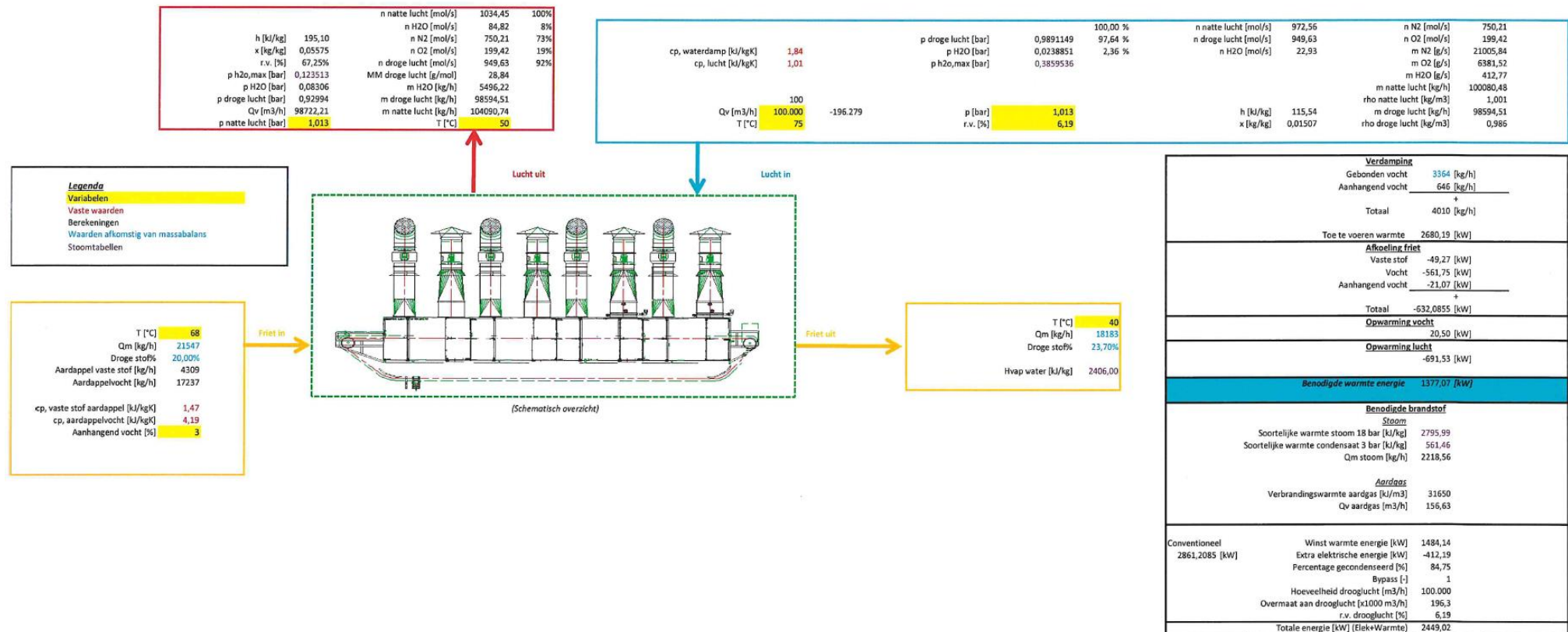
7.2.5 Tabbladen Excelmodel

7.2.5.1 Massabalans frietproces

Capaciteit	15000 kg/h
	4,17 kg/s
Ds% aardappel	20%
Gewenste ds% friet	34%

Processtappen	Δm	Drogestofgehalte	Toename vaste stof	Verliezen	m% van ontvangst	Massaverlies	Massa [kg/h]
Ontvangst					100%		28743
	Selectie	20,0%		5,0%	95,0%	1437	27306
	Grond/takken/stenen			2,5%	92,6%	683	26624
	Natte grond			0,5%	92,2%	133	26490
Schillen	Verwijdering schil	20,0%		10,0%	82,9%	2649	23841
Inspectie	Ongeschikte aardappels	20,0%		0,5%	82,5%	119	23722
Voorverwarmen		20,0%			82,5%	0	23722
Snijden	Snijverliezen	20,0%		3,0%	80,1%	712	23011
	Zetmeel verwijdering			1,0%	79,3%	230	22780
Sorteren	Sorteer verliezen	20,0%		3,0%	76,9%	683	22097
	Defect verliezen			2,0%	75,3%	442	21655
Blancheren	Productverlies	20,0%		0,5%	75,0%	108	21547
Drogen	Drogestoftoename	23,7%	3,7%	15,6%	63,3%	3364	18183
Frituren	Verdamping		5,8%	19,7%	50,8%	3575	14608
	Vetopname	29,5%	4,0%		53,9%	-879	15487
Vriezen	Toename drogestofgehalte	33,5%	0,5%	-1,5%	53,1%	-228	15259
Verpakken	Sorteer verliezen	34,0%		1,5%	52,3%	229	15030
	Veiligheidsmarge			0,2%	52,2%	30	15000

7.2.5.2 Massa- en Energiebalans droger



7.2.5.3 Massa- en Energiebalans warmtepompdroger (HPD)

HPD regeling	
Temperatuur	80 °C
Compressor vermogen	973,65 [kW]
Condensor vermogen	-3850,519 [kW]
Geschat oppervlak	214,59 [m ²]
COPh	SMER
3,954711	4,118768

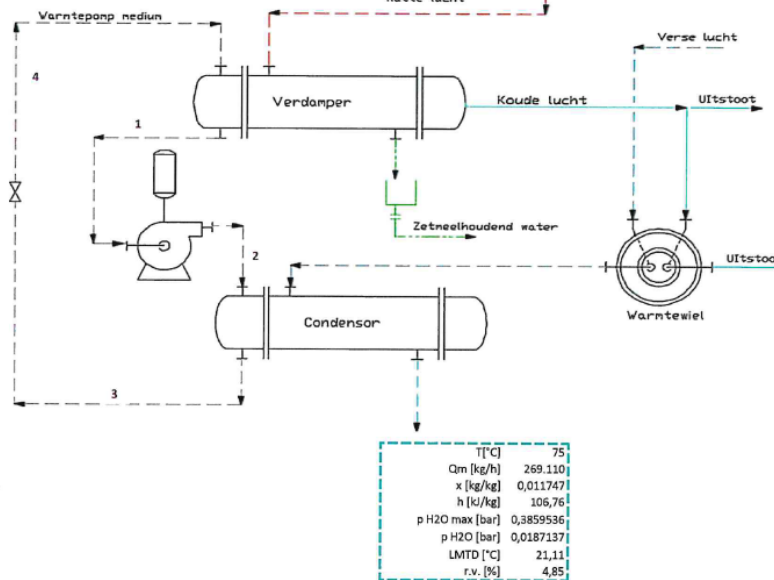
Bypass 1

h [kJ/kg]	271,8083	n natte lucht [mol/s]	596,80	100%
x [kg/kg]	0,085315	n H ₂ O [mol/s]	71,77	12%
r.v. [%]	0,98629	n N ₂ [mol/s]	414,77	69%
p h ₂ O,max [bar]	0,123513	n O ₂ [mol/s]	110,26	18%
p H ₂ O [bar]	0,121819	n droge lucht [mol/s]	525,03	88%
p droge lucht [bar]	0,891181	MM droge lucht [g/mol]	28,84	
Qv [m ³ /h]	56954,97	m H ₂ O [kg/h]	4650,59	
p natte lucht [bar]	1,013	m droge lucht [kg/h]	54510,50	
		m natte lucht [kg/h]	59161,08	
		T [°C]	50	

Warmtepomp		Koelmiddel: NH ₃ R717						
p [bar]	T [°C]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	v [m ³ /kg]	x	m [kg/s]		
1	6,186	10	1470,26	5,485	0,20412	1	2,600	
2	13,565	65,07	1578,18	5,485	0,1107	n/a	2,600	
3	13,565	35	363,64	1,558	0,00172	0	2,600	
4	6,186	10	363,64	1,578	0,02087	0,095	2,600	
Q _{toe} (4-1) [kW] 2876,864948								
P comp (1-2) [kW] 280,5581548								
Q _{af} (2-3) [kW] -3157,4231								
COP 11,25407709								
SMER 14,29384147								

Warmtepomp		Koelmiddel: NH ₃ R717						
p [bar]	T [°C]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	v [m ³ /kg]	x	m [kg/s]		
1	6,186	10	1470,26	5,485	0,20412	1	2,998	
2	29,518	129,44	1704,83	5,485	0,05977	n/a	2,998	
3	29,518	65	510,66	2,004	0,00189	0	2,998	
4	6,186	10	510,66	2,095	0,04514	0,338	2,998	
Q _{toe} (4-1) [kW] 2876,864948								
P comp (1-2) [kW] 703,2369851								
Q _{af} (2-3) [kW] -3580,10193								
COP 5,090889713								
SMER 5,702563819								

Warmtepomp		Koelmiddel: NH ₃ R717						
p [bar]	T [°C]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	v [m ³ /kg]	x	m [kg/s]		
1	6,186	10	1470,26	5,485	0,20412	1	3,274	
2	41,597	161,188	1767,68	5,485	0,04544	n/a	3,274	
3	41,597	80	591,47	2,231	0,00201	0	3,274	
4	6,186	10	591,47	2,384	0,05866	0,282	3,274	
Q _{toe} (4-1) [kW] 2876,864948								
P comp (1-2) [kW] 973,6537432								
Q _{af} (2-3) [kW] -3850,51869								
COP 3,95471051								
SMER 4,118767905								



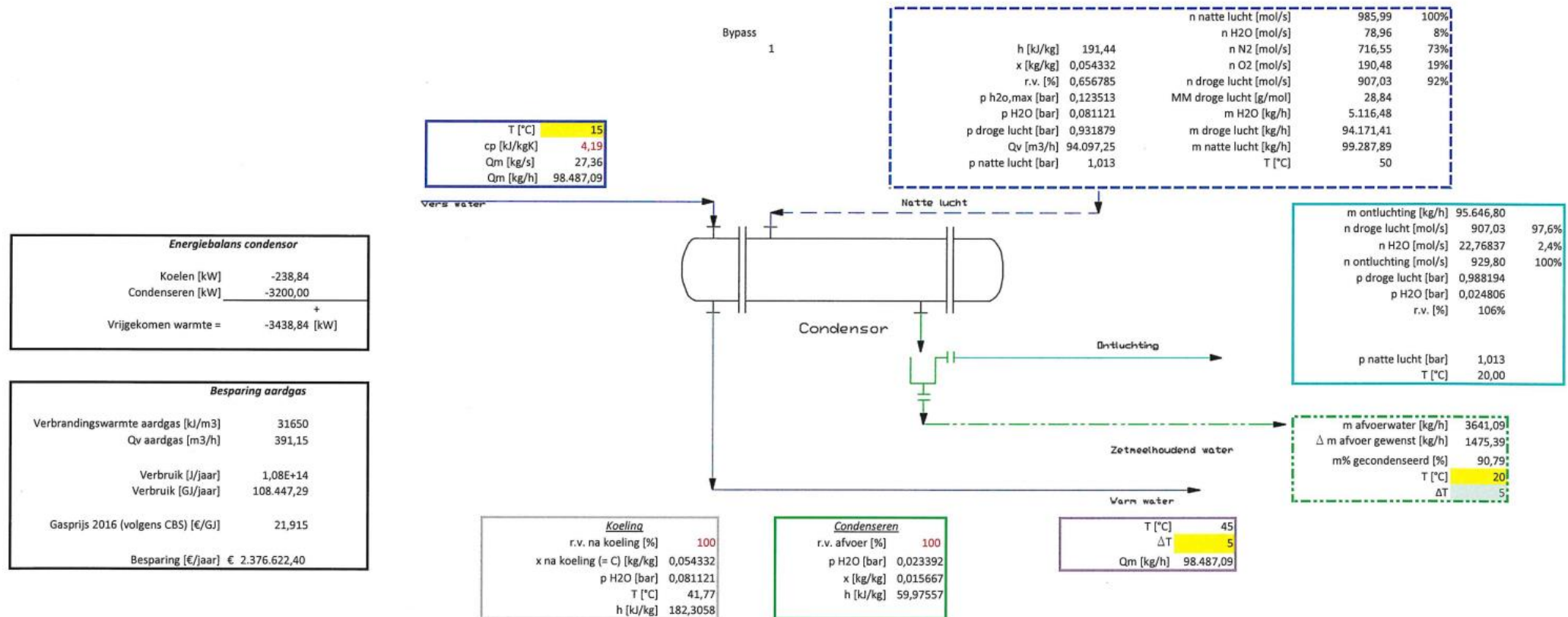
T [°C]	20	r.v. [%]	80	p droge lucht [bar]	0,994286282	x [kg/kg]	0,011746971
Qm [kg/h]	269,110	p H ₂ Omax [bar]	0,023392148	p H ₂ O [bar]	0,018713718		

Koeling		Condenseren	
T [°C]	25	r.v. na koeling [%]	100
LMTD [°C]	25,49	x na koeling [kg/kg]	0,0853154
Qkoeling [kW]	-4,91	p H ₂ O [bar]	0,1218193
Qcondenseren [kW]	-2871,9541	T [°C]	49,72
Qverdamp [kW]	-2876,86	h [kJ/kg]	271,48393
Geschat oppervlak [m ²]	132,79		

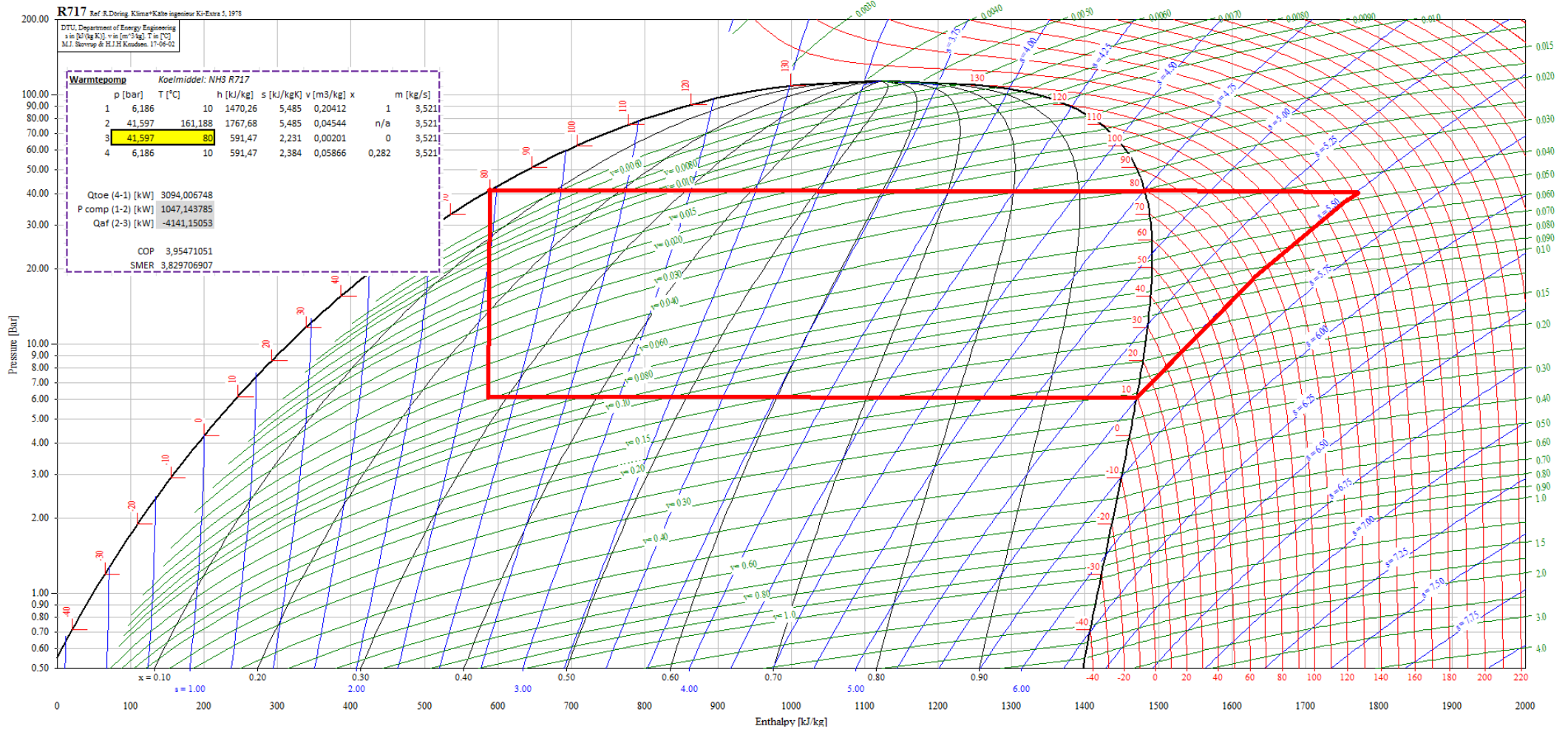
Warmtewiel		Koud		Vers	
		in	uit	in	uit
T [°C]		25	21	20	24
m [kg/h]	59,161,08	59,161,08	295,811,18	295,811,18	
h [kJ/kg]	271,80826	65,481345	50,02	54,15	
x [kg/kg]	0,0221991	0,0174253	0,011746971	0,011746971	
Bypass koude lucht		0,1			

Zetneelhoudend water	
m afvoerwater [kg/h]	3440,50
Δ m afvoerwater [kg/h]	569,75
m% gecondenseerd [%]	85,79
m% gecondenseerd bypass [%]	73,97993

Ingaande lucht condensor	
r.v. [%]	62,67923
p H ₂ Omax [bar]	0,0298563
p H ₂ O [bar]	0,0187137
p droge lucht [bar]	0,9942863
p natte lucht [bar]	1,013
stel 1m ³ [m ³]	1
n natte lucht [mol/m ³]	41,02447
n droge lucht [mol/m ³]	40,266602
n H ₂ O [mol/m ³]	0,7578681
Qv [m ³ /h]	251,769,11
rho natte lucht [kg/m ³]	1,174930416
rho droge lucht [kg/m ³]	1,161,288791
rho H ₂ O [g/m ³]	13,6416254



7.2.6 Warmtepompcyclus op log(p)-h diagram



7.2.7 Mollier-diagram warmtepompdroger

