

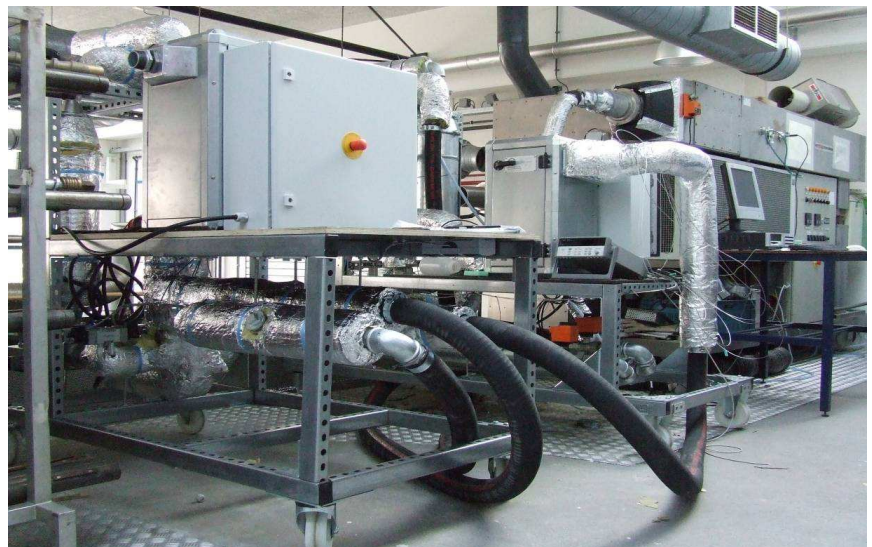
Openbare

Eindrapportage CADEX

Coupled Adsorption-Dryer Exchange

Openbaar vanaf
juni 2009

A.J.B. van Boxtel
R.M.H. Vos
P.V. Bartels



WAGENINGEN UNIVERSITEIT
AGROTECHNOLOGIE EN
VOEDINGSWETENSCHAPPEN

Openbare

Eindrapportage CADEX

Coupled Adsorption-Dryer Exchange

Project: NEOT 01005

Dr.ir. A.J.B. van Boxtel (Wageningen Universiteit)

Ir. R.M.H. Vos (Ebbens Engineering Ingenieursbureau)

Dr.ir. P.V. Bartels (WUR A&F)

Openbaar vanaf juni 2009

“Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, regeling EOS: Nieuw Energieonderzoek, uitgevoerd door SenterNovem.”

Voorwoord.

Dit NEO-project is onderdeel van langer lopend onderzoek naar technologie voor energiezuinig drogen met zeoliet aan de Wageningen Universiteit. De basisideeën voor dit onderzoek naar energiezuinige droogtechnologie zijn afkomstig van prof.dr.ir. J.P.M. Sanders (WU) en dr.ir. P.V. Bartels (WUR A&F). Gezien de complexiteit van het probleem, de vereiste rekenkundige ondersteuning, en de beschikbare expertise wordt dit onderzoek in de Systems and Control Group van Wageningen Universiteit uitgevoerd door dr.ir. A.J.B. van Boxtel, ing. C.J. van Asselt en prof.dr.ir. G. van Straten.

In 2005 en 2006 werkte M. Djaeni MSc op basis van een beurs van de Diponegoro Universiteit (Semarang, Indonesië) in de Systems and Control Group van Wageningen Universiteit aan het project. De ontwikkelingen in het project bleken zo beloftevol dat SenterNovem een subsidieaanvraag in het kader van NieuwEnergieOnderzoek (NEO) honoreerde.

Het onderzoek is aangevraagd en uitgevoerd door:

- Systems and Control Group van Wageningen Universiteit
- Ebbens Engineering Ingenieursbureau uit Lochem
- WUR A&F, Wageningen

Dit is het samenvattende openbare verslag van de activiteiten die binnen het NEO-project zijn uitgevoerd. In de literatuurlijst is een lijst van gepubliceerde verslagen en presentaties opgenomen. Tevens wordt daar verwezen naar het proefschrift van M. Djaeni. Elektronische versies van de verslagen en het proefschrift zijn verkrijgbaar bij dr.ir. A.J.B. van Boxtel (ton.vanboxtel@wur.nl) of bij de bibliotheek van Wageningen Universiteit (<http://library.wur.nl/desktop/services/helpdesk.html> , tel 0317 484440, fax 0317 484761).

Samenvatting

Voorafgaand aan dit project is in onderzoek door Wageningen Universiteit en Research Centrum het concept van meer-traps adsorptiedrogen met zeoliet ontwikkeld. Lucht nodig voor drogen wordt ontvochtigd met zeoliet, en lucht die een droger verlaat wordt na ontvochtiging met zeoliet opnieuw gebruikt voor drogen in een volgende droogstap. Door warmteterugwinning gebaseerd op procesintegratie kan bij meer-traps drogen energie op zeer efficiënte wijze worden hergebruikt.

Op basis van berekeningen was voorspeld dat de energie efficiëntie bij drogen verbeterd kan worden van 55-65% voor conventionele droogtechnologie tot 85-90% in een meer-traps droger en in speciale gevallen zelfs tot 120%.

Het doel van dit NEO-project betrof de validatie van het concept van meer-traps drogen door middel van experimenten en modelberekeningen die gebaseerd zijn op experimentele resultaten.

Voor het onderzoek is door Ebbens Engineering Ingenieursbureau eerst een experimentele een-traps installatie en vervolgens een twee-traps drooginstallatie ontwikkeld. Door een PhD-student van Wageningen Universiteit zijn diverse experimenten aan deze installaties in de laboratoria van WUR A&F uitgevoerd. Daarnaast zijn door dezelfde PhD-student diverse berekeningen uitgevoerd om inzicht te krijgen in het effect van de operationele condities op de energie efficiëntie en om het ontwerp te verbeteren.

Het onderzoek toont op basis van de experimentele resultaten zonder meer aan dat met een meer-traps systeem de voorspelde energiebesparingen kunnen worden behaald. Verder blijkt dat door een goede keuze van de operationele condities in een twee-traps installatie een energie efficiëntie van 85% haalbaar is. Voor een conventionele droger is onder vergelijkbare condities de energie efficiëntie 52%.

Deze stap in energie efficiëntie verbetering kan voortgezet worden naar het drogen in meerdere trappen waarbij een 30-50% lager energieverbruik kan worden gerealiseerd.

De energiebesparingen die met een meer-traps adsorptiedroger met zeoliet in de voedings- en genotmiddelenindustrie behaald kunnen worden liggen in de range $2.4-4 \times 10^{15}$ J en de reductie van de CO₂-uitstoot is 4-6% van de gehele sector.

Het onderzoek heeft tot promotie aan Wageningen Universiteit geleid, diverse gepubliceerde artikelen, en is gepresenteerd op verschillende congressen. Contacten met potentiële gebruikers van de technologie verlopen positief en er is serieuze belangstelling. Door het onderzoeksteam is daarom een stappenplan naar de toepassing geformuleerd.

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Samenvatting	2
Inhoudsopgave	3
1 Inleiding	4
2 Doelstelling	5
3 Projectgegevens en contactpersonen	6
4 Werkwijze en resultaten	7
5 Afwijkingen van het projectplan	12
6 Implementatietraject	13
7 Betekenis voor de doelstellingen energieonderzoek in Nederland	14
8 Conclusies en aanbevelingen	16
Openbare publicaties	17

Voor drogers die werken met luchtinlaattemperaturen in de range 60-90°C is de efficiëntie lager dan 55-65% (waarde afhankelijk van luchttemperatuur) en bij lagere droogluchttemperaturen is de efficiëntie nog lager. Berekeningen aan een meer-traps droger gaven aan dat bij het gebruik van alleen warmtewisselaars voor energierugwinning efficiëntie waarden in de range van 85-90% gehaald kunnen worden en bij toepassing van een compressor zelfs 115-120%¹.

Deze efficiëntiewaarden betekenen dat het energieverbruik 30-50% beneden het niveau van conventionele drogers komt. Dit is een grote stap in energiebesparing bij drogen en daarbij zal de CO₂-uitstoot door verbranding met een gelijk percentage dalen.

Het concept van meer-traps adsorptiedrogen met zeoliet is op basis van massa- en energiebalansberekeningen tot stand gekomen. Dit project heeft het doel om de werking van het systeem en te bereiken energiebesparingen aan te tonen.

2 Doelstelling

Aantonen van de potentiële energiebesparing die behaald kan worden met meer-traps adsorptiedrogen voor droogluchttemperaturen tussen 50-90°C door het uitvoeren van experimenteel onderzoek en op experimentele gegevens gebaseerde modelberekeningen.

¹ Bij drogen verandert de energieinhoud van de lucht niet! Voelbare warmte wordt omgezet in latente warmte. Als voelbare warmte en latente warmte in de lucht die de droger verlaat teruggewonnen worden daalt het energieverbruik. Dit heeft tot gevolg dat in de definitie voor efficiëntie de waarde onder de breukstreep kleiner wordt dan die boven de breukstreep en wordt een efficiëntie van meer dan 100% gehaald. Waarden hoger dan 100% zijn alleen mogelijk bij zeer efficiënte warmterugwinning.

3 Projectgegevens en contactpersonen

Het onderzoek is uitgevoerd door:

- Systems and Control Group
Wageningen Universiteit, Wageningen
Dr.ir. A.J.B. van Boxtel, prof.dr.ir. G. van Straten, prof.dr.ir. J.P.M. Sanders, M.Djaeni
MSc., ing. C.J. van Asselt.
- Ebbens Engineering Ingenieursbureau BV, Lochem
Ir. R.M.H. Vos, ing. H.J. ter Stege
- WUR A&F, Wageningen
Dr.ir. P.V. Bartels

Projectperiode: 01-03-2007 tot 28-02-2009

Voor verdere informatie kan contact worden opgenomen met

dr.ir.A.J.B. van Boxtel
Systems and Control Group,
Wageningen Universiteit
Postbus 17, 6700 AA Wageningen
Bornsesteeg 59, 6708 PD Wageningen
0317-484955/482124
ton.vanboxtel@wur.nl

en met

ir. R.M.H. Vos
Ebbens Engineering Ingenieursbureau
Postbus 249, 7240 AE Lochem
Hoeflingweg 8, 7241 CH Lochem
0573 250777
robvos@ebbens.nl

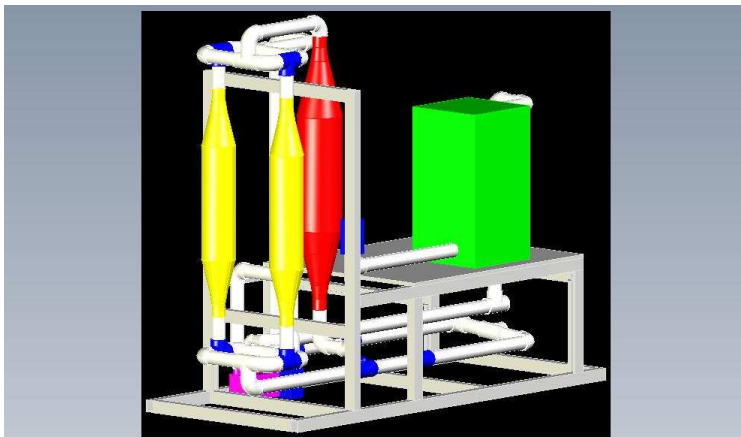
4 Werkwijze en resultaten

Het project omvatte de volgende stappen

- A1. Technische realisatie, experimentele toetsing en energie efficiëntie analyse van een een-traps installatie
- A2. Technische realisatie, experimentele toetsing en energie efficiëntie analyse van een twee-traps installatie
- B1 Modelling van ruimtelijke vocht- en temperatuurgradienten om limiteringen in vocht- en warmtetransport in het systeem te achterhalen
- B2. Een analyse van de mogelijkheden voor procesregeling.
- C. Rapportage

- A1. Door de 3 partners is het programma van eisen van de een-traps installatie vastgesteld. Er is gekozen voor een systeem waarin lucht ontvochtigd wordt met twee kolommen die elk een zeolietbed bevatten. Deze kolommen worden afwisselend gebruikt voor adsorptie en regeneratie.

Ebbens Engineering Ingenieursbureau heeft deze installatie gerealiseerd (zie figuur 1 en 2), en door WU is de besturing van de installatie en de userinterface tot stand gebracht (zie figuur 3).



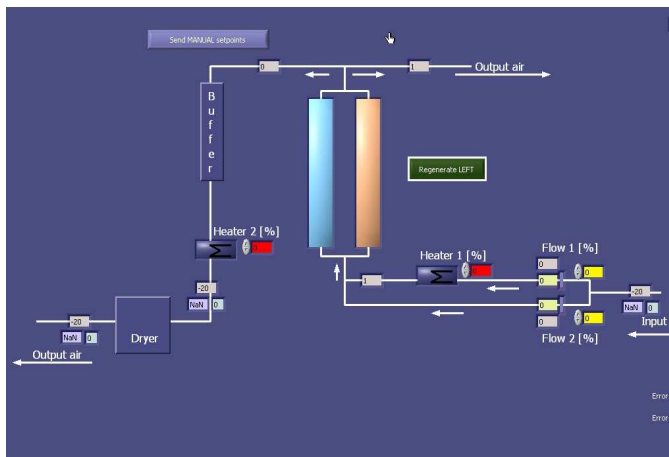
Figuur 1: Ruimtelijke designtekening voor de een-traps installatie



Figuur 2: Ontwikkelde een-traps installatie

In de proefhal van WUR A&F zijn diverse experimenten met de pilot-installatie uitgevoerd. Op basis van de experimenten is de energie efficiëntie bepaald en vergeleken met de voorspellingen uit het voorafgaande onderzoek. Samenvattende resultaten voor verschillende cyclustijden zijn in tabel 1 gegeven. De experimenteel gevonden waarden en de voorspellingen liggen dicht bij elkaar, en geven aan dat de voorspelde energie efficiëntie inderdaad behaald kan worden door het ontvochtigen van de lucht.

Verder zijn de experimentele meetwaarden gebruikt om de nauwkeurigheid van de karakteristieke modelparameters te verbeteren. Op basis van deze modelcalibratie is extrapolatie naar andere werkomstandigheden uitgevoerd.



Figuur 3: Userinterface voor de besturing van de een-traps installatie

De opstelling bleek het beste te functioneren bij gelijke luchtdebieten voor de adsorber en regenerator. Dit hangt samen met het afwisselend gebruik van de kolommen voor adsorptie en regeneratie. Door gebruik te maken van het gecalibreerde model en het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse bleek dat bij een geoptimaliseerde verhouding van luchtstromen voor adsorptie en regenereren een energie efficiëntie van 72-74% haalbaar is. Een conventioneel droogstelsel heeft onder vergelijkbare omstandigheden maximaal een energie efficiëntie van 52%.

Tabel 1: Gemeten en voorspelde efficiëntie van de een-traps adsorptiedroger

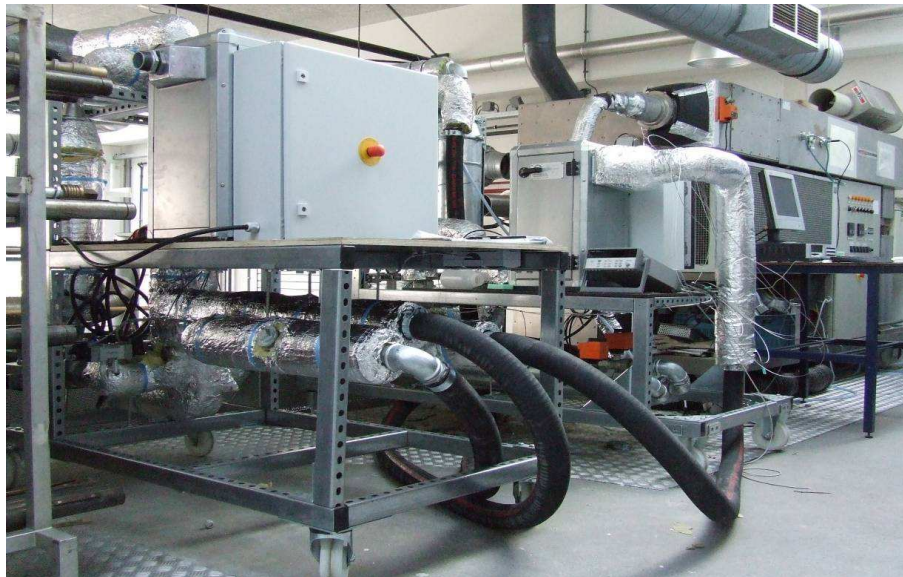
Cyclus tijd (min)	Efficiëntie (%)		
	Experimenteel	Model	Optimaal
30	50.4	53.20	72-74%
45	52.7	53.90	
60	53.9	54.80	

- A2. Op basis van de ervaringen met de een-traps installatie is door Ebbens Engineering Ingenieursbureau een tweede trap gerealiseerd. Deze is min of meer een kopie van de eerste trap en is naast het al beschikbare een-traps systeem geplaatst. Verder is het leidingwerk aangepast (figuur 4 geeft de installatie weer). In deze twee-traps installatie is geen compressor toegepast (zie sectie 6 van dit verslag). Voor dit gecombineerde systeem is een meet- en besturingssysteem ontwikkeld.

In de proefhal van WUR A&F zijn diverse experimenten met deze installatie uitgevoerd en de resultaten zijn samengevat in tabel 2.

Tabel 2: Gemeten en voorspelde efficiëntie van de twee-traps adsorptiedroger

Cyclus tijd (min)	Efficiëntie (%)		
	Experimenteel	Model	Optimaal
30	63.6	65.8	
45	64.9	65.9	79-80%
60	64.3	65.9	



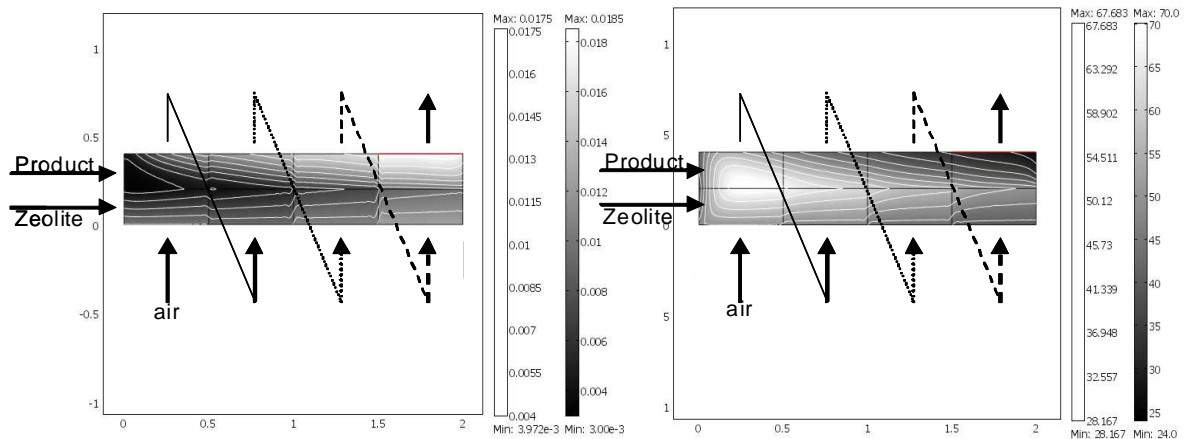
Figuur 4: Ontwikkelde twee-traps installatie

De experimentele resultaten leiden tot de volgende conclusies:

1. de modelberekeningen geven een goede voorspelling van de meetresultaten, daarom is het model een betrouwbare tool voor het berekenen van de efficiëntie in een droger,
2. in een meer-traps systeem neemt de efficiëntie belangrijk toe, waarmee de betekenis van meer-traps drogen voor energie efficiëntie is aangetoond.

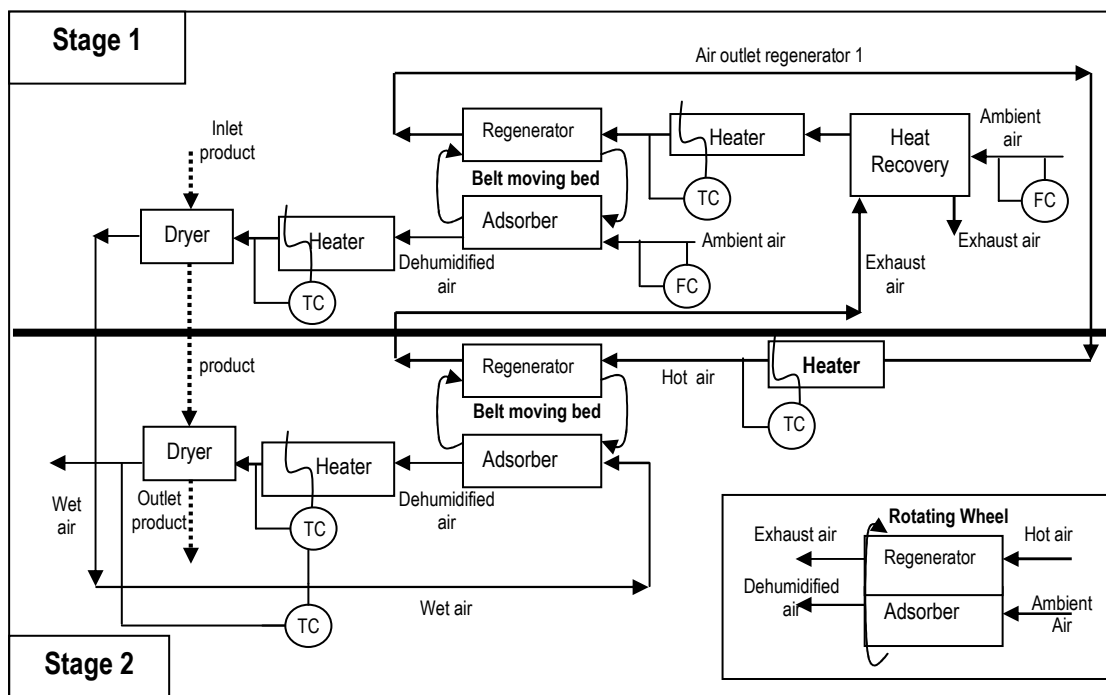
In het twee-traps systeem zijn net zoals in het een-traps-systeem gelijke luchtstromen voor adsorptie en regeneratie toegepast. Berekeningen met het model geven aan dat bij een aangepaste verhouding tussen de luchtstromen met het twee-traps systeem een efficiëntie van 85% mogelijk is. Dit betekent dat het energieverbruik in dit geval 40% beneden het niveau ligt van een conventioneel systeem dat onder vergelijkbare omstandigheden een efficiëntie van 52% bereikt.

- B1. Een CFD-programma is ontwikkeld om de temperatuur en vochtverdeling in de afzonderlijke delen van de installatie te berekenen. Uit deze resultaten zijn conclusies getrokken over de vereiste omvang van de droger. Zo blijkt ondermeer dat de standaard afmetingen van de regenerator te royaal zijn en op zijn minst gehalveerd kunnen worden of dat met een veel lagere luchtstroom voor regeneratie kan worden volstaan. Dit bevestigt de bevindingen bij onderdelen A1 en A2.



Figuur 5: Ruimtelijke verdeling van vochtgehalte (links) en temperatuur (rechts) in de drooglucht van een installatie met vier secties. Product en zeoliet stromen gaan van links naar rechts door de installatie, lucht van onder naar boven. Lucht die een sectie verlaat wordt ingevoerd in de volgende sectie

B2. Voor de procesregeling van een twee-traps systeem is een analyse uitgevoerd om een basis regelschema op te stellen. Uit de analyse en het schema blijkt dat de procesregeling geen bijzondere complicaties met zich meebrengt en dat ze met standaard technologie kan worden gerealiseerd. De mate waarin regelkringen op elkaar inwerken is afhankelijk van het ontwerp van de installatie. Door een juiste keuze van het ontwerp kan de interactie ontkoppeld worden.

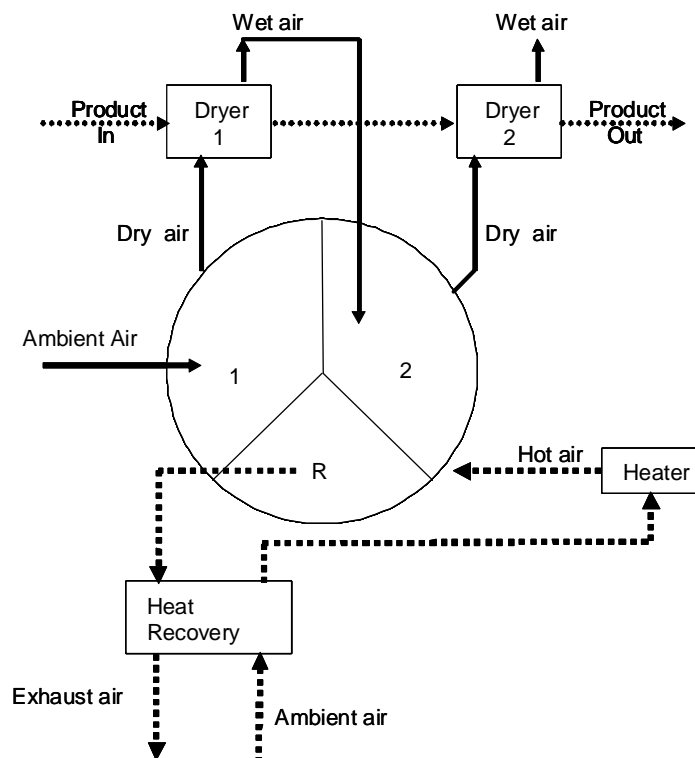


Figuur 6: Regelschema voor een twee-traps adsorptiedroger. In dit voorbeeld is een band systeem voor zeoliet transport aangegeven, maar dat kan vervangen worden door een roterend wiel (zie inzet).

- C. Samen met de studie die voorafging aan de uitvoering van dit project heeft dit project diverse rapporten opgeleverd. Zie literatuurlijst.

Op basis van de inzichten van fase A1, A2 en B1 zijn conclusies getrokken over de aan te bevelen uitvoeringen van het systeem. Een roterend wiel waarin zeoliet is aangebracht is de meest kansrijke uitvoering (zie figuur 7). Daarnaast zijn voorstellen gedaan voor andere systemen waarin zeoliet wordt getransporteerd via een band of schroef, of waarin adsorptie en regeneratie in twee elkaar afwisselende kolommen plaatsvindt.

In een afsluitende beschouwing is een economische evaluatie van het systeem uitgevoerd. De economische waarde van CO₂-uitstoot is in deze berekeningen opgenomen. Voor de besparingen (90% energie en 10% CO₂-uitstoot) voor een kleine tot middelgrote droger bedragen in de orde grootte van 50-60k€/jaar en daarmee is een terugverdientijd van de investeringen door energiebesparing binnen 1-2 jaar zonder meer mogelijk.



Figuur 7. Schematische weergave uitvoering van een twee-traps droger met roterend wiel met zeoliet.

5 Afwijkingen van het voorgestelde onderzoeksplan

Op twee punten is afgeweken van het projectplan:

- Energieverlies in de installatie. De installatie bestond uit twee kolommen die afwisselend gebruikt werden voor ontvochtigen van lucht door adsorptie en voor regeneratie van zeoliet, en een droger. Bij experimenten bleek dat na wisseling van de adsorber en regeneratie functies een niet te verwaarlozen deel van de energieinhoud van de luchtstroom door de pilot plant opgenomen werd of vrijkwam door het opwarmen/afkoelen van de metalen wanden en appendages in de installatie. Als gevolg daarvan was de energiebalans, op basis waarvan de energie efficiëntie werd berekend, niet sluitend. Door de droger bij relatief hoge luchtstromen te bedienen kon dit effect beperkt blijven. Nadeel was dat, om fluïdisatie te voorkomen, de experimentele toetsing in een kleinere range voor de luchtdebieten heeft plaats gevonden. Dit probleem is kenmerkend voor pilot-installaties waar een naar verhouding kleine hoeveelheid product behandeld wordt en een grote massa metaal aanwezig is. Voor industriële installaties is dit probleem meestal niet aanwezig door een totaal andere verhouding tussen luchtstroom en metaalmassa. De ervaringen hebben ook geleid tot de aanbeveling om de te ontwikkelen industriële installaties uit te voeren met een wielsysteem dat continu functioneert waardoor de dynamiek van wisseling tussen adsorptie en regeneratie achterwege blijft.
- In het onderzoeksvoorstel was het gebruik van een compressor in het warmteterugwinningssysteem opgenomen. Dit onderdeel bleek niet haalbaar in de pilot-plant waarin de adsorber- en regeneratiefunctie worden afgewisseld. Als gevolg daarvan varieerde het vochtgehalte in de regenerator uitlaat te sterk voor een goed en stabiel functioneren van een compressor. Dit inzicht heeft eveneens geleid tot de aanbeveling om een continu werkend systeem zoals een wiel te gebruiken.

6 Implementatietraject

In een discussie binnen het projectteam is de volgende implementatiestrategie vastgesteld.

- Kansrijke toepassingsmogelijkheden zijn: drogen van zaden, kruiden, fruit, enzymen, farmaceutische producten, kaas en papier. Verder zijn er mogelijkheden voor wasserijen en luchtconditionering.
- Meer-traps adsorptiedrogen met zeoliet inzetten bij nieuwe technologie zoals bij het verwerken van door algen geproduceerde producten.
- Kleine tot middelgrote schaal toepassingen hebben de voorkeur als eerste projecten. Grote schaal applicaties volgen later als er een goede track-record is opgebouwd.
- Het adsorptiesysteem moet als een modulaire toevoeging aan bestaande droger worden toegevoegd. Belangrijk voordeel is dat voor een bestaande droger het energieverbruik lager wordt en tegelijkertijd de droogcapaciteit 10-20% omhoog gaat. Een bedrijf krijgt daarmee capaciteituitbreiding voor bestaande droogactiviteiten.

In een pilot studie/demonstratie traject moeten de volgende vragen opgelost worden:

- Werkt het zeoliet ook als filter voor het afvangen van productstof?
- Wat gebeurt er met productstof in zeoliet bij regeneratie? Is beveiliging tegen spontane ontbranding nodig? Moet er een stoffilter voorgeplaatst worden?
- In welke mate worden aroma en geurstoffen afgevangen? Is dat een voordeel of een nadeel?
- Vaststellen of het werken met ontvochtigde lucht effect heeft op de productkwaliteit.
- Is de kwaliteit van buitenlucht/hergebruikte lucht na passage door het zeoliet voldoende schoon voor productbehandeling? Moet de lucht na herhaalde passage door een meer-trapsdroger nog behandeld worden voordat hij weer uitgestoten wordt naar de omgeving

Vereiste ontwikkelingsstappen

- Ontwikkeling van een adsorptie/regeneratie wiel met zeoliet als centraal onderdeel van een pilot installatie. Hiermee hebben de firma's Klinkenberg en HB Drying Systems al ervaring.
- Ontwikkeling van een flexibel design programma in een eenvoudige programmeeromgeving zoals bijvoorbeeld Excel.
- Ontwikkeling van een demonstratie installatie door Ebbens Engineering Ingenieursbureau. Te beginnen op de tekentafel gevolgd door dimensioneringsberekeningen zodra een demonstratieproject verworven is.

7 Betekenis voor de doelstellingen van energieonderzoek in Nederland

Adsorptiedrogen in Nederland

In het drogerconcept dat in project geëvalueerd is worden 3 aspecten samengebracht:

- Ontvochtigen en opwarmen van verse lucht door adsorptie met zeoliet,
- Uitlaatlucht van een droger wordt na ontvochtiging met zeoliet en met behoud van de energie inhoud hergebruikt,
- Efficiënt hergebruik van de energieinhoud van de luchtstromen.

TNO heeft ook een droger concept ontwikkeld dat gebruik maakt van zeoliet. Dit gebruikt oververhitte stoom voor regeneratie. De stoom die de regenerator verlaat wordt elders in het bedrijf gebruikt. Het in dit onderzoek ontwikkelde systeem is nieuw met betrekking tot het meer-traps gebruik, de manier van warmtetrugwinning en het feit dat het systeem op zich zelf staat en niet afhankelijk is van een andere energiegebruiker elders in het bedrijf.

Potentie voor energiebesparing en reductie CO₂-uitstoot

De Nederlandse voedings- en genotmiddelenindustrie gebruikt jaarlijks 8×10^{15} J voor drogen met hete lucht. De resultaten geven aan dat meer-traps adsorptiedrogen met zeoliet er potentie is om het energieverbruik tussen 30-50% te reduceren. Dit is een besparing tussen $2.4-4 \times 10^{15}$ J per jaar.

De oplossing voor drogen beperkt zich echter niet tot de voedings- en genotmiddelenindustrie, maar kan ook in de chemie, farma en de zich ontwikkelende biobased industrie worden gebruikt. De besparingen die hier mogelijk zijn, worden tenminste op hetzelfde niveau geschat als die in de voedings- en genotmiddelenindustrie. De jaarlijkse CO₂-emissie door verbranding van aardgas voor drogen bedraagt voor de Nederlandse voedings- en genotmiddelenindustrie circa 500.000 ton CO₂/jaar. De aangetoonde reductie van het energieverbruik komt overeen met 150.000-250.000 ton lagere CO₂-emissie per jaar. Dit draagt 4.5-6% bij aan reductie van CO₂-emissie van de voedings- en genotmiddelensector. Vergelijkbare reducties kunnen in andere branches gehaald worden.

De toekomst

Gezien de potentie voor energiebesparing van drogen met behulp van zeoliet wordt inmiddels gewerkt aan vervolgonderzoeksprojecten voor drogen. Voor een daarvan, "energiezuinig drogen van gezonde voeding" is inmiddels financiering in het EOS-programma uitgevoerd door SenterNovem verkregen. Hierbij wordt droogtechnologie ontwikkeld voor warmtegevoelige producten die in de range 10-40°C gedroogd moeten worden.

De technologie biedt verder mogelijkheden voor een nieuwe aanpak van vriesdrogen, en er zijn ook ontwikkelmogelijkheden voor integratie van de warmtehuishouding in woningen, professionele keukens en wasserijen.

Projectresultaat

Het onderzoek heeft samen met het voorafgaande werk 4 gepubliceerde publicaties in het internationale Drying Technology Journal opgeleverd en 2 manuscripten zijn aangeboden voor publicatie. Verder zijn er congresbijdragen geweest. Hiermee heeft het project een goed wetenschappelijk niveau gehaald en wordt de ontwikkelde kennis uitgedragen.

Daarnaast heeft het werk tot promotie van M. Djaeni aan Wageningen Universiteit geleid, waarbij de kwaliteit van het promotiewerk beoordeeld is door een onafhankelijke deskundige promotiecommissie.

Door Ebbens Engineering Ingenieursbureau is de technologie vastgelegd, en door participatie in het project heeft dit bedrijf een goed uitgangspunt voor exploitatie van de technologie. Verschillende bedrijven hebben met serieuze belangstelling kennis genomen

van de mogelijkheden. Er zijn nog verschillende vragen die moeten worden opgelost. Dit zal in het ontwikkeltraject worden opgenomen (zie sectie 6).

8 Conclusie en aanbevelingen

De doelstelling van dit onderzoek was aan te tonen dat het energieverbruik bij drogen in de temperatuur range 50-90°C belangrijk lager kan door gebruik te maken van meer-traps adsorptiedrogers. Op basis van voorafgaand model onderzoek werd verwacht dat met meer-traps adsorptiedrogen een energieefficiëntie van circa 85-90% mogelijk moet zijn en bij het gebruik van een compressie eenheid in het systeem een energie efficiëntie tot 120% haalbaar is.

Experimenteel werk aan een speciaal in dit project ontwikkelde pilot opstelling voor een een-traps en twee-traps adsorptiedroger geeft aan dat met een meert-traps droger de voorspelde energie efficiëntie zonder meer kan worden gerealiseerd. Bij een juiste keuze van de operationele condities is de energie efficiëntie 65% en 85% voor respectievelijk een een-traps en een twee-traps systeem. De energie efficiëntie met gebruikmaking van een compressie eenheid kon in de huidige opstelling niet geëvalueerd worden.

Naast de haalbare energie efficiëntie was de technische realisatie ook een belangrijk onderdeel van het werk. Op basis van verschillende voorstellen blijkt dat het systeem technisch goed realiseerbaar zijn, waarbij een constructie met een roterend wiel de voorkeur verdient. Naast de technische realisatie is het systeem bij een goed ontwerp ook regelbaar met bestaande control systemen.

De geschatte terugverdientijd van de investeringen op basis van energie besparingen en lagere CO₂-uitstoot is voor een kleine tot middelgrote droger in de orde grootte van 1-2 jaar. Toepassing van de techniek kan productiebedrijven een verlaging van het energieverbruik en CO₂-uitstoot voor drogen van 30-50% opleveren. Met deze investering kan een bedrijf een flinke stap maken om te voldoen aan de eis van de Nederlandse overheid om het energieverbruik en CO₂-uitstoot in 2020 op een 20% lager niveau te brengen.

Om het concept naar de markt te brengen zijn de volgende activiteiten nodig:

- Actieve benadering van potentiële gebruikers in de industriële sectoren voor zaden, food, farma en papier, en integreren in nieuwe technologische ontwikkelingen zoals de verwerking van door algen geproduceerde producten.
- Ontwikkeling van design procedures en een demonstratie installatie op basis van een wielsysteem dat als een toevoeging in een bestaande drooginstallatie kan worden ingebouwd.
- Informatie vastleggen omtrent de brandbaarheid van stofdeeltjes, aromaveranderingen en het effect op product- en luchtkwaliteit.

Openbare publicaties

1. M. Djaeni, P. Bartels J. Sanders, G. van Straten and A.J.B. van Boxtel. Process Integration for Food Drying with Air Dehumidified by Zeolites *Drying Technology*, 25: 225–239, 2007.
2. M. Djaeni, P. Bartels J. Sanders, G. van Straten and A.J.B. van Boxtel. Multi-stage zeolite drying to enhance heat efficiency of food drying. *Drying Technology*, 25: 1063–1077, 2007.
3. M. Djaeni, P. Bartels J. Sanders, G. van Straten and A.J.B. van Boxtel. Computational Fluid Dynamics for Multistage Adsorption Dryer Design. *Drying Technology* 26,4(2008)487-502.
4. M. Djaeni, P.V. Bartels, J.P.M. Sanders, G. van Straten and A.J.B van Boxtel. Energy Efficiency Of Multi-stage Adsorption Dryer For Low Temperature Drying. Accepted by *Drying Technology*, June 2008, *In Press*.
5. M. Djaeni, P.V. Bartels, J.P.M. Sanders, G. van Straten and A.J.B van Boxtel. Energy Efficient Multistage Drying for Heat Sensitive Products. Thesis abstract accepted by *Drying Technology*, december 2008.
6. M. Djaeni, P.V. Bartels, C.J. van Asselt, J.P.M. Sanders, G. van Straten and A.J.B van Boxtel. Performance Evaluation of Adsorption Dryer using Zeolite. Submitted to *Drying Technology*. January 2009.
7. M. Djaeni, P.V. Bartels, C.J. van Asselt, J.P.M. Sanders, G. van Straten and A.J.B van Boxtel. Assessment of a Two-Stage Zeolite Dryer for Energy Efficient Drying. Submitted to *Drying Technology*. January 2009.
8. M. Djaeni. Energy Efficient Multistage Drying for Heat Sensitive Products. Thesis Wageningen University ISBN: 978-90-8585-209-4. Graduation at 21st November 2008.
9. T. van Boxtel, R. Vos. Systeemintegratie voor hoge energie efficiëntie bij adsorptiedrogen. Symposium Nederlandse Werkgroep Drogen. 23 november 2006.
10. M. Djaeni, P.V. Bartels, J.P.M. Sanders, G. van Straten and A.J.B van Boxtel. Heat Efficiency Of Multi-stage Adsorption Dryer For Low Temperature Drying, proceedings ADC5, Hong Kong august 2007.
11. M. Djaeni, PV. Bartels, JPM. Sanders, G. van Straten, AJB van Boxtel. Design of multi-tray low temperature drier using air dehumidified by zeolite for heat sensitive products. NPS symposium 29-30 oktober 2007.
12. M Djaeni, PV. Bartels, JPM. Sanders, G. van Straten, AJB van Boxtel. Zeolite for efficient Drying. ISSM symposium, May 2008 Delft.

Elektronische versies van de verslagen en het proefschrift zijn verkrijgbaar bij dr.ir.A.J.B. van Boxtel (ton.vanboxtel@wur.nl) of bij de bibliotheek van Wageningen Universiteit <http://library.wur.nl/desktop/services/helpdesk.html> , tel 0317 484440, fax 0317 484761).