

GEAVANCEERDE GASTURBINECYCLI IN DE BROOD- & BANKET- EN IN DE ZUIVELINDUSTRIE

J.W. Dijkstra
W. Rouwen*
P. Sluimer*
R. Verdurmen**

* =TNO Voeding
** = NIZO Food Research

Revisions		
A	Final Report	
Made by: J.W. Dijkstra	Approved: D. Jansen	ECN-Clean Fossil Fuels
Checked by: M. Weeda	Issued: C.A.M. van der Klein	

Verantwoording

Dit rapport is een deelstudie uitgevoerd in het kader van het project "Assessment of the technical feasibility and future market potential for a new concept of a gas turbine system with stepwise substoichiometric combustion". Het project is gefinancierd door Novem. Het Novem projectnummer is 248-101-0113. Dit onderdeel is uitgevoerd door ECN, NIZO food research, en TNO Voeding, met ondersteuning van Krachtwerktuigen Adviseurs en Jacobs Comprimio Nederland. Het ECN projectnummer is 7.2866.

Abstract

A gas turbine can be equipped with an air bottoming cycle to produce clean hot air as well as electricity. This air can be used in the dairy industry for spray towers, or in the bakery industry for furnaces. The technical and economic feasibility for using this system in the dairy and bakery industry is investigated. To put the study into national perspective the national energy demand of both industries and agreements with the Dutch government are treated. An inventory of boundary conditions for the system is made. A list of potential users has been made and three potential users have been interviewed. The feasibility of the application of a gas turbine with or without a bottoming cycle is analyzed. The main dimensions for both applications are determined and an economic evaluation is performed.

Key words

Haalbaarheidsstudie, air bottoming cycle, nageschakelde luchtcyclus, gasturbine, warmte kracht koppeling, sproeitoren, oven, brood, banket, zuivel.

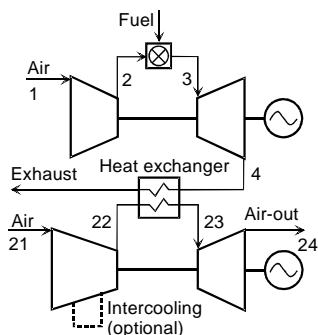
INHOUD

SAMENVATTING	5
1. INLEIDING	7
2. BELEIDSKADER	9
2.1 Zuivelindustrie	9
2.1.1 Energiesituatie Nederlandse zuivelindustrie	9
2.1.2 Afspraken tussen de overheid en de Nederlandse zuivelindustrie	10
2.2 Bakkerij-industrie	11
2.2.1 Energiesituatie in de Nederlandse bakkerij-industrie	11
2.2.2 Afspraken tussen de overheid en de bakkerijbranche	13
3. TOEPASSING VAN EEN GT-ABC IN DE ZUIVELINDUSTRIE	15
3.1 Algemene beschrijving droogprocessen in de zuivelindustrie	15
3.2 Overzicht sproeidrooginstallaties in Nederland	17
3.3 Eisen aan luchtkwaliteit voor droogprocessen in de zuivelindustrie	19
3.4 Selectie type sproeidroger en cyclus	19
3.4.1 Selectie type sproeidroger	19
3.4.2 Selectie type cyclus	20
3.5 Resultaten bedrijfsbezoek	20
3.6 Technische evaluatie	20
4. TOEPASSING VAN EEN GT-ABC OF GT IN DE BROOD- EN BANKETINDUSTRIE	23
4.1 Inleiding	23
4.2 Algemene beschrijving	23
4.2.1 Typen bedrijven	23
4.2.2 Typen ovens	24
4.3 Overzicht industriële bakkerijen in Nederland	25
4.4 Eisen te stellen aan de atmosfeer in de oven	26
4.5 Resultaten bedrijfsbezoeken	26
4.6 Selectie type oven en cyclus	27
4.6.1 Basissystemen	27
4.6.2 Alternatieve systemen	28
4.6.3 Selectie configuraties verdere evaluatie	29
4.7 Technische evaluatie	29
4.7.1 Warmtebehoefte van een oven	29
4.7.2 Berekening hoofdafmetingen en besparingspotentieel per oven	31
5. ECONOMISCHE EVALUATIE	35
6. CONCLUSIES	37
6.1 Conclusies m.b.t. zuivelindustrie	37
6.2 Conclusies m.b.t. bakkerijen	37
6.3 Aanbevelingen	38
7. REFERENTIES	41

APPENDIX 1: BEZOEKERSRAPPORT BDI	43
APPENDIX 2: BESPREKINGSVERSLAG KAAK GROEP	45
APPENDIX 3: BEZOEKERSRAPPORT BOLLETJE B.V.	48
APPENDIX 4: INDUSTRIËLE BROODBAKKERIJEN IN NEDERLAND	50
APPENDIX 5: INDUSTRIËLE BANKETBAKKERIJEN IN NEDERLAND	52
APPENDIX 6: GEGEVENS PRAKTIJKMETINGEN OVENS	53
APPENDIX 7: ECONOMISCHE EVALUATIE GT-ABC BIJ EEN SPROEIDROOGTOREN	58

SAMENVATTING

Een gasturbine (GT) kan van een nageschakelde luchtcyclus of air bottoming cycle (ABC) worden voorzien. (Zie Figuur 1) Deze levert dan schone droge lucht naast de door de GT en nageschakelde cyclus geproduceerde elektriciteit.



Figuur 1: *Schematische voorstelling gasturbine met air bottoming Cycle (GT-ABC)*

De nageschakelde cyclus is een gasturbinecyclus zonder verbrandingskamer, waarbij de benodigde energie verkregen wordt door warmtewisseling met de rookgassen van de gasturbine. De lucht uit de expander van de ABC heeft een voldoende hoge temperatuur (ca 210° C-280° C) voor gebruik in industriële processen. Omdat dit schone droge lucht is, is deze in het bijzonder geschikt voor toepassingen in de voedings- en zuivelindustrie. In een voorgaande studie is door Korobitsyn [1] een verkenning uitgevoerd naar mogelijke toepassingen van de GT-ABC. Twee interessante toepassingen die hierbij naar voren kwamen zijn:

- De gecombineerde productie van elektriciteit en schone droge lucht voor toepassingen in bakoven in de brood- en banketindustrie;
- De gecombineerde productie van elektriciteit en schone droge lucht voor gebruik in een sproeidroogtoren in de zuivelindustrie.

In deze studie zijn de randvoorwaarden geïnventariseerd en is de technische en economische haalbaarheid onderzocht. Een deel van de genodigde gegevens is verkregen d.m.v. interviews met potentiële gebruikers.

Beleidskader

De Nederlandse zuivelindustrie verbruikt 3,7 PJ primaire energie per jaar, de bakkerijindustrie 3,6 PJ energie per jaar. Beide sectoren voeren op dit moment onderhandelingen met de Nederlandse overheid over energiebesparing. Bij de zuivelindustrie zijn deze het meest concreet aan de hand van energiebesparingsplannen per bedrijf. In de bakkerijsector dienen deze uit te monden in een convenant.

Hygiënische eisen

Met betrekking tot de eisen aan de hete gassen zijn de eisen bij de zuivelindustrie duidelijk het strengst. Doorgaans wordt de absolute nulgrens voor verontreinigingen gehanteerd. Indien dit niet haalbaar is wordt deze door onderhandelingen met de afnemer vastgesteld. In de brood- en banketindustrie is deze eis minder streng. Dit blijkt uit het feit dat direct gestookte ovens waarbij producten in de rookgassen gebakken worden algemeen geaccepteerd zijn. Bij metingen zijn nooit nitrosaminen in de producten vastgesteld ondanks de aanwezigheid van NO_x in de rookgassen. De concentratie tot waar gemeten is bedraagt 25 mg/kg. Met betrekking tot de problematiek van mogelijke oliedeeltjes in de geproduceerde lucht zijn geen praktische eisen bekend.

Toepassingspotentieel

Een inventarisatie van Nederlandse bakkerijen laat een negental bedrijven zien die in aanmerking komen voor toepassing. Een inventarisatie van Nederlandse zuivelindustrieën laat 22 mogelijke locaties voor toepassing zien. Hiervan geeft een kwart aan interesse te hebben en eenzelfde deel wil op de hoogte gehouden worden.

Technische evaluatie bakkerijindustrie

Bij de inzet van een GT-ABC dient onderscheid gemaakt te worden tussen direct gestookte en indirect gestookte ovens. Bij de eerste bevinden de branders zich in de bakruimte zelf. Bij de tweede wordt de warmte overgedragen via circulatie van de rookgassen door pijpen in de oven of via de circulatie van thermische olie.

De GT-ABC kan ingezet worden voor de warmtevoorziening van direct gestookte ovens, zij het dat niet voor alle toepassingen de geleverde temperatuur (zonder aanpassingen aan de GT-ABC) hoog genoeg is. De inzet van een GT-ABC in een broodoven leidt tot een besparing op primaire energie van 20%. Bij de waardering van de geproduceerde elektriciteit is uitgegaan van het rendement van het Nederlandse elektriciteitspark (42%). Een alternatief is de toepassing van een voorgeschakelde GT. Hierbij is de besparing op primaire energie 40%. De besparingen zijn in dit laatste geval echter voor een deel toe te schrijven aan het toepassen van een lagere luchtvermaat in de oven. Nagegaan dient te worden of deze lage luchtvermaat acceptabel is. Indien deze acceptabel is, is dit een autonome mogelijkheid tot verbetering van het energieverbruik.

Een complicatie bij het toepassen van een GT of GT-ABC in een directgestookte oven is dat welliswaar dezelfde hoeveelheid warmte geleverd wordt, maar dat het warmteoverdrachtsmechanisme anders is. T.o.v. een vlam is bij een hete gasstroom uit een GT/GT-ABC de hoeveelheid stralingsoverdracht sterk verminderd. Daarnaast wordt de convectieve overdracht beïnvloed door de vergrootte volumestroom. Naar de invloed die dit heeft op de productkwaliteit dient onderzoek te worden gedaan voordat de GT-ABC ingezet kan worden.

Voor de toepassing in indirect gestookte ovens heeft het feit dat de GT-ABC schone lucht levert geen meerwaarde aangezien de warmteoverdracht indirect plaats vindt. Het voordeel dat een GT-ABC boven een GT wel heeft is hogere elektrische efficiency. Deze moet echter opwegen tegen de meerinvesteringen in de procesapparatuur. Naast de GT-ABC is daarom ook de inzet van een gasturbine geëvalueerd. De besparing op primaire energie van een indirect gestookte oven met een GT-ABC bedraagt 12%, die met een GT 13%. De investeringen voor een GT zijn ook lager dan die van een GT-ABC zodat bij een indirect gestookte oven een GT de voorkeur heeft.

Technische evaluatie zuivelindustrie

Een GT-ABC met 1 intercooler en een kleine aanpassing aan de ABC levert lucht van een temperatuur die geschikt is voor toepassing in een sproeidroogtoeren. Naast de vereiste drooglucht wordt 9.4 MWe elektriciteit geleverd. Deze hoeveelheid is een derde groter dan het energieverbruik van de site. De besparing op primaire energie bedraagt 18%. De GT-ABC is te zwaar voor verhoogde plaatsing, zodat een luchtkanaal naar de ingang van de sproeidroogtoeren vereist is. Gezien het vereiste warmtewisselend oppervlak en de beperkte beschikbare ruimte op de locatie dient gekozen te worden voor een compacte warmtewisselaar.

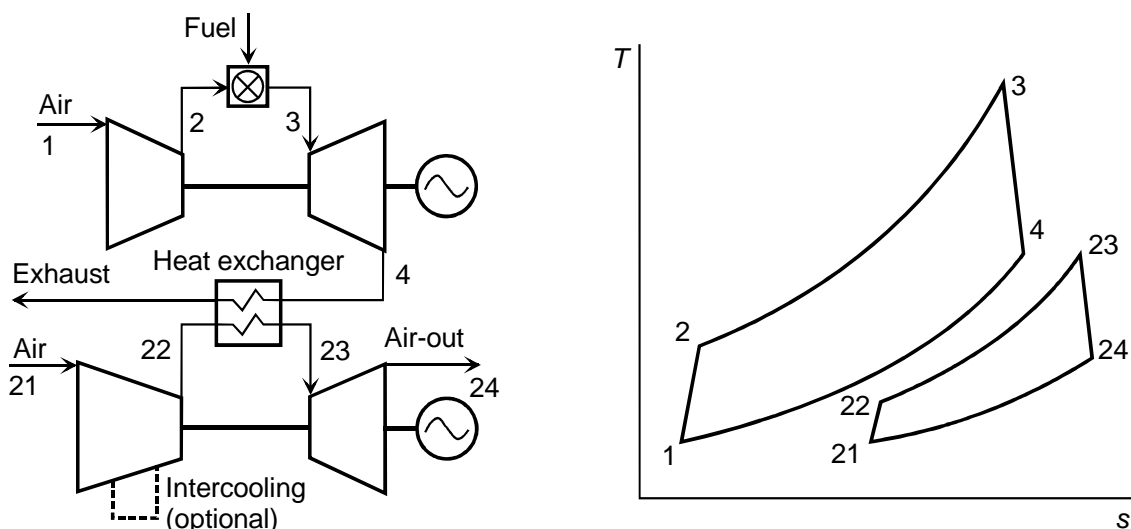
Economische evaluatie

De economische evaluatie van de GT-ABC is uitgevoerd aan de hand van een case in de zuivelindustrie. De investering voor de GT-ABC voor deze case bedraagt 10 M€ Dit is een bedrag dat veel hoger is dan het reguliere investeringsbudget van een site. De terugverdientijd op basis van inkoopprijs van elektriciteit van 0.083 €/kWh, is 3,6 jaar. Dit is enigszins hoger dan de gestelde eis van 3 jaar, maar voldoende goed om verdere evaluatie te rechtvaardigen.

1. INLEIDING

De belangrijkste technologie voor de productie van elektriciteit uit aardgas is de gasturbine. (GT). Normaliter worden de afgassen van een gasturbine gebruikt voor de opwekking van stoom voor additionele elektriciteitsproductie m.b.v. een stoomturbine. Ook kan stoom en/of warm water geproduceerd worden voor industriële of ruimteverwarmingsdoeleinden.

De GasTurbine-Air Bottoming Cycle (GT-ABC) of 'gasturbine met nageschakelde luchtcyclus' is in de late jaren tachtig voorgesteld als alternatief voor de conventionele stoomcyclus. Figuur 2 geeft een schematisch weergave hiervan. De GT-ABC maakt gebruik van de afgassen van een conventionele gasturbine (GT) (topping cycle). De thermische energie uit deze gassen wordt door een hoge-temperatuur warmtewisselaar overgedragen aan een tweede gasturbinecyclus (de air bottoming cycle, ABC). Deze laatste levert additionele elektriciteit. Het werkmedium van de nageschakelde luchtcyclus is lucht (i.p.v. lucht/rookgassen zoals bij de topping cycle). De lucht uit de expander van de ABC (stroom air-out in Figuur 2) heeft een nog voldoende hoge temperatuur (ca 210° C - 280° C) voor gebruik in industriële processen. Omdat de stroom uit schone droge lucht bestaat is deze in het bijzonder geschikt voor toepassingen in de voedings- en zuivelindustrie. Tabel 1 geeft de performance van de GT-ABC op basis van een Allison 571-K gasturbine voor verschillende uitvoeringen.



Figuur 2: Gas turbine met air bottoming cycle GT-ABC (links). T-S diagram van de GT-ABC (rechts).

In een voorgaande studie is door Korobitsyn [1] een verkenning uitgevoerd naar mogelijke toepassingen van de GT-ABC. Twee interessante toepassingen die hierbij naar voren kwamen zijn:

- De gecombineerde productie van elektriciteit en schone droge lucht voor toepassingen in bakoven in de brood- en banketindustrie;
- De gecombineerde productie van elektriciteit en schone droge lucht voor gebruik in een sproeidroogtoren in de zuivelindustrie.

Tabel 1: *GT-ABC prestaties op basis van een Allison 571-K gasturbine*

Gas turbine	Systeem	Totale elektrische vermogen	Elektrische efficiency	Exergie efficiency	Proces Temp
		MW	%	%	°C
	1. Simple cycle	5.9	33.8	32.5	n.b.
	2. ABC, no intercooling	7	40.4	47.2	278
Allison 571-K	3. ABC, one intercooler	7.4	42.3	46.0	220
	4. ABC, two intercoolers	7.5	43.2	46.3	210

In dit rapport zal nader worden ingegaan op deze twee toepassingen. Er wordt een algemene beschrijving gegeven van de huidige technologie. De randvoorwaarden voor toepassing van een GT-ABC worden geïnventariseerd. Deze zijn aangevuld en getoetst door middel van bedrijfsbezoeken. Ten slotte zal de GT-ABC technisch en economisch geëvalueerd worden aan de hand van de verkregen inzichten. Om het geheel in een breder kader te plaatsen zal allereerst het beleidskader geschetst worden met daarin het energieverbruik en afspraken met de overheid in de twee sectoren.

2. BELEIDSKADER

In dit hoofdstuk zal voor de Nederlandse situatie het energieverbruik van de brood- en banket sector en de zuivelsector geschetst worden, en worden belicht tegen de achtergrond van meerjarenafspraken en andere beleidsinstrumenten.

2.1 Zuivelindustrie

2.1.1 Energiesituatie Nederlandse zuivelindustrie

Door Arcadis IMD wordt in opdracht van de Nederlandse Zuivel Organisatie (NZO) jaarlijks een overzicht opgesteld van het energieverbruik van de Nederlandse zuivelindustrie. In Tabel 2 wordt de verbruikte energie voor de zuivelbedrijfstak weergegeven, verdeeld over de verschillende energiedragers. Bij de omrekening naar primaire energie is bij elektriciteit (ingekocht van het elektriciteitsnet) uitgegaan van een rendement van 38,5 %. Bij aardgas is bij de omrekening naar primaire energie uitgegaan van de onderste verbrandingswaarde $H_o = 31,65 \text{ MJ/m}^3$. Bij stookolie/overige brandstoffen is bij de omrekening naar primaire energie uitgegaan van de door de bedrijven opgegeven onderste verbrandingswaarde voor het door hun gebruikte type olie. De verbruikte elektriciteit geeft weer de ingekochte minus de teruggeleverde elektriciteit.

In Tabel 2 valt op dat de zuivelindustrie netto minder elektriciteit is gaan gebruiken en iets meer aardgas.

Per productgroep zijn geen rechtstreekse getallen bekend, maar die kunnen wel worden berekend op basis van op de hoeveelheid Netto Verkoopbaar Product (NVP) per productgroep en het specifiek energieverbruik per productgroep in 1989.

Tabel 2: *Hoeveelheden verbruikte energie door de zuivelbedrijfstak. Bron: [9]*

Energiedrager	Eenheid	1989	1992	1996	1997	1998	1999
Elektriciteit	GWh	495	490	147	197	221	194
	$T_{j\text{primair}}$	4.628	4.579	1.371	1.842	2.067	1.814
Aardgas	miljoen m^3	392	412	489	485	478	489
	$T_{j\text{primair}}$	12.422	13.057	15.468	15.362	15.133	15.486
Stookolie/LPG	ton	5.117	4.101				
	$T_{j\text{primair}}$	209	177	79	120	58	19
Totaal primair	TJ	17.259	17.813	16.917	17.325	17.257	17.320

In Tabel 3 worden de resultaten weergegeven van deze berekening van het primair energieverbruik per productgroep. Hierin is het totale energieverbruik berekend en niet alleen het energieverbruik van alleen de droogprocessen zoals in Tabel 7 is berekend.

Voor wat betreft het energieverbruik bij droogprocessen in de zuivelindustrie zijn vooral de productgroepen “weiverwerking” (het indampen van wei bij kaasfabrieken en productie van

weiprodukten zoals lactose, suikerarme weipoeder en diverse weipoeders), “melkpoeder” en “diversen producten” (o.a. caseinaten, diverse halffabrikaten en eindproducten in poedervorm waarvan melk een klein deel uitmaakt, babyvoeding en kaaspoeder) van belang.

Tabel 3: *Berekening van het primair energieverbruik per productgroep in 1999. Bron [9].*

Productgroep	NVP ₁₉₉₉ (kton/jaar)	Berekend primair energieverbruik (GJ = 10 ⁹ J)
Consumptiemelk/-producten	1807	2.162.979
Kaas	668	3.108.204
Boter	140	315.000
Condens/koffiemelk	336	794.976
Melkpoeder	188	2.234.004
Weiprodukten	420	5.979.960
Smeltk kaas	17	45.917
Kaasopslag	402	438.180
Diversen producten	558	3.460.158
<u>Diversen behandeling</u>	<u>1.670</u>	<u>360.720</u>
Totaal zuivelindustrie		18.905.409

Het verschil tussen het werkelijk energieverbruik (Tabel 2) en het berekende (Tabel 3), (uitgaande van het specifiek energieverbruik in 1989) worden verklaard door de verbetering van energie-efficiency tussen 1989 en 1999.

Later in dit rapport volgt uit een inventarisatie van alle melkpoedertorens meer gedetailleerde informatie over het totale energiegebruik van sproeidroogtorens.

2.1.2 Afspraken tussen de overheid en de Nederlandse zuivelindustrie

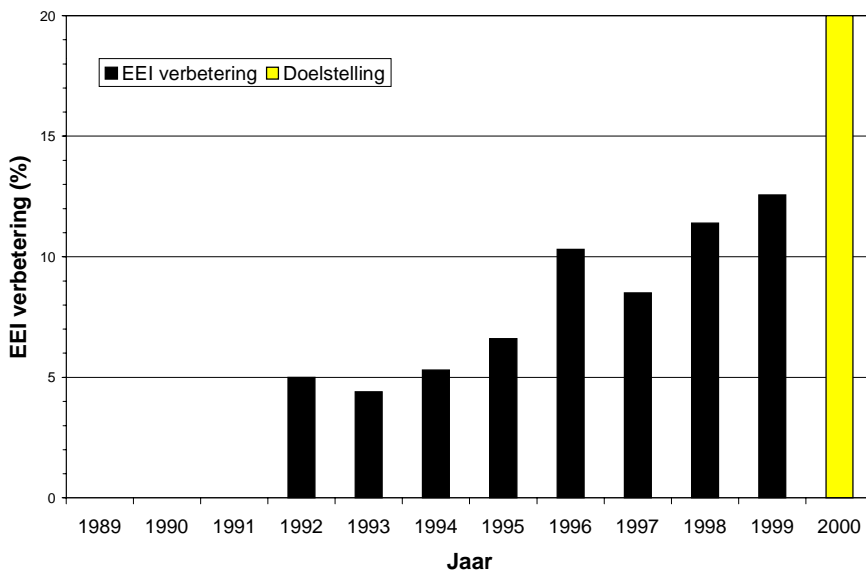
Op 6 juli 1994 is een meerjarenafpraak (MJA) afgesloten tussen het Ministerie van Economische Zaken, de Nederlandse Zuivelorganisatie (NZO), de Nederlandse Vereniging van Kaassmelters en de ondernemingen die lid zijn van één van de eerdergenoemde branche organisaties. Tevens neemt een bedrijf deel aan de MJA dat geen lid is van deze organisaties. Op 17 april 1998 is de MJA verlengd voor de periode t/m 31 december 2000.

In de MJA heeft de zuivelindustrie zich tot doel gesteld een energie-efficiëntie verbetering te bereiken van 20% in het jaar 2000 ten opzichte van het referentiejaar 1989. Van deze 20% energie-efficiëntieverbetering werd bij opstelling van de MJA in 1994 verwacht dat 10% tot stand zou komen door realisatie en optimalisatie van warmte/kracht koppeling (WKK).

Volgens de MJA monitoring uitgevoerd door Arcadis IMD en NOVEM [10] bedraagt het primaire energieverbruik (PEV) van de sector in 1999 17320 TJ en het referentieverbruik 19909 TJ (referentieverbruik is PEV bij gelijkblijvende energie-efficiëntie als in 1989).

In Figuur 3 is de energie-efficiëntie verbetering van de zuivelindustrie grafisch weergegeven. Hieruit blijkt dat in 1999 een energie-efficiency index (EEI) verbetering van 12.6% is bereikt ten opzichte van het referentiejaar 1989 [10]. Het is de verwachting dat de sector de MJA doelstelling van 20% energiebesparing niet zal halen aan het einde van 2000. Het niet realiseren

van nieuwe WKK installaties gedurende de afgelopen jaren vanwege marktomstandigheden (de veranderde tariefstelling voor teruglevering en de inmiddels geliberaliseerde energiemarkt) is hier mede debet aan.



Figuur 3: Energie-efficiëntie verbetering van de Nederlandse zuivelindustrie. Bron: [10]

In 1999 is de voorbereiding voor MJA2 in volle gang gezet. De branche en de bedrijven hebben zich met ondersteuning van NOVEM ingezet voor invulling van MJA2 over de periode 2001-2004. NZO heeft een ‘Plan van aanpak MJA 2001-2010 zuivelindustrie’ opgesteld [10].

Voor de MJA 2001-2010 spelen naast de verbetering van de efficiency van productieprocessen ook nieuw besparingsthema's een belangrijke rol (verbreding), zoals industriële samenwerking op bedrijfsterreinen, (industriële) samenwerking in de productieketen, verbetering van de transportefficiency en toepassing van duurzame energie. Een andere verandering van de voorgaande MJA is de wijze van bepaling van de besparingsdoelstelling per bedrijf en voor de sector. Bij de MJA 2001-2010 maakt elk individueel bedrijf een energiebesparingsplan (EBP), waaruit een energiebesparingsdoelstelling voor het bedrijf volgt. Dit EBP dient goedgekeurd te worden door NOVEM. De sommatie van de energiebesparingsdoelstellingen van de bedrijven leidt tot de energiebesparingsdoelstellingen voor de sector. De nieuwe MJA loopt vanaf 01-01-2001. De nieuwe invulling die daar in de toekomst aan gegeven gaat worden kan een stimulans zijn voor de toepassing van warmtekracht in de zuivelindustrie, bijvoorbeeld in de vorm van een GT-ABC, mits bedrijven deze opnemen in hun energiebesparingsplan.

2.2 Bakkerij-industrie

2.2.1 Energiesituatie in de Nederlandse bakkerij-industrie

Doorgaans wordt de bakkerijbranche naar product en naar grootte in vier sectoren ingedeeld: industrieel brood, ambachtelijk brood, industrieel banket en ambachtelijk banket. Ambachtelijk banket is een zodanig kleine sector dat deze in de statistieken vaak niet wordt meegenomen. In 1996 is een overzicht gemaakt van het gebruik van de verschillende energiedragers in de gehele branche. De veranderingen daarin over de afgelopen 5 jaar zijn klein en het beeld dat toen

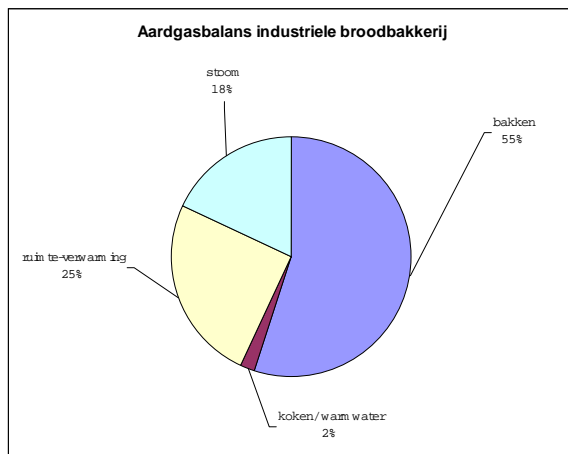
geschetst is, is heeft nog steeds in grote lijnen geldig. Het totale energieverbruik is samengevat in Tabel 4.

Tabel 4: Energieverbruik bakkerijbranche (situatie 1996)

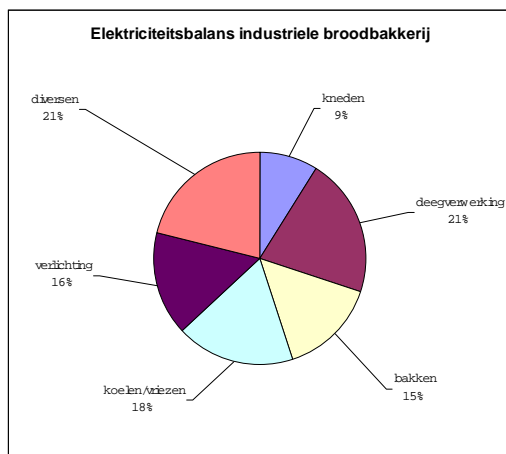
	hoeveelheid	gemiddeld verbruik
Elektriciteit	203.6 mln kWh	345 kWh/ton meel
Gas	86,4 mln m ³	146 m ³ /ton meel
Overig	82 TJ	

In totaal werd door de gehele branche 3.550 TJ verbruikt met een totale waarde van 58,1 mln gulden of 25 mln. Euro.

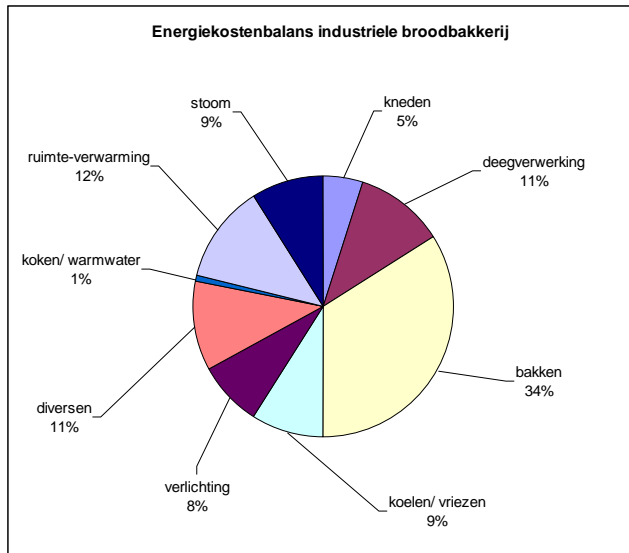
De balansen voor verbruik van elektriciteit, gas en de totale energiebalans in de drie belangrijkste branchesegmenten, onderverdeeld naar activiteit zijn in onderstaande diagrammen weergegeven (Figuur 4, Figuur 5 en Figuur 6).



Figuur 4: Aardgasbalans industriële broodbakkerij



Figuur 5: Elektriciteitsbalans industriële broodbakkerij



Figuur 6: *Energiekostenbalans industriële broodbakkerij*

2.2.2 Afspraken tussen de overheid en de bakkerijbranche

In 1993 en 1995 zijn tussen branche en overheid afspraken gemaakt over beleid inzake energiebesparing. Namens de branche zijn die onderhandelingen met de overheid gevoerd door de Nederlandse Bakkerij Stichting. Daarbij is de intentie uitgesproken te komen tot een verbetering van de energie efficiëntie in 2000 van 20% in vergelijking met het jaar 1989. Deze afspraken hadden niet het karakter van een z.g. meerjarenafpraak, maar van een intentieverklaring. Uiteindelijk heeft deze afspraak niet geleid tot een vermindering van het energieverbruik. Volgens de branche spelen daarbij de hogere eisen die de overheid stelt aan de opslag en het vervoer van bederfelijke waren een rol. Die koelings vergt hierdoor een aanzienlijke hoeveelheid energie.

Dit jaar zullen onderhandelingen over een nieuw convenant worden gestart. Namens de bakkerij zullen die geleid worden door het Nederlands Bakkerij Centrum¹, bijgestaan door de industriële en ambachtelijke werkgeversbonden uit de bakkerij.

¹ Agro Business Park 75, 6708 PV Wageningen

3. TOEPASSING VAN EEN GT-ABC IN DE ZUIVELINDUSTRIE

In dit hoofdstuk wordt een technische evaluatie uitgevoerd van de toepassing van een GT-ABC cyclus voor de productie van schone, droge lucht voor gebruik in de zuivelindustrie. De voorziene toepassing voor gebruik is die in een sproeidroogtoren, waarin melk of weiconcentraat tot poeder gedroogd wordt.

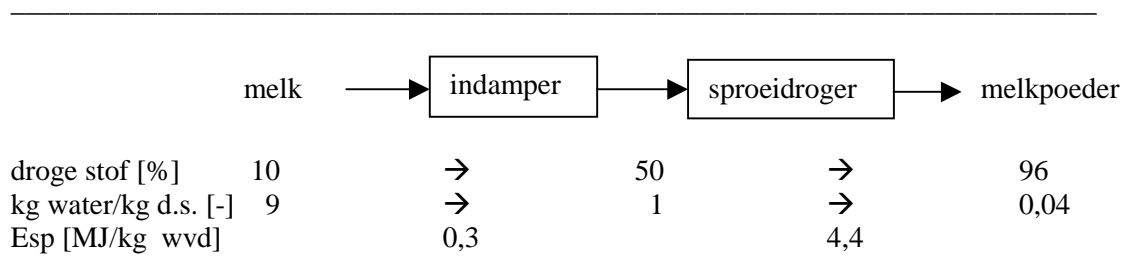
Allereerst zal een algemene beschrijving gegeven worden van droogprocessen in de zuivelindustrie. Voor deze studie is een overzicht gemaakt van alle Nederlandse sproeidrooginstallaties. De beheerders van deze installaties zijn telefonisch benaderd over hun interesse naar het GT-ABC systeem. De resultaten hiervan worden gegeven, alsmede die van een bedrijfsbezoek aan een sproeidrooginstallatie.

De eisen die gesteld worden aan de luchtkwaliteit worden behandeld. Op basis van de verkregen situatie zal een type GT-ABC cyclus en type sproeidroger geselecteerd worden.

Ten slotte zal de haalbaarheid in technische zin behandeld worden aan de hand van een ontwerp op hoofdafmetingen.

3.1 Algemene beschrijving droogprocessen in de zuivelindustrie

Het drogen van melkproducten gebeurt in Nederland vrijwel uitsluitend in sproeidrooginstallaties (meer dan 99 % van de waterverdamping [4]). De bereiding van melkpoeder is in Figuur 7 schematisch weergegeven. Melk wordt met een meertraps-indamper (meestal een vacuüm valstroomverdamer) geconcentreerd tot ca. 50 % droge stof. Concentratie tot hogere droge stof gehalten wordt beperkt door toename van de viscositeit van het concentraat. In de sproeidroger vindt waterverwijdering plaats tot een eindvochtgehalte van ca. 4 %.



Figuur 7: Schema van de bereiding van melkpoeder. Esp = specifiek energieverbruik in MJ per kg waterverdamping [5].

In Figuur 8 zijn drie typen sproeidrogers schematisch weergegeven. De melk, die vooraf is geconcentreerd middels een vacuüm indampinstallatie, wordt boven in de toren door middel van een nozzle of een snel roterend wiel verstoven tot zeer kleine druppeltjes (ca. 50 μ m) en door middel van hete lucht gedroogd tot het gewenste eindvochtgehalte. Door een sproeidroger uit te rusten met meerder “trappen” kan het specifiek energieverbruik worden verlaagd [4].

Met behulp van het simulatieprogramma NIZO *Premia* -DrySpec 2 [6] is uitgerekend hoe de energiehuishouding van tweetrapsdroger met een relevante grootte er uit ziet. De keuze van de

capaciteit van de drooginstallaties is gebaseerd op de enquête die ten behoeve van dit onderzoek is uitgevoerd (zie paragraaf 3.2). De resultaten zijn weergegeven in Tabel 5.

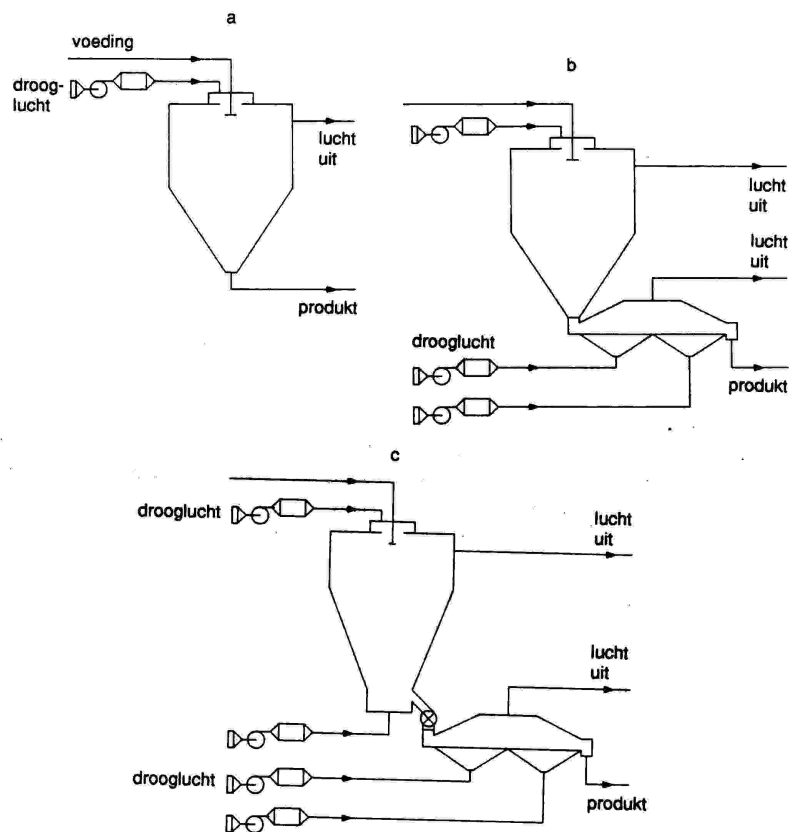
Tabel 5: *Berekende energie-huishouding van tweetrapsdrogers voor volle melk poeder en wei. Indicatieve getallen.*

Product	Capaciteit [kg/uur]		Droge stof gehalte concentraat [%]	Flow concentraat [kg/uur]*	Temp. Drooglucht [°C]	Debiet drooglucht [kg/uur]**	Esp [MJ/kg wvd]
	poeder	Wvd					
Volle melk	1.500	1.540	48	3.155	200	32.500	4,1
Volle melk	2.500	2.580	48	5.280	200	54.000	4,1
wei	2.500	1.865	56	4.410	200	45.500	4,6
wei	3.500	2.600	56	6.180	200	61.000	4,6

wvd = waterverdamping

* temperatuur concentraat 65 °C

** vochtigheid: 10 g water/kg lucht



Figuur 8: *Schema van een één- (a), twee- (b) en een meertrapsdroger (c). Bron [5].*

In 1995 is becijferd dat het drogen van volle melk poeder ca. f 250,= per ton poeder kost, waarvan de energiekosten van het droogproces (aardgas) ca. 15 % bedragen en de energiekosten van het indampen ca. 11 % [7].

3.2 Overzicht sproeidrooginstallaties in Nederland

In het kader van dit haalbaarheidsonderzoek is door NIZO food research een telefonische enquête gehouden. Aan de benaderde zuivelbedrijven is gevraagd welk type drogers zij gebruiken, welk type product wordt gedroogd en met welke capaciteit. Verder is geïnventariseerd of zij gebruik maken van uitlaatlucht-recuperatie (het gebruik van uitlaatlucht om verse lucht op te warmen) en of zij een warmtekrachtkoppelinginstallatie (WKK) hebben. Tenslotte is hen gevraagd of ze interesse hebben in de nageschakelde luchtcyclus (ABC, air bottoming cycle). De resultaten van deze telefonische enquête zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6: *Overzicht van sproeidrooginstallaties aanwezig bij de Nederlandse zuivelindustrie en de resultaten van de telefonische enquête.*

Bedrijf en contactpersoon	Drogers in bedrijf	Product	Poeder-productie (kg/ uur)	Recuperatie op uitlaat lucht	WKK in bedrijf	WKK onderzocht, nog <u>niet</u> toegepast	Interesse in ABC
CONO, Middenbeemster Dhr. Frikkee	Bouwt STORK droger	Wei	2.500	nee	nee	ja	Odhh ¹⁾
CMU, Veghel Dhr. Spitshuis	4 NIRO 2 Filtermat	Caseïnes Speciaal-producten	1.500 1.500	deels geen	ja	nee	Odhh
FCDF groep, Dhr. Willems (Leeuwarden)							Ja
<i>Workum</i> Dhr. Messendorp	1 APV	WPC en Permeaat	2.500	nee	nee	ja	Odhh
<i>Bedum</i> Dhr. Messendorp	1 NIRO 1 APV	Weideriv.	2.200 2.200	nee	nee	ja	Odhh
<i>Beilen</i> Dhr. Hoeksema ²⁾	2 NIRO 1 APV 1 NIRO 1 STORK	Weideriv. Melk Melk Melk	1.000 3.000 3.500 6.000	nee	ja	-	-
<i>Gerkesklooster</i> Dhr. Havinga	1 NIRO 1 APV	Wei	2.2.00 1.100	nee	nee	nee	Nee
<i>Leeuwarden</i> Dhr. Zuidema	3 NIRO 1 STORK 1 CCF 1 CCF	Melk Diversen Diversen Diversen	2.000 2.000 2.000 600	nee	ja	-	Nee
<i>Lochem</i> Dhr. Drent	1 NIRO 1 APV 2 NIRO 1 APV	Melk Melk Melk Melk	1.200 2.500 7.000 2.500	nee	ja	-	Nee
<i>Borculo</i> Dhr. Weernink	4 STORK 2 platbodem 2 Filtermat	Wei + derivaten	1.600 – 3.800 1.400 3800- 4500	nee	ja	-	Ja
<i>Oosterwolde</i> Dhr. Betten	1 APV	Wei	2.500	nee	nee	ja	Nee
<i>Dronrijp</i> Dhr. Messendorp	1 NIRO	Wei	2.000	nee	nee	ja	Nee
<i>Meppel (de Kievit)</i> Dhr v.d. Akker	1 APV 2 Filtermat 1 Filtermat	Speciaal producten	3.000 2.500 5.000	nee	nee	ja	Nee

Bedrijf en contactpersoon	Drogers bedrijf	in Product	Poeder- productie (kg/ uur)	Recupe- ratie op uitlaat lucht	WKK bedrijf	in WKK onderzocht, nog <u>niet</u> toegepast	Interesse in ABC
Nestlé groep , Dhr Klein (Diemen)							Nee
<i>Gorinchem</i>	2 EGRON 1 NIRO	Melk	2.000 2.500	nee	Nee	ja	Nee
Scharsterbrug	2 EGRON	Melk	2.200	nee	Nee	ja	Nee
Nunspeet	1 EGRON 1 NIRO	Speciaal producten	2.000 1.500	nee	Nee	ja	
DOC, Hoogeveen Dhr v. Willigenburg	1 APV, plan voor nieuw	Wei	1.700	nee	Ja	-	Nee
Nutricia , <i>Cuijk</i> Dhr. Hols	2 NIRO	Speciaal- producten	1.000	ja	nee	ja	Nee
Nutricia, <i>Kampen</i> Dhr. Stoel	1 STORK 1 APV	Speciaal producten	- 2.400 2.000	ja	nee	ja	ja
NIZO food research Ede	2 NIRO	Diverse producten	25 250	nee	nee	n.v.t	n.v.t.
Sloten bv, Sloten Dhr. Rouwers	2 CCF 1 CCF	Speciaal producten	3.000 2.000	ja	nee	ja	nee
Mead Johnson, Nijmegen* Dhr. Baars	2 NIRO	Speciaal producten	1.400	nee	nee	nee	ja
Abott, Zwolle* Dhr. Flinkert ²⁾	1 NIRO	Speciaal producten	2.700	-	-	-	-

1) geen directe interesse, wel **odhh** (op de hoogte houden)

2) nog niet gesproken, onbereikbaar of ziek

* wordt niet tot zuivelindustrie gerekend [5]

Zoals in Tabel 6 is te zien worden door een aantal bedrijven al energiebesparende maatregelen genomen t.b.v. het droogproces zoals recuperatie van de uitlaatlucht of het gebruik van warmtekrachtkoppeling (waarbij de gegenereerde stoom wordt gebruikt om de inlaatlucht te verwarmen).

Er zijn echter ook veel bedrijven die deze maatregelen niet hebben genomen. Hiervoor worden veel verschillende redenen genoemd, te weten:

- elektriciteit is te goedkoop om nu zelf op te gaan wekken;
- gelijktijdigheidsfactor (verhouding elektriciteit en warmte) WKK ongunstig voor huidige bedrijfsvoering;
- WKK economisch niet gunstig bij huidige gasprij;
- productie is te fluctuerend voor rendabele WKK;
- terugverdientijd voor WKK is 15 jaar, dus niet rendabel;
- recuperatie uitlaatlucht alleen lonend indien subsidie wordt verleend;
- recuperatie-unit uitlaatlucht slijt te snel bij zure (wei-) producten;
- het rendement van indirecte gasgestookte warmtewisselaar met ECO is nu al ca. 90 %;

De redenen die worden genoemd om geen energiebesparende maatregelen te nemen zijn dus vooral economisch van aard.

Het energieverbruik voor droogprocessen (alleen het energieverbruik van drooginstallaties) in de Nederlandse zuivelindustrie kan worden geschat aan de hand van de gegevens uit Tabel 6 en gebruik makend van de volgende aannamen:

- weiprodukten worden aan de sproeidrogers aangeboden met 60 % droge stof;
- melk- en speciaalproducten worden aan de sproeidrogers aangeboden met 50 % droge stof;
- het specifiek energieverbruik voor drogen is 4,4 MJ/kg waterverdamping;
- bedrijfstijd is 8000 uur per jaar voor weiprodukten, 6500 uur per jaar voor overige producten.

De resultaten van deze schattingen staan weergegeven in Tabel 7.

Tabel 7: *Geschatte jaarlijks energieverbruik voor drogen van zuivelproducten in Nederland (alleen het energieverbruik van de drooginstallaties)*

Productgroep	Poedercapaciteit (kton/jaar)	Waterverwijdering per jaar (kton/jaar)	Energieverbruik per jaar (PJ = 10 ¹⁵ J)
Weiproducten	328	216	0,95
Melkproducten	322	322	1,42
<u>Speciaalproducten</u>	<u>302</u>	<u>302</u>	<u>1,33</u>
Totaal	952	840	3,70

In de in het vorige hoofdstuk gepresenteerde overzichtstabel (Tabel 3) met alle zuivelproducten is wordt eveneens een totale melkpoederproductie gegeven. Opvallend is dat volgens Tabel 3 minder melkpoeder wordt geproduceerd dan volgens Tabel 7. Dit wordt waarschijnlijk verklaard doordat een deel van “diverse producten” uit Tabel 3, in Tabel 7 onder melkproducten wordt gerekend.

3.3 Eisen aan luchtkwaliteit voor droogprocessen in de zuivelindustrie

Drooglucht die wordt gebruikt voor de bereiding van poeder voor menselijke consumptie dient vrij te zijn van stof- en oliedeeltjes en mag ook geen geurstoffen bevatten. Daartoe wordt alleen indirect verhitte drooglucht toegepast, die ook nog wordt gefilterd. Een enkel bedrijf past, voor droging van wei, directe verbranding van aardgas toe.

De filters die worden toegepast om de inlaatlucht te reinigen zijn geplaatst voor de ventilator van de ingaande lucht (dus ook voor de luchtverhitter). In principe verwijderen deze alleen stofdeeltjes. De drukval over deze filters is tot enkele honderden Pa (ca. 100-300 Pa = 10-30 mm waterkolom).

In principe geldt dat hoe hoger de temperatuur is van de ingaande lucht, hoe economischer het droogproces verloopt (grotere drijvende kracht voor waterverwijdering). Er is echter een maximale temperatuur voor de drooglucht, welke wordt bepaald door de zelfontbrandingstemperatuur van de te drogen producten, de gevoeligheid voor hittebeschadiging van producten en het type droger. Voor tweetrapsdrogers geldt in het algemeen voor zuivelproducten een maximale droogluchttemperatuur van 185-200 °C.

3.4 Selectie type sproeidroger en cyclus

3.4.1 Selectie type sproeidroger

In Figuur 8 zijn drie typen drogers gegeven (1, 2, en 3 trapsdroger). De GT-ABC kan hete droge lucht aan de eerste trap leveren. In principe is het mogelijk de lucht voor de tweede en derde droogtrap door een GT-ABC te laten leveren. De temperatuur van de lucht voor de tweede en derde trap kan echter beduidend lager zijn dan voor de eerste. Daarnaast is de afstand tussen het intreepunt van de eerste en eventueel volgende trappen relatief groot. Het lijkt daarom niet zinvol van de GT-ABC een aftakking te maken voor een tweede of derde trap.

3.4.2 Selectie type cyclus

De benodigde luchttemperatuur is ca. 200° C. Volgens Tabel 1 is de temperatuur van een GT-ABC zonder intercooler (278° C) te hoog. Die van een uitvoering met 1 of 2 intercoolers (220° C resp. 210° C) is geschikt voor een droogtoeren. Enige modificaties op de basisontwerpen hiervan zijn nog nodig om de luchttemperatuur precies te laten aansluiten op de gewenste temperatuur.

3.5 Resultaten bedrijfsbezoek

In het kader van dit project is een bezoek gebracht aan Borculo Domo Ingredients (BDI), met 8 sproeidroogtoeren de grootste weiverwerkende locatie ter wereld. Het bezoeksrapport is gegeven in de Appendix 1.

De conclusies uit het bezoek kunnen weergegeven worden in de vorm van randvoorwaarden, positieve aspecten en negatieve aspecten.

Randvoorwaarden

- Geen stofdeeltjes en olie deeltjes in de drooglucht. Over het toegestane niveau is geen definitieve duidelijkheid gekregen. In eerste instantie eist een afnemer een absoluut nulniveau. Doorgaans wordt in de onderhandelingen deze eis genuanceerd tot een minimum waarde;
- Elektriciteitsproductie bij voorkeur lager dan de basis elektriciteitsbehoefte van ca. 6 MWe;
- De gehanteerde terugverdiertijd is 3 jaar.

Positieve aspecten

- BDI is in eerste instantie geïnteresseerd in energie- en kostenbesparing;
- Onzekerheid over het voortbestaan van de warmtekracht centrale, bij uit bedrijf nemen wordt de energiesituatie heroverwogen²;
- Lange bedrijfstijd (8000 uur per jaar);
- Lage drukval over de luchtfilters: indien deze hoog zou zijn zou dit de efficiency van de ABC significant kunnen verlagen;
- De luchtventilatoren worden op normale wijze gesmeerd. Dit is een argument dat pleit voor een makkelijke acceptatie van de GT-ABC.

Negatieve aspecten

- De nabijgelegen warmtekrachtcentrale kan goedkoop en efficiënt stoom leveren;
- Beschikbare ruimte is bij het merendeel van de sproeitoren beperkt;
- De GT-ABC moet op de 5^{de} verdieping geplaatst, of er moet een luchtkanaal van grondniveau naar de 5^{de} verdieping.

3.6 Technische evaluatie

De technische realisatie van een GT-ABC voor de productie van hete lucht in een sproeidroogtoeren is mogelijk. De cyclus levert, met kleine aanpassingen, lucht van de juiste temperatuur. Hiervoor is een GT-ABC met 1 intercooler vereist.

De luchtinlaat van een sproeidroogtoeren zit bovenin, op een hoogte van ca. 15 m. Dit houdt in dat de GT aldaar geplaatst moet worden, of dat een luchtkanaal van grondniveau naar boven geïnstalleerd moet worden. Plaatsing op verhoogd niveau is niet mogelijk op het bestaande

² Naschrift: Tijdens het afronden van dit rapport is bekend geworden dat het faillissement van de warmtekracht centrale is aangevraagd.

frame gezien het hoge gewicht van de GT-ABC. Installatie van een nieuw frame naast het bestaande is mogelijk, maar gecompliceerd i.v.m. mogelijke trillingen. Ook zijn de kosten hiervan significant. Daarom wordt gekozen voor installatie van de GT-ABC op grondniveau, en de installatie van een luchtkanaal boven naar de luchtinlaat van de sproeitoren. Dit laatste leidt tot een enigszins lagere efficiency van de GT-ABC (door de drukval over het kanaal), hogere kosten, en geeft problemen i.v.m. ruimtebeslag.

Op basis van beschikbare ruimte, en vereiste luchttemperatuur en debiet is toren 9 (T9) van BDI de meest voor de hand liggende toren voor plaatsing van een GT-ABC. T9 heeft een behoefte van 60 000 Nm³/hr met een temperatuur van 185° C. Voor deze toren is een GT-ABC op hoofdafmetingen gedimensioneerd. De resultaten zijn samengevat in Tabel 8.

Tabel 8: *Dimensionering GT-ABC voor BDI toren 9*

Parameter	Waarde
<u>In:</u>	
Aardgas	2520 Nm ³ /hr
<u>Uit:</u>	
Lucht	60 000 Nm ³ /hr
Elektriciteit	9,4 MWe
Interkoeling	1,7 MW _{th}
<u>Hoofdafmetingen:</u>	
Gasturbine	7,5 MWe
Air Bottoming Cycle	1,8 MWe
Warmtewisselaar	5300 m ²
Geschatte massa 'rotating equipment'	115000 kg

De hoeveelheid geproduceerde elektriciteit is 9,4 MWe, groter dan het eigen basisverbruik van de BDI site (ca. 6 MWe). Dit is ongunstig omdat de overproductie niet tegen inkoopvergoeding kan worden gewaardeerd. Door de productie van elektriciteit verviervoudigt het aardgasverbruik van 545 Nm³/hr naar 2520 Nm³/hr.

De vereiste gasturbine heeft een elektrisch vermogen van 7,5 MWe. Een mogelijk type is de ABB Alstom Tempest, deze heeft een vermogen van 7,7 MWe. De totale massa rotating equipment is op ruwe wijze geschat aan de hand van de massa van twee maal een Tempest gasturbine-generator package. Deze massa is dusdanig hoog dat verhoogde montage te gecompliceerd wordt. De GT-ABC dient daarom op grondniveau geplaatst te worden, waarbij de hete lucht d.m.v. een luchtkanaal naar de ingang van de sproeidroogtoren geleid worden.

Het benodigde warmtewisselend oppervlak is hoog: 5300 m² (op basis van een veronderstelde warmteoverdrachtscoëfficiënt van 45 W/m²K). Gezien het beperkte beschikbare grondoppervlak zal een compacte (printed circuit) warmtewisselaar gebruikt moeten worden.

Op basis van het elektrisch rendement (42%) van het Nederlandse elektriciteitspark kan een besparingspotentieel t.o.v. gescheiden opwekking van warmte voor hete lucht en elektriciteit worden berekend. Deze bedraagt 126 GJ/jaar, of 18% relatief t.o.v. het oorspronkelijke energieverbruik.

4. TOEPASSING VAN EEN GT-ABC OF GT IN DE BROOD- EN BANKETINDUSTRIE

4.1 Inleiding

Het doel van dit hoofdstuk is na te gaan wat de randvoorwaarden zijn voor het gebruik van de restwarmte van een gasturbine, al dan niet met nageschakelde luchtcyclus, in continu-oven in de brood of banketbakkerij. Aan de hand hiervan zal een evaluatie in technische zin gegeven worden.

Allereerst zal een schets gegeven worden van de bedrijven in de bakkerijsector, aantallen bedrijven, soorten producten en grootte en typen van ovens. Deze ovens zullen getypeerd worden aan de hand van criteria relevant voor de toepassing van een gasturbinecyclus. Vervolgens zal een evaluatie van de geschiktheid van de verschillende oventypes gegeven worden voor de toepassing van gasturbines, al dan niet met nageschakelde luchtcyclus.

4.2 Algemene beschrijving

4.2.1 Typen bedrijven

De bakkerijbranche is ruwweg te splitsen in producenten van *brood* en producenten van *banket*. Er is een aanzienlijk verschil in het management van beide soorten bedrijven: brood is een typisch vers product en wordt niet op voorraad geproduceerd, de meeste vormen van banket, zgn. droog banket, hebben een redelijke houdbaarheid en worden dus meestal op voorraad geproduceerd. Door dat verschil in benadering van de markt komen combinaties, industriële bedrijven met productielijnen voor zowel brood als droog banket, weinig voor. Nat gebak wordt deels vers (b.v. vlaaien), maar vooral als diepvriesproduct op de markt gebracht.

Industriële broodbakkerijen

De industriële broodbakkerijen zijn voornamelijk georganiseerd in drie groepen: Bakkersland, Quality Bakers en Bake Five. Adressen daarvan zijn vermeld in Appendix 4. Deze vorm van organisatie is noodzakelijk om landelijke accounts te verwerven. Een groot deel van de productie wordt namelijk verkocht via landelijk opererende supermarktketens. Quality Bakers maakt sinds kort deel uit van de Duitse Kamps groep. De omzet van deze drie organisaties samen ligt in de orde van Mfl 1.400,- In geld is dat ongeveer de helft van de totale broodmarkt, in volume is hun omzet ca 75 % van het totaal. Het aantal vestigingsplaatsen van deze drie organisaties is ongeveer 50. De meeste van deze bedrijven hebben meer dan één continue oven, geschat wordt het aantal ovens in deze groep op ca 200. Meestal hebben ze de beschikking over ten minste één oven voor grootbrood en één voor kleinbrood.

Slechts een klein deel van deze ovens bakt 24 uur per dag. Meestal is dat de oven waarop grootbrood wordt gebakken. Het aantal bakuren per dag neemt in de week toe. Vrijdag zullen alle ovens op volle capaciteit bakken, zaterdag en zondag wordt niet gebakken. De meeste bakuren zijn nachturen. Dit laatste is ongunstig voor de warmtekrachtoepassingen indien de geproduceerde elektriciteit niet zelf afgenomen kan worden. Dit gezien de lage marktvaart van elektriciteit in de nachtelijke uren.

Industriële banketbakkerijen

Het aantal industriële banketbakkerijen met continue ovens schatten we op ca. 150. De grootste bedrijven in die groep zijn conglomeraten van productie units, zoals Bolletje, Danone (vroeger Liga) , United Biscuits (Verkade) en Haust (Hooimeyer). Deze bedrijven bezitten een groot aantal ovens. De adressen van de grootste bedrijven zijn vermeld in Appendix 5. Het merendeel van de industriële banketbakkerijen zijn echter kleine bedrijven, gespecialiseerd in een paar producten. De meeste bedrijven werken in dagdienst, soms in twee ploegen. In het weekeinde wordt niet geproduceerd. Omdat het inpakken van de producten de meeste arbeid vergt, wordt in de regel vroeg op de dag begonnen met de productie en meestal halverwege de middag gestopt. Daardoor blijft er voldoende tijd om in de dagdienst nog in te pakken.

4.2.2 Typen ovens

Alle industriële continu ovens worden gestookt met aardgas. De bakcapaciteit van de ovens varieert van ca 0,5 ton product per uur voor speciale banketproducten tot ca 3 ton per uur voor grote broodovens. Daarbij hoort een gasverbruik van ca 20 tot 120 m³ aardgas per uur.

De oventemperatuur varieert van ca 260°C voor het bakken van brood tot lager dan 200°C voor een aantal banketproducten, schuim en b.v. voorgebakken brood. Uiteraard bestaan er in de branche allerlei ideeën over hoe een product gebakken moet worden, de grondregels zijn echter als volgt: Bij een product hoort een bepaalde baktijd, de oventemperatuur wordt zo gekozen dat in die tijd het product de juiste kwaliteit krijgt.

De industriële bakkerijovens zijn onder te verdelen in twee hoofdgroepen: direct en indirect gestookte ovens. Direct gestookte ovens vinden we meer in de banketindustrie dan in de broodindustrie, indirect gestookte oven zijn wat meer vertegenwoordigd in de broodbakkerij. Het is niet juist te stellen dat een indirecte oven meer geschikt is voor het bakken van brood dan een directe, en andersom ook niet.

Direct gestookte ovens

Direct gestookte ovens zijn ovens waarin zich onder en boven de transportband op regelmatige afstand staaftbranders bevinden. Dit zijn buizen, die dwars op de transportrichting zijn geplaatst met over de gehele lengte van de buis branderopeningen. In een biscuitoven van grote capaciteit bedraagt het aantal branders vaak meer dan 100. Aan en uit wordt gestuurd via een temperatuursensor per bakzone. Tegenwoordig bestaan er ook modulerende branders. De warmteoverdracht wordt nog vergroot door het rondblazen van de verbrandingslucht in de bakruimte met behulp van ventilatoren.

Bij dit type oven komt het product direct in aanraking met de verbrandingsgassen. Vroeger is veel onderzoek gedaan naar de aanwezigheid van nitrosaminen in producten uit dergelijke ovens. Daarbij is gebleken dat wel de precursors, stikstofoxides, in de oven aanwezig zijn, in de producten is nooit nitrosamine aangetoond.

Voordelen van dit typen ovens zijn de prijs, ze zijn goedkoper dan indirect gestookte ovens, de snelle regelbaarheid en het lagere energieverbruik in vergelijking met indirect gestookte ovens. Ze werken namelijk met een lager temperatuur niveau dan indirect gestookte ovens en dus ook met een lagere rookgastemperatuur.

Indirect gestookte ovens

In indirect gestookte oven wordt de bakruimte verwarmd met behulp van warmtewisselaars, in de vorm van radiatoren. Het meest gebruikte medium in de radiatoren is gas. Dit gas bevat de verbrandingsgassen van een brander. Door het circuleren van een groot deel van dat gas wordt een constante temperatuur bereikt van het deel dat in de bakruimte steekt. Bij kleinere ovens is

er meestal sprake van één centrale brander, bij ovens met een grotere capaciteit wordt wel met twee of meer branders gewerkt.

De voordelen van indirect gestookte ovens zijn de afwezigheid van contact van het product met rookgassen, met daarin alle mogelijkheden van verontreiniging, en het gescheiden afvoeren van bakdampen en rookgassen. Het bakken verloopt rustiger dan in direct gestookte ovens met minder kans op verbranding van de korst.

Sinds enkele tientallen jaren wordt er voor industriële ovens naast gas als verwarmingsmedium ook thermische olie gebruikt. De radiatoren zijn dan gevuld met olie, dit is het z.g. secundaire circuit. In het primaire circuit wordt de olie in een centrale brander op het gewenste hoge temperatuurniveau gehouden. Om de temperatuur in het secundaire circuit op de vereiste, wat lagere waarde te houden wordt voldoende olie van het primaire naar het secundaire circuit gepompt. Het voordeel van olie als verwarmingsmedium is de veel grotere warmte-inhoud in vergelijking met lucht, waardoor schommelingen in de warmtebehoefte wat beter opgevangen worden.

In batchgewijze ovens, vooral in gebruik in de ambachtelijke bakkerij, wordt ook water/stoom toegepast als medium voor de warmteoverdracht. Dit gebeurt in z.g. Perkins-buizen, afgesloten stalen buizen, ook wel ringleidingen, waarin zich water bevindt. De ene kant van de leiding wordt in een vuurhaard verhit, het andere deel steekt in de bakruimte. Rond het kritisch punt van water vindt een snelle vereffening van de warmte plaats en daardoor een goede warmteoverdracht van vuurhaard naar bakruimte. Een groot aantal buizen zorgt voor een gelijkmatige warmteverdeling in de bakruimte. Zoals gezegd wordt dit principe alleen toegepast in ambachtelijke en niet in industriële continu-ovens.

Ook in indirect gestookte ovens wordt de warmteoverdracht in de bakruimte verbeterd door toepassing van geforceerde ventilatie, waarbij de lucht in de oven wordt rondgepompt. Betrekkelijk nieuw is de z.g. impingement oven, waarbij lucht van hoge temperatuur met grote snelheid over de deegstukken wordt geblazen. De hiermee verkregen snelle warmteoverdracht is belangrijk voor de bakkwaliteit. Dit type oven wordt steeds populairder.

4.3 Overzicht industriële bakkerijen in Nederland

Industriële broodbakkerijen

Een meerderheid van de Nederlanders koopt zijn/haar brood in de supermarkt, samen met warenhuizen hebben retailers een marktaandeel van 67,4%.

De industriële markt wordt in Nederland beheerst door een drietal organisaties te weten:

- Bakkersland
- Quality bakers
- Bake-five

Bakkersland heeft met een omzet van 600 miljoen het grootste aandeel in deze markt.

Quality bakers is tweede met een omzet van 400 miljoen en de relatief jonge groep Bake-five is runner up met een omzet van 350 miljoen.

Bakkersland is, na het opheffen van de SABA, ontstaan door een fusie van een tiental regionaal opererende ondernemingen met een totaal van 18 bakkerijen. Bij de Bakkersland-bakkerijen werken in totaal ca. 2300 mensen.

Quality bakers is een zuster bedrijf van Meneba en maakt deel uit van de holding Maxeres NV in Den-Haag. Quality bakers Europe bestaat uit 9 eigen bakkerijen, waaronder één in Frankrijk plus 10 samenwerkende bakkerijen.

Bake-Five is net als Bakkersland ontstaan uit SABA, welke werd opgeheven per 31 december 1997, de ondernemingen zijn net als in de andere groepen verdeeld over het hele land, met

uitzondering van de provincies Zeeland en Limburg. Het aantal ondernemingen dat aangesloten is bij de Bake-five is op het moment 15. Bij de gezamenlijke bakkerijen zijn momenteel ca. 1200 mensen werkzaam.

Een lijst met aangesloten bedrijven, adressen en contactpersonen is gegeven in Appendix 4.

Industriële banketbakkerijen

In samenspraak met de Vereniging voor de Bakkerij- en Zoetwarenindustrie is een lijst samengesteld van de belangrijkste bakkerijen die voor het project in aanmerking komen. Deze lijst is gegeven in Tabel 9. Additionele info over deze bedrijven (adressen, telefoonnummers en e-mailadressen) is gegeven in Appendix 5.

Tabel 9: *Bedrijven die in aanmerking komen voor demonstratie van een gasturbinecyclus*

Bedrijf	Vestigingsplaats
Bolletje b.v.	Almelo
General Biscuits Nederland b.v.	Dordrecht
Haust b.v.	Barendrecht
United Biscuits	Amsterdam
Kon.Peijnenburg's koekfabrieken b.v.	Geldrop
Banketbakkerij Ravensbergen b.v.	Sassenheim
De Aviateur Banketbakkerijen b.v.	Broek op Langendijk
Daelmans Banket b.v.	Nieuwkuijk
Vast Banket b.v.	Middelstum

4.4 Eisen te stellen aan de atmosfeer in de oven

Bij deze vraagstelling moeten we een onderscheid maken tussen direct en indirect gestookte ovens. Bij de laatste categorie maakt het niet uit of lucht verontreinigingen bevat: bij een indirect gestookte oven is er geen contact tussen rookgassen en product. Bij direct gestookte ovens is er wel contact en dienen er eisen gesteld te worden aan de zuiverheid van de rookgassen. De belangrijkste eisen gelden de aanwezigheid van minerale oliën b.v. van smeerpunten en het voorkomen van NO_x. Wat betreft de aanwezigheid van minerale olie in rookgassen zijn geen vastgelegde eisen bekend. NO_x in rookgassen wordt in verband gebracht met nitrosaminen in producten. In een door TNO uitgevoerd oriënterend onderzoek naar de aanwezigheid van nitrosaminen in bakproducten uit direct gestookte ovens is gebleken dat nitrosaminen niet aantoonbaar waren (detectiegrens 0,2-1,2 µg per kg). De gehalten aan NO_x in de rookgassen waren maximaal 25 mg/kg. Dit lijkt daarom ook een redelijke eis voor de rookgassen uit de gasturbine. Dit komt overeen met een concentratie NO_x van 14 ppm. Dit is een relatief lage waarde, welke alleen door gasturbines met extreem lage NO_x emissies gehaald worden. Gasturbinemodellen met voldoende lage NO_x emissie zijn de Capstone 330 (30 kWe) en de OPRA OP16 (1600 kWe). Overigens wordt door verscheidene gasturbinefabrikanten aangegeven dat zij branders gaan ontwikkelen met extreem lage NO_x emissies.

4.5 Resultaten bedrijfsbezoeken

In het kader van dit project is een bezoek gebracht aan de Kaak groep, een fabrikant van brood- en banketovens en aan Bolletje B.V. een producent van diverse banketproducten. De bezoekersrapporten zijn gegeven in de Appendix 2 en 3.

De conclusies uit het bezoek worden weergegeven in de vorm van randvoorwaarden, positieve aspecten en negatieve aspecten.

Randvoorwaarden

- Bij de toepassing van een GT-ABC, dan wel GT is de medewerking van de ovenproducenten Kaak of den Boer vereist;
- Bij het bakken van beschuiten wordt een bakcurve aangelegd. De temperatuur in de oven is niet overal gelijk waardoor de beschuiten die door de oven gaan een temperatuurtraject ondergaan;
- Bij directe ovens is stralingsoverdracht belangrijk voor kleuring van het product;
- Voor een indirecte oven met thermische olie dient de olietemperatuur 320° C te zijn, de temperatuur van de afgassen van de prime mover moeten daarom nog weer hoger liggen, de bandtemperatuur in de oven moet 280-300° C bedragen;
- Beschikbare ruimte is vaak een kritisch item;
- Investeringsomvang moet beneden de half miljoen Euro liggen.

Positieve aspecten

- Kaak is het meest positief over de combinatie van een thermische olie gestookte oven in combinatie met een gasturbine zonder nageschakelde luchtcyclus;
- Retrofit van bestaande ovens is mogelijk, echter alleen bij indirect thermische olie gestookte ovens;
- Bij Bolletje is er een positieve grondhouding voor energiebesparingsprojecten, hieraan is recentelijk nog veel aandacht besteed.

Negatieve aspecten

- De bakindustrie is een conservatieve markt die meer gericht is op het beheersen van het bakproces dan op energiebesparing;
- Er zijn bij veel ovens nog voor de hand liggende besparingsopties als warmteterugwinning uit rookgassen.

4.6 Selectie type oven en cyclus

In het onderstaande zal per oventype een evaluatie gegeven worden van de geschiktheid van een gasturbine met air bottoming cyclus (GT-ABC) en andere gasturbinecycli voor dit oventype.

4.6.1 Basissystemen

Direct gestookte oven met GT-ABC

Basisstelsysteem 1 is een GT-ABC voor een direct gestookte oven

Bij het vervangen van de branders door een GT-ABC rijzen een drietal complicaties:

1. De vereiste oventemperatuur ligt tussen de 200 en 300° C. De GT-ABC levert temperaturen van 210° C (2 intercoolers) en 278° C (geen intercooler). Afstemming van het type GT-ABC op het oventype is daarom vereist. In sommige gevallen is geen geschikte GT-ABC beschikbaar of moeten modificaties aan oven of GT-ABC gemaakt worden.
2. Bij het vervangen van de branders van een direct gestookte oven door een GT-ABC wordt de warmteoverdrachtshuishouding beïnvloed. Naast de aanwezigheid van convectieve overdracht zorgen de branders in een direct gestookte oven voor een hoge warmtestraling direct op de producten. Een GT-ABC is in staat dezelfde hoeveelheid warmte (hoeveelheid MJ) te leveren. Deze warmte wordt echter bijna uitsluitend geleverd door convectieve warmteoverdracht. De hoeveelheid stralingswarmteoverdracht is van groot belang voor de productkwaliteit. Met name kleuring van het product wordt hierdoor beïnvloed
In ovens wordt doorgaans een temperatuurprofiel aangelegd om dit de gewenste productkwaliteit te bereiken. Het gebruik van een GT-ABC zal leiden tot een totaal ander temperatuurprofiel, wat de productkwaliteit kan beïnvloeden.

Het is geenszins gezegd dat met een GT-ABC niet dezelfde productkwaliteit behaald zou kunnen worden als met een direct gestookte oven. Om dit te bereiken is echter een significante onderzoeks- en ontwikkelingsinspanning nodig.

Daarnaast zal de industrie reserveringen hebben tegenover veranderingen in het bakproces. Een nieuw systeem zal significante voordelen moeten hebben om dit te compenseren.

3. Ten slotte vindt, door een verandering van de volumestroom, een verandering plaats in de grootte van de convectieve warmteoverdracht hierop wordt later ingegaan.

Indirect gestookte ovens met GT-ABC

Basissysteem 2 is een GT-ABC voor een indirect gestookte oven met lucht als transportmedium.

Bij een indirect gestookte oven komt het product niet direct in aanraking met de rookgassen, maar wordt de warmte via een warmtewisselaar overgedragen.

In dit geval heeft het feit dat de GT-ABC lucht levert in plaats van rookgassen geen meerwaarde. Het voordeel van een GT-ABC boven een GT is het hogere elektrische rendement. De meerwaarde van de investering in de warmtewisselaar en bottoming cycle moeten opwegen tegen de meer geproduceerde elektriciteit.

Voor de GT-ABC bij een dergelijke indirect gestookte oven zijn aanpassingen nodig aan de oven. De lucht van de GT-ABC wordt als warmteoverdragend medium gebruikt. Omdat de luchttemperatuur van een GT-ABC aanzienlijk lager is dan de rookgassen van een indirect gestookte oven is de warmteflux per hoeveelheid warmteoverdragend oppervlak veel lager. Om de vereiste warmte over te dragen moet daarom het warmtewisselend oppervlak vergroot worden. Aanpassingen aan de oven zijn dus een vereiste.

Basissysteem 2 is een GT-ABC voor een indirect gestookte oven met thermische olie als warmtetransport medium.

Bij een indirect gestookte oven met thermische olie als tussenmedium zijn aan de oven zelf geen aanpassingen vereist. Enkel de heater waarin de olie verwarmd wordt dient te worden aangepast. Een nieuwe heater dient ontworpen te worden met een groter warmteoverdragend oppervlak dan de oorspronkelijke heater, dit omdat het temperatuurverschil over de heater bij een GT-ABC veel lager is dan bij een direct gestookte heater.

4.6.2 Alternatieve systemen

In bovenstaande paragraaf is een kwalitatieve evaluatie gemaakt van een gasturbine met nageschakelde cyclus (GT-ABC). Voor de bovenstaande voorgestelde configuraties (hier nogmaals vermeld als basissystemen) bestaan echter alternatieven welke hieronder kort en kwalitatief geëvalueerd zullen worden.

Direct gestookte ovens

Basissysteem 1 : GT-ABC voorziet de oven geheel in zijn warmtebehoefte

Alternatief 1 : GT voorziet de oven geheel in zijn warmtebehoefte.

Hierbij komen de producten rechtstreeks in aanraking met de rookgassen. Deze optie stelt daarom eisen aan de rookgaskwaliteit. Daarnaast gelden dezelfde complicaties door beïnvloeding van de warmteoverdracht als bij toepassing van een GT-ABC.

Alternatief 2 : GT-ABC levert voorverwarmde lucht voor de branders

De aanpassingen aan de oven zelf zijn klein. Met dit alternatief kan een zelfde bakcurve als in de bestaande situatie aanwezig is aangelegd worden. Het systeem wordt aanzienlijk kleiner dan bij het basissysteem 1. Voor de GT bestaat in principe de keuze uit een gerecupereerde en niet-gerecupereerde variant.

Alternatief 3 : GT levert voorverwarmde (verarmde) lucht voor de branders

Zie alternatief 2. Bij de keuze tussen GT-ABC moeten de meerinvestering in de warmtewisselaar en bottoming cycle worden afgewogen tegen de meeropbrengst in elektriciteit.

Indirect gestookte ovens

Basissysteem 2 : GT-ABC levert lucht dat als warmteoverdragend medium dienst doet

Alternatief 4 : GT levert rookgassen die als warmteoverdragend medium dienst doen

Bij niet-gerecupereerde gasturbines is de rookgastemperatuur significant hoger dan bij de GT-ABC. Deze temperatuur ligt enigszins hoger (ca. 575° C) dan de bestaande temperatuur (450° C). Wellicht zijn er geen aanpassingen aan de oven noodzakelijk. De invloed op de productkwaliteit zal zeer beperkt gehouden kunnen worden.

Bij gerecupereerde GT's ligt de uitlaattemperatuur in dezelfde range als de GT-ABC. In dat geval heeft een gerecupereerde gasturbine het voordeel van lagere investeringen, maar een lager rendement

Alternatief 5 : GT levert voorverwarmde lucht voor branders

Zie alternatief 1. De invloed op de productkwaliteit zal zeer beperkt gehouden kunnen worden.

Basissysteem 3 : Indirect gestookte oven met thermische olie als warmtetransportmedium en GT-ABC als warmtebron voor de heater.

Alternatief 6 : GT i.p.v. GT-ABC als heater

Bij niet-gerecupereerde gasturbines is de rookgastemperatuur significant hoger dan bij de GT-ABC. Deze temperatuur ligt enigszins hoger (ca. 575° C) dan de bestaande temperatuur (450° C). De benodigde heater zal kleiner zijn dan bij de GT-ABC, doch groter dan in een standaard oven. Invloed op de productkwaliteit is er niet.

Bij gerecupereerde GT's ligt de uitlaattemperatuur in dezelfde range als de GT-ABC. In dat geval heeft een gerecupereerde gasturbine het voordeel van lagere investeringen, maar een lager rendement.

Alternatief 7 : GT levert voorverwarmde lucht voor branders van de heater.

Dit kan als modificatie uitgevoerd worden van de bestaande heater. De GT zal relatief klein zijn. Invloed op de productkwaliteit is er niet.

4.6.3 Selectie configuraties verdere evaluatie

De opties waarbij enkel voorverwarmde lucht voor de branders geleverd wordt leveren naar verwachting te weinig elektriciteit. De overige opties zullen wel verder geëvalueerd worden.

4.7 Technische evaluatie

4.7.1 Warmtebehoefte van een oven

In deze paragraaf wordt een globaal overzicht gegeven van de warmte, die nodig is voor het bakken van een product, de verliezen in een oven en de temperaturen die bij het bakken nodig zijn. Het heeft meer het karakter van een model om tot een berekening van de rentabiliteit van warmte-kracht koppeling te komen dan dat het een bestaande situatie beschrijft.

De warmte die voor het bakken nodig is, varieert uiteraard met het product. De schommelingen daarin per product per kg zijn echter niet zo erg groot. De energie is nodig voor het verwarmen van het deeg van ca 25 tot 100 °C, het verdampen van vocht, meestal tussen 10% en 20% van de totale massa, en het verder opwarmen van de droge korst, bij droge producten het gehele product, tot b.v. 180°C, waardoor het product verder kleurt (Maillard reactie en caramelisatie). In vochtrijke producten is de soortelijke warmte hoog (b.v. brood 2,7 ten opzichte van een spritsdeeg, ca 2,0 kJ/kg°C), in andere producten is het inbakverlies wat groter, b.v. in schuim en weer andere producten moeten wat sterker kleuren, waardoor dat gedeelte van het bakproces wat meer energie vraagt. Brood is wat energieverbruik tijdens het bakken betreft een tamelijk gemiddeld product. Ook omdat het een groot aandeel in de totale bakmarkt heeft, nemen we brood als voorbeeld. Het warmteverbruik tijdens het bakken, d.w.z. het deel van de warmte dat het product nodig heeft, ligt voor brood in de orde van 500 kJ per kg deeg, waarvan ca 50% gebruikt wordt voor het verdampen van vocht. Ongeveer evenzoveel warmte, 500 kJ per kg deeg, zijn ovenverliezen, d.w.z. lekverliezen en verliezen door het opwarmen van blikmateriaal, ovenband, etc. Daarnaast gaat energie verloren via de schoorsteen. Ook dit stellen we op 500kJ per kg deeg. In totaal komen we zo op 1500 kJ aan energie voor het bakken van 1 kg deeg.

Onderstaand is een voorbeeldberekening gegeven (Tabel 10) voor een indirect gestookte oven met daarvan afgeleid de situatie voor een direct gestookte oven:

Tabel 10: *Rekenvoorbeeld: Gaasmatoven, indirect gestookt.*

Uitgangspunten

Specificaties

- Bakoppervlak 1,65 * 15 meter.
- Gaasmat 12 kg per m³
- Wandoppervlak 90 m²
- Oveninhoud 540 busbroden van 800 gram

Procesgegevens

- Verbrandingswaarde Gronings aardgas (LHV) 31,669 MJ/m³
- Baktijd 32 min.
- Uurproductie 60/32 * 540 = 1012 broden = 11,24 balen
- 1 ton deeg per uur komt overeen met ca 12,5 balen

Resultaat

Benodigde warmte voor het bakken van 90 busbroden (1 baal bloem van 50 kg)

- deeg	34,90 MJ
- blikken	6,55 „
- gaasmat (4 m ²)	2,30 „
- stoomtoevoer	6,78 „
- verdamping condensaat	3,62 „
<u>- wandverlies</u>	<u>5,85 „</u>
Totaal	60,00 MJ

Direct gestookte oven

Bij een schoorsteenverlies van 50%, reëel bij een direct gestookte oven, is voor het bakken van 90 busbroden nodig: $60 / (0,50 * 31,669) = 3,79 \text{ m}^3$ aardgas.

Voor het bakken van 1 ton deeg per uur komt dit overeen met 12,5 balen * 3,79 * 31,669: ca. 1500 MJ.

Indirect gestookte oven

Bij een schoorsteenverlies van 25%, reëel voor een indirect gestookte oven, is voor het bakken van 90 busbroden nodig: $60 / (0,75 * 31,669) = 2,52 \text{ m}^3$ aardgas.

Voor het bakken van 1 ton deeg per uur komt dit overeen met $12,5 \text{ balen} * 2,52 * 31,669$: ca. 1000 MJ.

Praktijkmetingen aan vergelijkbare ovens staven deze berekening. Zie hiervoor Appendix 6.

In dit rekenvoorbeeld zal het gasverbruik in een direct gestookte oven voor het bakken van 1 ton deeg per uur $1000 : 31,669 = 31,6 \text{ m}^3/\text{hr}$ zijn, en voor een indirect gestookte oven $1500 : 31,669 = 47,4 \text{ m}^3/\text{hr}$. Dit is in redelijke overeenstemming met de praktijk. Dit geldt dus voor een gangbaar, gemiddeld product in een praktijk oven. Uit bovengegeven berekeningen volgt voor een indirect gestookte oven een hoeveelheid rookgassen van 1050 m^3 per ton deeg en voor een direct gestookte oven 3300 m^3 per ton deeg.

Ook de temperaturen die bij het opstellen van een dergelijk energiebalans een rol spelen variëren per product. In een droogoven voor beschuit of schuim is het temperatuurniveau veel lager dan in een oven voor shoarmabroodjes, om de uitersten maar eens te noemen. Daarom beperken we ons ook hier tot brood. De oventemperatuur ligt daarbij in de buurt van 250°C . In een direct gestookte oven wordt die temperatuur bereikt door de warmteafgifte van de branders, een combinatie van (veel) straling en gedwongen convectie. Uit de schoorsteen verdwijnt een mengsel van rookgassen en bakdampen van ruim 200°C .

In een indirect gestookte oven wordt de baktemperatuur bereikt door de temperatuur van de warmtewisselaars of radiatoren. Die zal veelal rond 300°C liggen. Dit is enigszins afhankelijk van het medium, verbrandingsgassen of thermische olie. Thermische olie in dit secundaire circuit heeft meestal een temperatuur van 300°C , in het primaire circuit is dit wat hoger. De temperatuureis, die aan de verbrandingslucht wordt gesteld verschilt niet veel of direct of via thermische olie wordt verwarmd: ca 350°C . In een indirect gestookte oven zijn de afvoer van rookgassen en bakdampen gescheiden. De temperatuur van de rookgassen bedraagt ca. 200°C , bakdampen zijn lager in temperatuur.

4.7.2 Berekening hoofdafmetingen en besparingspotentieel per oven

Bij de berekening van de hoofdafmetingen en het besparingspotentieel is zijn de volgende aannamen gedaan:

- Fysische parameters afkomstig uit [12] en [13];
- Elektrische efficiency gasturbine is 23%;
- Temperatuur uitlaat oven 200°C ;
- Stoichiometrische factor gasturbine 3.5;
- Capaciteit oven: 1 ton deeg/hr;
- Data GT-ABC volgens Korobitsyn [1] op basis van Allison GT zonder intercooler;
- Omgevingstemperatuur 25°C ;
- Rendement elektriciteitspark 42%.

Direct gestookte oven

Op basis van de het hierboven berekende warmteverbruik en de berekeningsresultaten van Korobitsyn zijn de hoofdafmetingen berekend van een direct gestookte oven met een niet-gerecupereerde gasturbine, met een elektrische efficiency van 23% LHV. De resultaten zijn samengevat in Tabel 11.

In de berekeningen zijn de schoorsteenverliezen niet langer afgeschat als percentage maar uitgerekend m.b.v. de massaflow rookgassen. De gebruikte warmtebehoefte (gasverbruik) voor

het bakproces wijkt hierdoor enigszins af van die berekend in 4.7.1, maar is daarmee wel in overeenstemming.

Tabel 11: *Resultaten berekening direct gestookte oven met GT-ABC en GT, 1 ton deeg/hr*

		Oorspronkelijk	GT-ABC	GT
Luchtvermaat factor	[-]	7	-	3,5
Temperatuur ingang oven	[° C]	-	278	505
Volumeflow ingang oven	[m ³ /s]	2,1	4,1	1,2
Volumeflow uitgang oven	[m ³ /s]	1,6	3,5	0,7
Gasverbruik	[Nm ³ /hr]	53	237	46
Elektriciteitproductie	[kWe]	-	879	93
Energie voor oven	[kW]	194	194	194
Schoorsteenverliezen	[kW]	271	483+436	118
Besparing primaire energie	[%]	-	20%	41%

Wat opvalt bij de vergelijking tussen de GT en het de oorspronkelijke oven is dat het gasverbruik lager is, terwijl er additioneel elektriciteit verbruikt wordt. De reden hiervoor is dat de luchtvermaat bij de oorspronkelijke oven veel hoger is. Hierdoor zijn de schoorsteenverliezen veel hoger. De vraag die dan vervolgens rijst is of een dergelijk lage luchtvermaat acceptabel is. Als deze acceptabel is dan kan de prestatie van de oorspronkelijke oven ook aanzienlijk verbeterd worden door de luchtvermaat te verlagen. Het nieuwe systeem dient dan ook vervolgens met dit ovenontwerp vergeleken te worden.

De GT-ABC heeft een lager besparingspercentage dan de GT optie omdat deze minder goed gebruik maakt van de warmte beschikbaar in de afgassen.

Uit Tabel 11 blijkt dat de volumeflows sterk verschillen. Dit heeft invloed op de warmteoverdracht. Naar de invloed hiervan is verder studie noodzakelijk.

Een GT-ABC voor een direct oven levert typisch 880 kWe, een GT voor een direct oven 97 kWe. Die laatste is in de orde grootte van het elektriciteitsverbruik van de locatie van een bakkerij.

Indirect gestookte oven

Op analoge wijze als bij de direct gestookte ovens kan een efficiencyberekening uitgevoerd worden aan indirect gestookte ovens. Gekozen is voor een grove rekenwijze waarbij de oven als black-box beschouwd wordt met één overall luchtvermaat. De oven is dus niet rekentechnisch opgesplitst in een hete en een koude kant. De schoorsteentemperaturen van rookgassen en bakdampen zijn gelijk verondersteld. De resultaten gelden zowel voor lucht als voor thermische olie als warmteoverdragend medium. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 12.

Tabel 12: Resultaten berekening indirect gestookte oven met GT-ABC en GT, 1 ton deeg/hr

		Oorspronkelijk	GT-ABC	GT
Luchtovermaat factor	[-]	2,5	-	3,5
Temperatuur Oven In	[° C]	-	278	505
Gasverbruik	[Nm ³ /hr]	28	209	46
Elektriciteitproductie	[kWe]	-	897	93
Energie voor oven	[kW]	194	194	194
Schoorsteenverliezen	[kW]	51	483+436	118
Besparing primaire energie	[%]	-	12%	13%

De besparingspotentiëlen van GT en GT-ABC zijn vrijwel gelijk. De berekende besparingspotentiëlen zijn lager dan bij de direct gestookte ovens door de lagere luchtovermaat in het oorspronkelijke ontwerp. Door de relatief hoge schoorsteentemperatuur en de relatief grote luchtovermaat van gasturbines is de besparing op primaire energie relatief laag in vergelijking met andere warmte-kracht technologieën.

5. ECONOMISCHE EVALUATIE

De economische evaluatie van een GT-ABC wordt uitgevoerd aan de hand van een case: toepassing van een GT-ABC voor de productie van elektriciteit en hete lucht bij een sproeidroogtoren.

Op basis van de berekening van de hoofdafmetingen van de GT-ABC is een investeringsschatting gedaan voor de installatie. Uitgangspunt hierbij is geweest een realistische middenschatting te geven. Diverse opslagpercentages zijn lager genomen dan gebruikelijk vanwege het feit dat in de prijs van de gasturbines al veel services (engineering, constructie etc.) zijn inbegrepen. De bottoming cycle is geschat op basis van de kosten van de topping cycle. Door deze cycle gaat een gelijke tot 33% lagere volumeflow, en de drukverhouding is ca. de helft van de topping cycle (Zij Bijlage 7). Daarnaast is de maximale temperatuur lager. Op basis hiervan wordt geschat dat de bottoming cycle 33% goedkoper is als de topping cycle. Dit geldt niet voor de eerste serie omdat hiervoor nog engineeringkosten in rekening gebracht moeten worden. Deze zijn niet meegenomen. De resultaten van de investeringsschatting staan samengevat in Tabel 13. De volledige berekening is gegeven in de Appendix 7.

Tabel 13: *Resultaten investeringsschatting*

Resultaten investeringsschatting	M€
Kosten rotating equipment	4,9
<u>Kosten warmtewisselaar</u>	<u>0,9</u>
Kosten procesapparatuur	5,8
Totale directe investeringen (Piping, installatie, electrical etc)	8,0
Totale indirecte investering (Engineering, construction etc.)	<u>1,7</u>
Totale procesinvestering	10,0 M€

Op basis van de totale procesinvestering is de terugverdientijd van de installatie te berekenen. De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in Tabel 14. De totale procesinvestering bedraagt 10,0 miljoen Euro. De grootte van dit bedrag is te groot om door de het bedrijf zelf op te brengen. Voor realisatie zijn daarom externe financiers, of het moederbedrijf noodzakelijk. De specifieke procesinvestering is 1070 €/kWe.

Bij de berekening van de terugverdientijd is er van uitgegaan dat alle elektriciteit voor eigen gebruik aangewend kan worden, en daarom tegen inkoopstarief gewaardeerd. Uit Hoofdstuk 3 blijkt dat dit maar voor tweederde het geval is. Elektriciteit is gewaardeerd tegen een prijs van 8,35 €cent, hetgeen hoogstwaarschijnlijk aan de hoge kant is. Er is geen rekening gehouden met het feit dat indien de installatie uit bedrijf is stroom tegen een tarief hoger dan het huidige tarief ingekocht moet worden. De bedrijfstijd is geschat op 7000 uren per jaar vol vermogen, de gehanteerde afschrijvingstermijn is 10 jaar. De gehanteerde winstopslag is 10% boven op het totaal gebonden kapitaal. Kosten voor tussenkoeling zijn niet in rekening gebracht. De resultaten van de economische berekening zijn gegeven in Tabel 14. De terugverdientijd is niet binnen de gestelde grens van 3 jaar, maar ligt daar, mede gezien de nauwkeurigheid van de berekening met 3,6 jaar voldoende dicht deze grens bij om een nadere beschouwing van het systeem te rechtvaardigen. De geproduceerde elektriciteit heeft een voldoende lage kostplusprijs (= kostprijs + winstopslag) om de productie te rechtvaardigen.

Tabel 14: *Resultaten economische berekening*

Resultaten proceseconomie	K€jaar
Variabele kosten (additioneel gasverbruik)	2,1
<u>Vaste kosten</u>	<u>0,3</u>
Totaal	2,4
<u>Opbrengsten</u>	
Elektriciteit	5,5
Terugverdientijd	3,6 jaar
Afschrijvingen	1,0
Winstopslag	1,1
Kostplusprijs elektriciteit	0,073 €kWh

6. CONCLUSIES

6.1 Conclusies m.b.t. zuivelindustrie

- Een inventarisatie van sproeidroogtoeren in Nederland laat ca. 22 mogelijke locaties voor toepassing zien, veelal met meerdere sproeitorens. Hiervan geeft ca. een kwart aan interesse te hebben, en een kwart wil op de hoogte gehouden worden.
- Het totale energieverbruik van sproeidroogtoeren in Nederland bedraagt ca. 3,7 PJ.
- In de nieuwe meerjarenafspraken in de zuivelbranche worden per bedrijf een energiebesparingsplan opgesteld dat dient te worden goedgekeurd door Novem.
- De hygiënische eisen aan melkpoeder zijn zeer hoog, afnemers eisen strenge voorzorgsmaatregelen. Over mogelijke olievervuiling kan geen uitsluitsel worden gegeven omdat de grens hiervoor een resultaat is van onderhandelingen met de afnemer.
- De GT-ABC is in staat lucht te leveren met de kwaliteit (stof, flow, temperatuur, druk) die vereist is voor toepassing bij een sproeidroogtoeren. Het geselecteerde type is dan een GT-ABC met 1 intercooler. Enige aanpassingen voor precieze afstemming van de temperatuur zijn nodig.
- Een GT-ABC voor een typische sproeidroogtoeren levert 9,4 MW elektriciteit, wat ruim een derde hoger is dan het elektrisch verbruik van de bijbehorende locatie. Een tweede GT-ABC op dezelfde locatie moet daarom elektriciteit terugleveren aan het elektriciteitsnet.
- De besparing aan primaire energie van een GT-ABC bij een sproeidroogtoeren bedraagt 18%.
- De massa van de GT-ABC is te groot voor verhoogde plaatsing. Plaatsing op de grondniveau met een luchtkanaal naar de luchtingang boven op de sproeidroogtoeren is wel mogelijk.
- De investering voor een GT-ABC in de zuivelindustrie is typisch 1070 €/kWe. De absolute investering voor een GT-ABC bij een sproeidroogtoeren is 10.0 M€. Een investering van een GT-ABC is te hoog om door het bedrijf zelf op te brengen. Een externe financier of financiering door het moederbedrijf is noodzakelijk.
- De terugverdientijd is berekend op basis van waardering van alle geproduceerde elektriciteit volgens het inkoop tarief en de geschatte investering. Met deze gegevens wordt een terugverdientijd gevonden van 3,6 jaar. Dit is hoger dan het gehanteerde criterium voor investeringen, maar voldoende dicht bij het criterium om een nadere beschouwing van het systeem te rechtvaardigen.

6.2 Conclusies m.b.t. bakkerijen

- Een inventarisatie van Nederlandse bakkerijen laat een negental bedrijven zien in aanmerking komen voor toepassing. Daarnaast zijn er twee Nederlandse ovenfabrikanten. Beide zijn in potentie belangrijke partners voor demonstratie van de GT-ABC.
- Het energieverbruik van de Nederlandse bakkerijbranche bedraagt ca. 3,55 PJ met een totale waarde van 25 Miljoen €. Hiervan is ca. 35% voor bakken.
- De intentieverklaring die de bakkerijbranche had uitgesproken heeft niet geleid tot energiebesparing vanwege de hoge hygiënische eisen. Inmiddels zijn nieuwe onderhandelingen met de overheid gestart.
- Normen voor m.b.t. olieverontreinigingen in brood en banket zijn niet bekend. Hoewel nooit nitrosaminen zijn vastgesteld in de producten bij aanwezigheid van NO_x in de atmosfeer lijkt een grens van 14 ppmV aan NO_x in de rookgassen redelijk.

Direct gestookte ovens

- Voor een direct gestookte oven stuit de toepassing van een GT-ABC op praktische bezwaren. Het bakproces wordt beïnvloed door de sterk verminderde stralingsoverdracht, waardoor onderzoek en ontwikkeling nodig zijn aan ovens om dit effect te ondervangen en de productkwaliteit te behouden.
- Voor direct gestookte ovens is een GT een alternatief voor de GT-ABC. Deze beïnvloedt echter eveneens het bakproces.
- De besparingen op primaire energie door de toepassing van een GT-ABC (20%) of een GT (40%) bij een direct gestookte oven zijn voor een belangrijk deel toe te schrijven aan de lagere luchtvermaat. Er dient te worden nagegaan of een oven kan werken bij deze lagere luchtvermaat. Indien dit het geval is dit een belangrijke mogelijkheid tot energiebesparing en dient de GT-ABC afgezet te worden tegen deze oven en niet de oorspronkelijke oven.
- Een GT-ABC voor een direct oven levert typisch 880 kWe, een GT voor een direct gestookte oven 97 kWe. Die laatste is in de orde grootte van het elektriciteitsverbruik van de locatie van een bakkerij.

Indirect gestookte ovens

- Voor een indirect gestookte oven heeft het feit dat een GT-ABC lucht levert in plaats van rookgassen geen voordeel gezien het feit dat de producten niet in aanraking komen met de afgassen.
- Bij indirect gestookte ovens komt daarom eerder een GT in aanmerking. De besparing op primaire energie van een GT (13%) bij een indirect oven is vergelijkbaar met dat van een GT-ABC (12%). De investeringen voor een GT zijn lager zodat deze configuratie de voorkeur heeft.

6.3 Aanbevelingen

Zuivelindustrie

- Aanbevolen wordt verdere detaillering m.b.t. gas- en elektriciteitsstarieven in de economische berekening in te brengen. Daarnaast dient de investeringsschatting verdere onderbouwing, met name op het vlak van de kosten van de bottoming cycle. Een onzekerheidsanalyse kan meer inzicht geven in de invloed van de gehanteerde uitgangspunten op de haalbaarheid van de GT-ABC;
- Hoewel olielagering niet onacceptabel is, dienen gezien de zeer strenge hygiënische eisen mogelijkheden van olie-vrije lagering van bottoming cycle aandacht te krijgen;
- Aanbevolen wordt de interesse voor de GT-ABC bij Nederlandse zuivelindustrie te peilen aan de hand van de verkregen resultaten;
- Een mogelijkheid tot verbetering van de GT-ABC bij de zuivelindustrie, is integratie van de GT-ABC in een bestaande WKK centrale. Mogelijkheden zijn o.a. het op één as plaatsen van de GT-ABC en WKK centrale, luchtftap uit de compressor van de WKK centrale, gebruik van warmte van de WKK centrale voor de bottoming cycle.

Bakkerijindustrie

- Een nieuw oventype dat in deze studie onderbelicht is geweest, en dat wellicht goede kansen biedt voor een GT-ABC, is de impingent oven. Aanbevolen wordt de haalbaarheid van een GT-ABC voor dit specifieke type oven nader te beschouwen;
- Een deel van de verkregen besparingen bij de toepassing van een GT is door het toepassen van een lagere luchtvermaat in een oven. Onderzocht dient te worden of dit mogelijk is, m.a.w. of de productkwaliteit niet onaanvaardbaar verslechtert door de hogere concentratie bakdampen en water in de ovenatmosfeer. Indien dit geen verslechtering geeft dan is dit

tevens een mogelijkheid tot autonome verbetering in energie efficiency van ovens, en dient de haalbaarheid hiervan verder onderzocht te worden;

- Indien de geopperde technische kanttekeningen bij de toepassing van een GT of GT-ABC bij een directe oven niet bezwaarlijk blijken wordt aanbevolen wordt deze twee opties in ook in economische zin te vergelijken om een voorkeur voor een van beide vast te stellen.
- Aanbevolen wordt de interesse voor een GT als toepassing bij een indirecte oven (zowel lucht als thermische olie gestookt) te peilen bij ovenbouwers en bakkerijen aan de hand van de verkregen resultaten.

7. REFERENTIES

Algemeen

- [1] Korobitsyn, M., Industrial Applications of the Air Bottoming Cycle, Presented at the International Conference on Efficiency, Cost, Optimizations, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems and Processes ECOS '99, Tokyo, Japan, June 8-10, 1999.
- [2] Krähe, A.H., Katalytische aardgasverbranding: Technologische Aspecten, ECN rapport ECN-C-90-060.
- [3] Dijkstra, J.W., A.J. Faber, H.J. Koch, J. Langreck, H.J. van der Marel, N. Rohn, A.J.H. van Zuijlen, Feasibility Study HERAC, Heat Recovery Air Turbine Cycle, ECN report ECN-C-00-101, November 2000.

Zuivel

- [4] Nederlands Instituut voor Zuivelonderzoek. Mededeling M17. Sectoronderzoek Energiebesparing in de Zuivelindustrie, 1983.
- [5] J. Straatsma. Sproeidrogers. Uit: Cursusboek Doelmatig energieverbruik bij droogprocessen, 1988.
- [6] J. Straatsma, G. van Houwelingen, A.P. Meulman en A.E. Steenbergen. DrySpec2: a computer model of a two-stage dryer. J. Soc. Dairy Technol. 44 (1991) 4, 107-111.
- [7] J. Straatsma en A.E. Steenbergen. Verhoging rentabiliteit van drooginstallaties. Intern NIZO memo, 1995.
- [8] Productschap Zuivel. Statistisch Jaaroverzicht 1999.
- [9] J. Hiddink (Arcadis IMD, met toestemming van NZO). Persoonlijke communicatie, december 2000.
- [10] H.A. Kolkhuis Tanke (Arcadis IMD) en C. Leguijt (NOVEM). Voortgangsrapportage ontwikkeling MJA energie-efficiëntie in de zuivelindustrie (NZO) over 1999, augustus 2000.

Brood & Banket

- [11] Gas turbine world 1999-2000 Handbook, volume 20.
- [12] Jansen, L.P.B.M. and M.M.C.G. Warmoeskerken, Transport Phenomena Data Companion, Delfste Uitgeversmaatschappij, 1991.
- [13] Gasunie, Physical Properties of Natural Gas, N.V. Nederlandse Gasunie, 1980.

APPENDIX 1: BEZOEKERSRAPPORT BDI

Bespreking: Bezoek aan Borculo Domo Ingredients te Borculo in het kader van de 'verkennde studie nageschakelde luchtcyclus in de voedingsmiddelen en zuivelindustrie'.
Datum: 4 januari 2001
Plaats: Borculo Domo Ingredients, Borculo
Aanwezig: G. H. (Gerard) Weernink Manager Milieu, Arbo en Waterzuivering
R. Verdurmen NIZO food research
J.W. Dijkstra ECN

Bedrijfsgegevens

Borculo Domo Ingredients
Needseweg 23
7271 AB Borculo
Postbus 46
7270 AA Borculo
<http://www.borculodomo.com>

G.H. Weernink
Manager Milieu, Arbo en Waterzuivering
Tel. +31 545 25 67 89
Fax. +31 545 37 32 75
e-mail: GH.Weernink@BDI.nl

Bedrijfsintroductie

Borculo Domo Ingredients (BDI) is een werkmaatschappij van de Friesland Coberco Dairy Foods (omzet 8.9 miljard NLG/jaar). Borculo Domo verwerkt wei (afkomstig van de kaasproductie) tot lactoses en weipoeder voor gebruik in o.a. voedingsmiddelen, veevoeder en geneesmiddelen. De locatie Borculo is de grootste weiverwerkende site ter wereld.

De naastgelegen warmtekrachtcentrale (Berkelcentrale) levert stoom aan de productiefaciliteit van BDI. BDI heeft een afnameverplichting van een minimale hoeveelheid stoom.

BDI heeft 8 sproeidroogtorens van een drietal types: vlakbodemtorens (2), konustorens (4) en filtermattorens (2). De lucht voor de sproeitorens wordt verwarmd met aardgas of stoom. In onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven van luchtverbruik, luchtintreetemperatuur en verwarmingswijze voor de torens. De drooglucht worden met directe gasbranders verhit, met uitzondering van T7 en T10 (deze worden m.b.v. stoom verhit aangezien de daarop geproduceerde producten niet in aanraking met rookgassen mogen komen). T9 staat op de nominatie om te worden omgebouwd naar stoomverhitting.

Toren	Luchtverbruik per toren [m ³ /h]	Luchtintreetemperatuur [°C]	Capaciteit waterverdamping [kg/h]
platbodem (2 stuks)	50.000	185	1400
conus (T5 en T6)	60.000	180-185	1600
conus (T8)*	95.000	180-185	3800
conus (T9)	60.000	180-185	2000
filtermat (T7)	65.000	170	3800
filtermat (T10)	85.000	210	4500

*: aangepast met CIP-reinigbaar totaalfilter

De droogluchttemperatuur is doorgaans regelbaar over een beperkt gebied (ca. 15° C). Te zeer verhogen van de droogluchttemperatuur is niet toegestaan om beschadigingen van de eiwitten te voorkomen.

De totale kostprijs van weipoeder bedraagt ca. 0,90 NLG/kg. Hiervan zijn ca. 3% energiekosten. Het totale elektriciteitsverbruik van de locatie is ca. 6 MWe. Dit verbruik is vrijwel constant gedurende de hele dag.

Een recente pinch-studie over de hele locatie had als voornaamste conclusie dat de grootste efficiencywinst gehaald kan worden door gebruik van lagedrukstoom (2 bar) i.p.v. middendrukstoom (13 bar). Hiervoor moet echter het gehele stoomsysteem aangepast worden.

Korte weergave van het besprokene

Dijkstra introduceert het concept van de nageschakelde luchtcyclus voor de productie van hete lucht die gebruikt kan worden in de zuivelindustrie. De cyclus produceert tevens elektriciteit die (deels) gebruikt kan worden in de sproeidroogtoeren. In de aansluitende discussie komen de volgende aspecten naar voren:

- BDI is in eerste instantie geïnteresseerd in het idee.
- De hygiënische eisen aan weipoeder zijn streng. Daarom wordt met indirecte verhitting van de lucht gewerkt. Voor de aanwezigheid van smeermiddelen in het product bestaat geen norm. In het algemeen eist een afnemer in eerste instantie absolute afwezigheid van verontreinigingen. In tweede instantie wordt kan over dit standpunt wel onderhandeld worden. Hoe dan ook liggen smeermiddelen erg gevoelig. Het toepassen van speciale smeermiddelen voor voedingstoepassingen zal de discussie vergemakkelijken, maar of dit een oplossing is blijft een vraagteken. Wel worden bestaande ventilatoren (ook van de inlaatlucht) gewoon gesmeerd.
- De droogsproeitoren draaien vrijwel continu: 7-21 etmalen aaneengesloten (gemiddeld 14 etmalen), waarna reiniging plaats vindt. Twee weken per jaar stilstand is mogelijk.
- De installatie van een luchtcyclus zal leiden tot een lagere stoomafname van de Berkelcentrale, waardoor de netto energiebesparing tegen zal vallen. Daarnaast is er een afspraak tot minimale stoomafname van BDI. Het voortbestaan van de Berkelcentrale staat op dit moment echter ter discussie vanwege de financiële situatie. Bij het stopzetten van de Berkelcentrale zal de situatie drastisch wijzigen.³
- De lucht dient gezuiverd te worden door een inlaatfilter. De bestaande inlaatfilters hebben een lage drukval (8-10 mm H₂O).
- De beschikbare ruimte lijkt in sommige gevallen problematisch. De luchttoevoer vindt plaats op de 4^{de} of 5^{de} verdieping. Bij voorkeur dient de luchtcyclus hier geplaatst te worden (voldoende draagvermogen van het gebouw?). Een alternatief is plaatsing op de grond, wat echter leidt tot de noodzaak van een lange luchtleiding naar de 4^{de}/5^{de} verdieping
- Het totale investeringsbudget voor de locatie is ca. 8 miljoen NLG/jaar. Een investeringsniveau van enkele miljoenen is problematisch. De gehanteerde terugverdientijdsgrens voor investeringen is 3 jaar. Door de overheid wordt soms 5-10 jaar opgelegd voor milieumaatregel.
- Het halen van de MJA afspraken lijkt geen probleem.
- Tijdens een bezoek aan een 5-tal sproeidroogtoeren bleek bij 1 toren juist voldoende ruimte aanwezig. Bij de 4 overige was de beschikbare ruimte zeer beperkt.
- Een concurrerende energiebesparingsmaatregelen voor de nageschakelde luchtcyclus is warmteterugwinning uit de uitlaatlucht (temperatuur= 70-95° C). Deze vindt alleen plaats in T10. Bij de andere toeren zijn problemen gerezen met vervuiling en corrosie, zodat deze techniek in de toekomst vermeden zal worden.

³ Naschrift: Tijdens de afrondfase van dit rapport is bekend geworden dat het faillissement van de Berkelcentrale is aangevraagd.

APPENDIX 2: BESPREEKINGSVERSLAG KAAK GROEP

Bespreking: Bezoek aan Kaak te Terborg in het kader van de 'verkenkende studie nageschakelde luchtcyclus in de voedingsmiddelen en zuivelindustrie'.
Datum: 24-11-00
Plaats: Kaak Nederland, Terborg
Aanwezig: L. Pasch directeur Kaak Nederland b.v.
P. Sluimer TNO Voeding
J.W. Dijkstra ECN

Bedrijfsgegevens

Kaak Nederland b.v.
Varseveldseweg 20a
7061 GA Terborg
P.O. Box 16
7060 AA Terborg

L. Pasch, directeur
tel. (0)315-33 91 11
fax. (0)315- 33 93 55
E-mail: info@kaak.nl

Bedrijfsintroductie

Kaak Nederland is een onderdeel van de Kaak Group. De Kaak Group levert volledige bakkerijlijnen. De basis daarvan zijn transportbanen voor deeg en gereed product. Daarbij leveren ze kneders, verwerkingsmachines, rijskasten en ovens. De omzet bedraagt NLG 150 Miljoen op jaarbasis. Het personeelsbestand is ca. 600. Via de dochter Daub produceert de Kaak Group ovens van het type indirect gestookt met thermische olie.

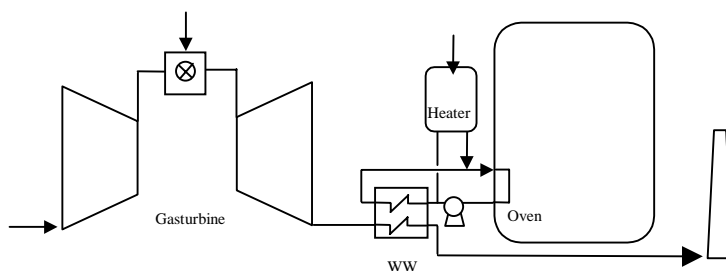
Korte weergave van het besprokene

Dijkstra introduceert het concept van de nageschakelde luchtcyclus voor de productie van hete lucht die gebruikt kan worden in de bakkerij. De cyclus produceert tevens elektriciteit die (deels) gebruikt kan worden in de bakkerij. In de aansluitende discussie komen de volgende aspecten naar voren:

- De bakindustrie is een conservatieve markt. Men zal zich voornamelijk willen richten op het beheersen van het bakproces. Een warmtekrachtsysteem zal daarom zonder rompslomp en simpel te bedienen moeten zijn.
- In de gepresenteerde lijst met mogelijke branches voor toepassing van de luchtcyclus zou als extra criterium het percentage energiekosten van de totale productiekosten als belangrijk criterium toegevoegd moeten worden.
- De energiekosten maken slechts 4% uit van de kostprijs van een brood. Als met warmtekracht hierop 25% bespaard zou kunnen worden, dan zal dit dus een kostenreductie van 1% opleveren. Dit zou dan de drijvende kracht dienen te zijn om de bakkerijen tot investeren te bewegen.
- Een belangrijk punt is na te gaan of de geproduceerde elektriciteit in de bakkerij gebruikt kan worden, en in hoeverre teruglevering aan het net noodzakelijk is.
- De nageschakelde luchtcyclus levert warmte van een te lage kwaliteit voor gebruik in een bakoven (220° C). De bandtemperatuur is ca. 280° C, dit betekent dat de olietemperatuur ca. 320° C moet zijn. De retourtemperatuur van de oven is ca. 220° C. Via een circulatiesysteem worden grote temperatuurgradiënten over de thermische olie in de oven voorkomen.

- De investering van de nageschakelde luchtcyclus als berekend door Korobitsyn zijn te hoog. Zij zijn hoger dan de investering van een bijpassende oven. Deze hoeveelheid kapitaal kan een bakkerij niet aantrekken.
- Belangrijk is ook de beschikbaarheid combinatie. Ovens hebben nauwelijks onderhoud nodig. Het is niet acceptabel dat de oven uit gebruik is door onderhoud aan de turbinecyclus.

Op basis van voorgaande wordt door Dijkstra een veel simpeler systeem voorgesteld. Dit bestaat uit een gasturbine zonder een nageschakelde cyclus. Met de uitlaatgassen van de gasturbine wordt de thermische olie verhit in een warmtewisselaar. De thermische olie verwarmt de oven. Als back-up staat een conventionele gasheater parallel, zoals deze op dit moment bij alle met thermische olie verwarmde ovens gebruikt wordt. Zie onderstaande figuur:



- De investeringen voor dit systeem zijn veel kleiner, geschat 800 kNLG voor een 500 kW_e gasturbine, die twee ovens van 500 kW_{th} kan voorzien.
- Een grove schatting geeft een meerinvestering van 20% voor een kostprijsreductie van 1%. Het is de vraag of een bakkerij hiertoe bereid is. Geadviseerd wordt een bakkerij hierover te polsen.
- De warmtewisselaar zal groter zijn dan de conventionele heater, vanwege het lagere temperatuursverschil (800° C vlamtemperatuur van de heater, ca. 590° C uitlaattemperatuur gasturbine.)

Evaluatie oventypes

- Indirecte hete lucht oven: koppeling aan een gasturbine is in principe mogelijk, maar de constructie van de oven moet aangepast worden i.v.m. grotere verwarmend oppervlak dat nodig is omdat de rookgastemperatuur veel lager is dan die van de branderlucht. Dit idee zou goed uitgewerkt kunnen worden bij plaatsing van een bakkerij in de directe omgeving van een elektriciteitscentrale.
- Directe oven: Toevoer van gas d.m.v. een groot aantal modulerende ventielen. Deze dienen gemodificeerd te worden. Gebruik van rookgassen voor bakken zou op acceptatieproblemen kunnen stuiten, hoewel dit nog steeds gebruikelijk is en nooit nitrosaminen aangetoond konden worden in de eindproducten.
- Elektrische oven: is energetisch ongunstig. Wordt in Frankrijk veel toegepast vanwege de beschikbaarheid van goedkope elektriciteit van nucleaire origine.
- Indirecte thermische olie oven: is vermoedelijk het meest geschikte type oven voor toepassing van warmtekrachtkoppeling. Geen aanpassing van het ovenontwerp nodig. Geen probleem met beschikbaarheid als een back-up heater geplaatst wordt.

Er zijn geen belangrijke concurrerende technologieën om de energie-efficiency van een oven te verbeteren.

Randvoorwaarden:

- Van de 5 Nederlandse ovenproducenten komen alleen Kaak en Den Boer in aanmerking als partners voor ontwikkeling van warmtekracht koppeling toepassingen.
- Typische tijdschalen in de bakkerij-industrie worden aangegeven: bij een eventuele demo zal de industrie na ca. 3 jaar evalueren hoe de ervaringen met het systeem zijn, en deze dan in hun investeringsplan opnemen. Commercialisatie van de demo kan dan verwacht worden na 5 jaar.
- Het komend jaar staan investeringen op het programma. Verwacht wordt dat het jaar daarna dit minder het geval is. Voor een demo is snelheid daarom gewenst.

Bereidbaarheid tot samenwerking

Voor de simpele koppeling van gasturbine aan een indirect thermische olie oven ziet Pasch de beste kansen. De financiële haalbaarheid moet nog worden nagegaan, alsmede de bereidheid van de gebruiker tot het doen van de meerinvestering voor een kleine kostprijsreductie. Kaak is bereid tot het deelnemen aan een eventuele demo, mits een gebruiker daarin deelneemt, maar wil zelf niet financieel bijdragen. Bij een eventuele demo zien zij zichzelf wel als de aangewezen partner.

APPENDIX 3: BEZOEKERSRAPPORT BOLLETJE B.V.

Bespreking: Bezoek aan Bolletje te Almelo in het kader van de 'verkennde studie nageschakelde luchtcyclus in de voedingsmiddelen en zuivelindustrie'.
Datum: 1-12-01
Plaats: Bolletje, Almelo
Aanwezig: R. Brink Hoofd Technische Dienst Bolletje Almelo
 W. Rouwen TNO Voeding
 J.W. Dijkstra ECN

Bedrijfsgegevens

Bolletje b.v.
Turfkade 9
7602 PA Almelo
(0546)-87 80 00

Bedrijfsintroductie

Bolletje B.V. is een producent van: roggebrood, beschuit, droog banket, seizoen gebonden producten (b.v. pepernoten), en ambachtelijke ontbijtkoek. Bolletje beschikt voor de productie van beschuit over 5 productielijnen met 10 direct gestookte continu-ovens. Voor de productie van roggebrood wordt gebruik gemaakt van 7 stuks, indirect, met HD-stoom verwarmde charge-ovens. De banketproducten worden gefabriceerd op 5 productielijnen met elk een direct gestookte continu-oven. Deze direct gestookte ovens verbruiken ca. 30-60 m³/hr aardgas. Van bovengenoemde productieprocessen is de productie van roggebrood en ambachtelijke koek batchgewijs, de overige productieprocessen verlopen continu.

Belangrijke energieverbruikers bij Bolletje zijn de ovens, de rijskasten (beide warme lucht) de productielijn voor golfkarton (HD stoom), persluchtproductie (hiervoor wordt aan een besparingsprogramma gewerkt) en de ruimteverwarming. Ovenafgassen kunnen worden gebruikt voor verwarming van water voor ruimteverwarming, dit is echter geen common practice in de Nederlandse bakkerij-industrie. Het basis-elektriciteitsverbruik bedraagt ca. 75 kWe.

Korte weergave van het besprokene

Dijkstra introduceert het concept van de nageschakelde luchtcyclus voor de productie van hete lucht die gebruikt kan worden in de bakkerij. De cyclus produceert tevens elektriciteit die (deels) gebruikt kan worden in de bakkerij. Daarnaast is er de mogelijkheid tot direct gebruik van de afgassen van een gasturbine, zonder nageschakelde luchtcyclus. In de aansluitende discussie komen de volgende aspecten naar voren:

- De bakprocessen bij Bolletje hebben een hoogste temperatuur nodig van ca. 300° C. De luchtcyclus levert een te lage temperatuur, ca. 220° C.⁴
- Bij het bakken van b.v. beschuit wordt een zgn. bakcurve aangelegd. De beschuiten lopen over een lopende band door een lange oven (ca. 20 m). De temperatuur in de oven is niet overal gelijk, zodat de beschuit een tijdsafhankelijk temperatuurtraject opgelegd krijgen. Dit is nodig om de benodigde kleuring en structuur te krijgen. Het opleggen van een dergelijk temperatuurtraject met een luchtcyclus is een extra complicatie.

⁴ Dit geldt voor een luchtcyclus met 1 intercooler. Afhankelijk van het aantal intercoolers (0, 1 of 2) levert de luchtcyclus lucht van respectievelijk 278° C, 220° C of 210° C.

- De energiekosten gemiddeld over bolletje zijn ca. 3.75% van de productiekosten. Percentueel valt daarom niet spectaculair veel te winnen. Het presenteren van absolute besparingen in gulden/jaar spreekt de bedrijfsleiding vaak meer aan.
- Het totale investeringsbudget van Bolletje is ca. 10 miljoen NLG/jaar. Een investering t.b.v. energiebesparing van 1 miljoen NLG lijkt het absolute maximum, een investering in de orde van tonnen krijgt het predikaat acceptabel. De terugverdientijd dient dan beneden ca. 3 jaar te liggen, voor energiebesparing is hiervoor wellicht wat ruimte naar boven toe. Bolletje is ook geïnteresseerd in een constructie waarbij de investering gedaan wordt door een externe partij (b.v. distributiebedrijf) en verrekening van aardgas en elektriciteit plaats vind.
- Toepassing van een luchtcyclus op een nieuwe oven is meer voor de hand liggend dan een retrofit van een bestaande oven.
- Voor een retrofit komt in eerste instantie de met thermische olie gestookte ambachtelijke koekoven in aanmerking. Bij deze indirect met thermische olie verwarmde batch-oven kan parallel aan de brander een gasturbine geplaatst worden. De gasturbine voorzien van een nageschakelde luchtcyclus lijkt niet zinvol.
- Belangrijke concurrerende energiebesparende maatregelen: (i) rookgas warmteterugwinning t.b.v. ruimteverwarming, rijskastenverwarming of ketelvoedingwatervoorwarming en (ii) besparingen op persluchtverbruik b.v. door het strategisch plaatsen van magneetventielen.
- Er is regelmatig een onderhoudstop van ca. 1 week waarin revisie van de luchtcyclus kan plaats vinden.

Evaluatie geschiktheid oventypes voor toepassing van de luchtcyclus:

- Direct gestookte ovens: de benodigde luchttemperatuur (300° C) is een probleem, alsmede het aanleggen van de vereiste bakcurve. De investeringen voor een nieuwe oven zijn hoog. De lucht van de luchtcyclus als voorverwarmde lucht gebruiken is nog een optie. Dit vereist echter aanpassingen aan de branders (deze zijn gevoelig en gaan snel uit).
- Indirect gestookte ovens: een geheel nieuw ontwerp van dit type oven is nodig door de veranderde massastromen. Voor toepassing van warmtekrachtkoppeling met een gasturbine lijkt dit vooralsnog vanuit technisch oogpunt een goede optie.
- Indirect thermische olie ovens: is technisch gezien het meest geschikt. Dit type oven heeft echter een relatief hoge investering. Retrofit is hierbij mogelijk.

Aansluitend is een bezoek gebracht aan de productie-faciliteiten waarbij de voornaamste bemerkingen zijn:

- Rond de ovens en de rijskasten is de ruimte beperkt, ruimtebeslag is hier een belangrijk facet
- Rond de indirect thermische olie gestookte oven is voldoende ruimte, installatie van een luchtcyclus of een gasturbine is hier mogelijk, dit kost een kleine hoeveelheid magazijnruimte.

APPENDIX 4: INDUSTRIËLE BROODBAKKERIJEN IN NEDERLAND

Een meerderheid van de Nederlanders koopt zijn/haar brood in de supermarkt, samen met warenhuizen hebben retailers een marktaandeel van 67,4%.

De industriële markt wordt in Nederland beheerst door een drietal organisaties te weten:

Bakkersland
Quality bakers
Bake-five

Bakkersland heeft met een omzet van 600 miljoen het grootste aandeel in deze markt.

Quality bakers is tweede met een omzet van 400 miljoen en de relatief jonge groep Bake-five is runner up met een omzet van 350 miljoen.

Bakkersland:

Deze organisatie is, na het opheffen van de SABA, ontstaan door een fusie van een tiental regionaal opererende ondernemingen met een totaal van 18 bakkerijen.

Bij de Bakkersland-bakkerijen werken er in totaal 2300 mensen, de directie wordt gevormd door:

Bas van Helden (algemeen directeur)
Jaap Molenaar (operationeel directeur)
Hein Reintjes en Frank Hollander (commerciële directie)

De hoofdvesting van Bakkersland bevindt zich in Andelst.

De bakkerijen welke zijn aangesloten bij Bakkersland zijn:

- * De Graafs Bakkerijgroep (Bunschoten, Utrecht en Gorredijk)
- * Schipper Groep (Emmerloord, Apeldoorn, Hoogeveen, Bergentheim)
- * Welten (Breda)
- * Smarius/Dekker (Tilburg, Giesen, Waalwijk)
- * Veenman (Wateringen)
- * A.A. den Boer/Klootwijk (Rotterdam, Ridderkerk)
- * Dominicus (Westkapelle)
- * En-pé (Sevenum)
- * Broekmans (Neerkant)
- * Egberts (Hedel)

Quality bakers

Dit is een zuster bedrijf van Meneba en maakt deel uit van de holding Maxeres NV in Den-Haag. Quality bakers Europe bestaat uit 9 eigen bakkerijen, waaronder één in Frankrijk plus 10 samenwerkende bakkerijen.

Algemeen directeur van de Quality bakers Europe is,
Hajé Roebbers

Het hoofdkantoor bevindt zich in Gouda

Stavoren weg3
2803 PT Gouda
Postbus 596
2800 AN Gouda
Tel. 0182-543399

Fax. 0182-543399
Website (www.qualitybakers.com)

Eigen bakkerijen:

- * Zwanenburg
- * Haarlem
- * Rotterdam
- * Utrecht
- * Eindhoven
- * Arnhem
- * Kerkrade
- * Brunsum
- * Quality bakers Picardie (Gauchy, Frankrijk)

De aangesloten bakkerijen zijn:

- Bakkerij Schothuis (Nieuw-Amsterdam)
- Bakkerij Van Strien (Terneuzen)
- Bakkerij Bruinsma (Den Helder)
- Bakkerij Schothuis (Enschede)
- Kooistra bakkerij (Dokkum)
- Henk van Rooij Bakkerijen (Waalwijk)
- Brood- en banketbakkerij Van der Elst (St.Philipsland)
- Bakkerij Ton van Mourik (Est)
- Wanninkhof Bakkerijen (Noordwijkerhout)
- Bakkerij Van der Zee (Garijp)

Bake-Five

Deze groep is net als Bakkersland ontstaan uit SABA, welke werd opgeheven per 31 december 1997, de ondernemingen zijn net als in de andere groepen verdeeld over het hele land, met uitzondering van de provincies Zeeland en Limburg. Het aantal ondernemingen dat aangesloten is bij de Bake-five is op het moment 15. Bij de gezamenlijke bakkerijen zijn momenteel 1200 mensen werkzaam.

Algemeen directeur
Dick Roele

De aangesloten bedrijven zijn:

- * Bakkerij Bacu (Uden)
- * Bakkerij Arie Betram (Amsterdam)
- * Borgesius Bakkerijen (Stadskanaal)
- * Bakkerij BorgesiusWebro (Leeuwarden)
- * Bakkerij Bouman (Geldermalsen)
- * Bakkerij van de Kletersteeg (Stoutenburg)
- * Bakkerij Pater (Avenhorn)
- * Bakkerij Visser (Alphen a/d Rijn)
- * Bakkerij Wiltink (Doetinchem)
- * Bakkerij Fuite (IJsselmuiden)
- * Bakkerij Zaaier (Helmond)
- * Bakkerij J.M. Smithuis (Oldenzaal)
- * Bakkerij Veenhuis (Sappemeer)
- * Bakkerij J.M. Smithuis Pré Pain (Oldenzaal)
- * Brood- en banketbakkerij H.B. De Pauw (Hardinxveld-Giesendam)

APPENDIX 5: INDUSTRIËLE BANKETBAKKERIJEN IN NEDERLAND

In samenspraak met de Vereniging voor de Bakkerij- en Zoetwarenindustrie is een lijstje samengesteld van de belangrijkste bakkerijen die voor het project in aanmerking komen.

- Bolletje, Turfkade 9, Almelo, tel 0546-878000, e-mail info@bolletje.com
- General Biscuits Nederland b.v., Bessemerstraat 19-21, Dordrecht, tel 078-6524524
- Haust b.v. Kamerlingh Onnesweg 10, Barendrecht, tel 010-2924646
- United Biscuits, Hogehilweg 16, Amsterdam, tel 020-3422522
- Kon.Peijnenburg's koekfabrieken b.v., Nieuwendijk 45, Geldrop, tel 040-2862751
- Banketbakkerij Ravensbergen b.v. Wasbeekerlaan 6, Sassenheim, tel 0252-219102, e-mail ravensb@worldonline.nl
- De Aviateur Banketbakkerijen b.v., Vreekesweid 2, Broek op Langendijk, tel 0226-331100, e-mail aviateur@worldonline.nl
- Daelmans Banket b.v., Kerkstraat 48, Nieuwkuijk, tel 073-5188444
- Vast Banket b.v., Pomsterweg3, Middelstum, tel 0595-552654, e-mail: vast@vast-banket.com

APPENDIX 6: GEGEVENS PRAKTIJKMETINGEN OVENS

Berekening enthalpie (H_{tot}) rookgas bij T rookgas > T dauwpunt

=====

Gemeten waarden =====	Indirect gestookte oven =====	laatste bewerking	5-mrt-01
BRANDERKAMER 1		ROOKGASAFVOER 1	
gasverbruik	53 m3/h	gasverbruik	53 m3/h
O ₂	3 %	O ₂	12 %
CO ₂	10,034 %	CO ₂	5,003 %
rookgastemp.	450 oC	rookgastemp.	250 oC
verbr.luchttemp.	32 oC	verbr.luchttemp.	32 oC
rookgastemp. na WTW	0 oC	rookgastemp. na WTW	oC

Tabel/grafiek waarden

=====

* Waarden in tabel/grafiek opzoeken.

=====

BRANDERKAMER 1	ROOKGASAFVOER 1
tab.1 dauwpunttemperatuur bij : 16,92 kPa is : 56 oC	tab.1 dauwpunttemperatuur bij : 9,67 kPa is : 44 oC
tab.1 verz. waterdampdruk bij: 450 oC rookg. 22120 kPa	tab.1 verz. waterdampdruk bij: 250 oC rookg. 3978 kPa
tab.1 verz. waterdampdruk WTW bij: 0 oC rookg. 0,6108 kPa	tab.1 verz. waterdampdruk WTW bij: 0 oC rookg. 0,6108 kPa
graf.1 s.w.rookgas(d) (Tx<Td) bij : 1,15 l.overn.: 1,042 kJ/kg.K *	graf.1 s.w.rookgas(d) (Tx<Td) bij : 2,22 l.overn.: 1,018 kJ/kg.K *
graf.2 s.w.rookgas(n) (Tx>Td) bij : 1,15 l.overn.: 1,143 kJ/kg.K *	graf.2 s.w.rookgas(n) (Tx>Td) bij : 2,22 l.overn.: 1,069 kJ/kg.K *

BRANDERKAMER 1
=====

Indirect gesoekte oven
=====

1. Verbrandingsrendement op bovenwaarde:		72,40 %
2. luchtfactor (n)		1,15
3. dauwpunttemperatuur (Td)		56 oC
3.1 m3o waterdamp / m3o aardgas	1,80 m3o/m3o	
3.2 m3o rookgas (nat) / m3o aardgas	10,76 m3o/m3o	
3.3 verzadigde waterdampdruk bij Td	16,92 kPa	
4. enthalpie waterdamp bij Td(auwpunt)		3895 kJ/m3o gas
4.1 kg waterdamp / m3o aardgas	1,50 kg/m3o	
5. enthalpie waterdamp bij Tr(ookgas) na WTW		135 kJ/m3o gas
5.1 verzadigde waterdampdruk bij Tr	0,61 kPa	
5.2 kg waterdamp /m3o aardgas	0,05 kg/m3o	
6. totale enthalpie rookgas bij Tr		14064 kJ/m3o gas
6.1 temperatuur rookgas	450 oC	
6.2 kg rookgas (droog) / m3o aardgas	6,32 kg/m3o	
6.3 gemiddelde s.w. rookgas (droog)	1,042 kJ/kg.K	
6.4 kg waterdamp / m3o aardgas	1,50 kg/m3o	
6.5 dauwpunttemperatuur	56 oC	
6.6 kg rookgas (nat) / m3o aardgas	21,76 kg/m3o	
6.7 gemiddelde s.w. rookgas (nat)	1,143 kJ/kg.K	
7. totaal rookgasvolume		570,23
8. Enthapie totale hoeveelheid rookgas per uur		745405 kJ

ROOKGASAFVOER 1

Indirect gestookte oven

=====

=====

1. Verbrandingsrendement op bovenwaarde:			73,27 %
2. luchtfactor (n)			2,22
3. dauwpunttemperatuur (Td)			44 oC
3.1 m3o waterdamp / m3o aardgas	1,90	m3o/m3o	oke
3.2 m3o rookgas (nat) / m3o aardgas	19,92	m3o/m3o	oke
3.3 verzadigde waterdampdruk bij Td	9,67	kPa	oke
4. enthalpie waterdamp bij Td(auwpunt)			4090 kJ/m3o gas
4.1 kg waterdamp / m3o aardgas	1,59	kg/m3o	oke
5. enthalpie waterdamp bij Tr(rookgas) na WTW			250 kJ/m3o gas
5.1 verzadigde waterdampdruk bij Tr	0,61	kPa	oke
5.2 kg waterdamp /m3o aardgas	0,10	kg/m3o	oke
6. totale enthalpie rookgas bij Tr			12287 kJ/m3o gas
6.1 temperatuur rookgas	250	oC	
6.2 kg rookgas (droog) / m3o aardgas	18,02	kg/m3o	
6.3 gemiddelde s.w. rookgas (droog)	1,018	kJ/kg.K	
6.4 kg waterdamp / m3o aardgas	1,59	kg/m3o	
6.5 dauwpunttemperatuur	44	oC	
6.6 kg rookgas (nat) / m3o aardgas	33,56	kg/m3o	
6.7 gemiddelde s.w. rookgas (nat)	1,069	kJ/kg.K	
7. totaal rookgasvolume			1056 m3
8. Enthapie totale hoeveelheid rookgas per uur			651209 kJ

Berekening enthalpie (Htot) rookgas bij T rookgas > T dauwpunt

Gemeten waarden =====	Direct gestookte oven =====	Laatste bewerking	27 febr. 2001
<u>ROOKGASAFVOER 1</u>		<u>ROOKGASAFVOER 2</u>	
gasverbruik	53 m3/h	gasverbruik	nvt m3/h
O2	18,2 %	O2	nvt %
CO2	1,537 %	CO2	nvt %
rookgastemp.	200 oC	rookgastemp.	nvt oC
verbr.luchttemp.	32 oC	verbr.luchttemp.	nvt oC
rookgastemp. na WTW	0 oC	rookgastemp. na WTW	nvt oC

Tabel/grafiek waarden

=====

* Waarden in tabel/grafiek opzoeken.

ROOGASAFVOER 1

tab.1 dauwpunttemperatuur bij :

3,91 kPa is : 28 oC

tab.1 verz. waterdampdruk bij:

200 oC rookg. 1555 kPa

tab.1 verz. waterdampdruk WTW bij:

0 oC rookg. 0,6108 kPa

graf.1 s.w.rookgas(d) (Tx<Td) bij :

7,12 l.overm.: 1,013 kJ/kg.K *

graf.2 s.w.rookgas(n) (Tx>Td) bij :

7,12 l.overm.: 1,034 kJ/kg.K *

ROOKGASAFVOER 2

tab.1 dauwpunttemperatuur bij :

1,12 kPa is : nvt oC

tab.1 verz. waterdampdruk bij:

nvt oC rookg. nvt kPa

tab.1 verz. waterdampdruk WTW bij:

nvt oC rookg. nvt kPa

graf.1 s.w.rookgas(d) (Tx<Td) bij :

-448,50 l.overm.: nvt kJ/kg.K *

graf.2 s.w.rookgas(n) (Tx>Td) bij :

-448,50 l.overm.: nvt kJ/kg.K *

ROOKGASAFVOER 1 Direct gestookte oven

1. Verbrandingsrendement op bovenwaarde:		50,65 %
2. luchtfactor (n)		7,12
3. dauwpunttemperatuur (Td)		28 oC
3.1 m3o waterdamp / m3o aardgas	2,38 m3o/m3o	
3.2 m3o rookgas (nat) / m3o aardgas	61,67 m3o/m3o	
3.3 verzadigde waterdampdruk bij Td	3,91 kPa	
4. enthalpie waterdamp bij Td(auwpunt)		5069 kJ/m3o gas
4.1 kg waterdamp / m3o aardgas	1,99 kg/m3o	
5. enthalpie waterdamp bij Tr(ookgas) na WTW		776 kJ/m3o gas
5.1 verzadigde waterdampdruk bij Tr	0,61 kPa	
5.2 kg waterdamp /m3o aardgas	0,31 kg/m3o	
6. totale enthalpie rookgas bij Tr		22619 kJ/m3o gas
6.1 temperatuur rookgas	200 oC	
6.2 kg rookgas (droog) / m3o aardgas	71,37 kg/m3o	
6.3 gemiddelde s.w. rookgas (droog)	1,013 kJ/kg.K	
6.4 kg waterdamp / m3o aardgas	1,99 kg/m3o	
6.5 dauwpunttemperatuur	28 oC	
6.6 kg rookgas (nat) / m3o aardgas	87,30 kg/m3o	
6.7 gemiddelde s.w. rookgas (nat)	1,034 kJ/kg.K	
7. Totaal rookgasvolume		3268,40 m3o/h
8. Enthapie totaal rookgasvolume		1198820 kJ

APPENDIX 7: ECONOMISCHE EVALUATIE GT-ABC BIJ EEN SPROEIDROOGTOREN

Spray dryer with GT-ABC

Techn.data				Fysical data	
air flow	60000 Nm ³ /hr	21,55	kg/s	cp air (0-200 C)	1,31E+03 J/kg/K
Temp ambient	288 K	15	C	spec.mass air	1,293 kg/Nm ³
Temp hot air	458 K	185	C	ca.value NG	31,70 MJ/Nm ³
gas heated by burner:				cp air (0-800 C)	1,36E+03 J/kg/K
Energy needed	1,73E+04 MJ/hr =	4.799 kW		spec.mas NG	0,833 kg/Nm ³
NG needed	545,0 Nm ³ /hr	3,82 1e6 Nm ³ /yr			

Air heated by GT-ABC system percentages acc.to M.Korob.(ABC v 0

Enrg in drying air	1,73E+04 MJ/hr =	21,6 % of total enrg.	Varied
Total energy needed	8,00E+04 MJ/hr =	22.211 kW	32,4 %elektr verm(exerg)
Total NG needed	2,52E+03 Nm ³ /hr	0,584 kg/hr	8,1 %elektr verm(exerg)
Electricity			42,4 %el.verm (tot.enrg)
electr.prod.by GT	2,71E+04 MJ/hr =	7.534 kWe	33,92 % of tot.enrg.(gen.1)
electr.prod.by ABC	6,78E+03 MJ/hr =	1.884 kWe	8,48 % of tot.enrg.(gen.2)
Total elec.prod.	3,39E+04 MJ/hr =	9.418 kWe	42,4 % of total enrg.

Heat exchanger

Exhaust flow (flue)	30,08 kg/s	83755	Nm ³ /hr	Fysical data	
T in flue (4) guess	807,71 K	535	C	cp exhaust	1,36E+03 J/kg/K
T out flue (flue)	466,00 K	193	C	massflow*cp (air)	2,82E+01 kW/K
T in air (22)	403,00 K	130	C	U (heat transf.HX)	45 W/m ² /K
T out air (23)	747,00 K	474	C	Delta T(logmean) =	61,85 K
HX transferred enrg	13949 kW			sp. mass exh. (guess)	1,293 kg/Nm ³
energy HX in	14677 kW			massflow*cp (exhst)	4,08E+01 kW/K
	62,8 % of tot. energy(C16)			HX efficiency	85 %

HX surface

Heat flue out 7,27E+03 kW 32,71 %

E-balance ABC

0,0 Goal
Energy from heat exchanger has to be equal to energy to electricity of second system and to drying air

Varried %Energy in drying air
Goal E-balance=0

overmaat lucht

		3,5 O ₂ /O ₂ stoichiometric		
DATA	liters/mol	22,40		atm getal
benodigde O ₂ (stoich)	1,77 m ³ /m ³ NG	1,56E+04 Nm ³ /hr	2,23E+04 kg/hr	32,00
N ₂	6,58 m ³ /m ³ NG	5,81E+04 Nm ³ /hr	7,27E+04 kg/hr	28,00
Ar	0,08 m ³ /m ³ NG	6,89E+02 Nm ³ /hr	1,23E+03 kg/hr	40,00
CO ₂	0,03 m ³ /m ³ NG	2,65E+02 Nm ³ /hr	5,20E+02 kg/hr	44,00
H ₂ O	0,10 m ³ /m ³ NG	8,65E+02 Nm ³ /hr	6,95E+02 kg/hr	18,00
benodigde lucht	8,53 m ³ /m ³ NG	7,55E+04 Nm ³ /hr	9,74E+04 kg/hr	
verbandings prod. (stoich)				
N ₂	6,73 m ³ /m ³ NG	5,94E+04 Nm ³ /hr	8,48E+04 kg/hr	32,00
Ar	0,08 m ³ /m ³ NG	6,89E+02 Nm ³ /hr	1,23E+03 kg/hr	40,00
CO ₂	0,90 m ³ /m ³ NG	7,95E+03 Nm ³ /hr	1,56E+04 kg/hr	44,00
H ₂ O	1,78 m ³ /m ³ NG	1,57E+04 Nm ³ /hr	1,26E+04 kg/hr	18,00
exhaust gas	9,49 m ³ /m ³ NG	8,38E+04 Nm ³ /hr	1,14E+05 kg/hr	

Operating hours/year

7000 hr/year
Efficiency Dutch electricity park 42%

Analysis

Electric efficiency on additional fuel input	54%	
Primary energy separate generation	27222 kW	
Primary energy combined generation	22211 kW	
Relative energy savings	18%	126,2701
Annual electricity production	65922686 kWh/year	
Annual extra gas consumption	4,39E+05 GJ/Year	

Berekening grootte bottoming cycle

Inlaatcondities

Bottoming cycle
Temp 474 C
747 K
Druk 8,44 atm
Massaflow 18,5 kg/s
Volumeflowparameter 0,209023 m*T/P

Topping cycle (Tempest)

Temp 1129 C
1402 K
Druk 13,7
Massaflow 32,85 kg/s
Volumeflowparameter 0,321002 m*T/P
Verhouding 0,651157

uitlaatcondities

Bottoming cycle
Temp 218 C
491 K
Druk 1 atm
Massaflow 18,5 kg/s
Volumeflowparameter 0,037678 m*T/P

Topping cycle (Tempest)

Temp 544 C
817 K
Druk 1
Massaflow 32,85 kg/s
Volumeflowparameter 0,040208 m*T/P
Verhouding 0,937081

Investering	#		Euro/#	Investering kEuro
Topping turbine	7534 kWe	ABB Alstom Tempest	388	2923
Bottoming turbine				1949
Warmtewisselaar	5274 m2		175	923
Total FOB				5795
Installatie	20 %	van totaal FOB		1159
Piping	20 %	van WW prijs		185
		Hete-lucht kanaal		10
Electrical	9 %	van totaal FOB		522
Civiel	5 %	van totaal FOB		290
Structural/gebouwen		Inbegrepen bij civiel		0
Instrumentatie	0 %	inbegrepen bij turbines		0
Totale directe investering				7960
Engineering	10 %	van directe investering		579
Constructie	9 %	van directe investering		522
Onvoorzien	10 %	van directe investering		579
Totaal indirect				1681
Eenmalige investering	5 %	van directe investering		398
Totale procesinvestering				10038
Werkkapitaal	10 %	van totale procesinvestering		1004
Totaal gebonden kapitaal				11042
Specifieke investering	1066 Euro/kWe			
Specifieke investering	2353 NLG/kWe			
Afschrijvingstermijn	10 jaar			

Bepaling kostplusprijs en terugverdiëntijd

Bepaling productiekosten per jaar

VARIABEL	#	Euro/#	#jaar	kEuro/jaar
Additioneel gasverbruik	GJ	4,79191908	4,39E+05	2103
Totaal variabel				2102,6
VAST				
Bediening	uren		<i>p.m.</i>	
Onderhoud	% totaal direct:		5,0	501,9
Staf- en hulpdiensten	% bediening:		<i>p.m.</i>	
Bedrijfslab	% bediening:		<i>p.m.</i>	
Grondhuur/erfpacht	% totale procesinvestering		<i>p.m.</i>	
Eigendomsbel./verzekering	% totaal gebonden kapitaal		1,0	110,4
Totaal vast				612,3
Totaal vast + variabel				2714,9
Afschrijvingen				1003,8
Kosten af plant				3718,8
Beheers-verkoop-speurwerk	% kosten af plant		<i>p.m.</i>	
Winstopslag	% totaal gebonden kapitaal		10	1104,2
Totale productiekosten				4823,0

Bepaling opbrengsten per jaar

	#	Euro/#	#/jaar	
Direct				
Electriciteit	kWh	0,08349556	65922686	5504,3
Indirect				
<i>p.m.</i>				0,0
Opbrengsten per jaar				5504,3

Netto kosten stroom	Kosten af plant-besparingen			3718,8
Netto kostpluskosten stroom	Totale productiekosten-besparingen			4823,0
Kostprijs electriciteit	Kosten af plant/GJ	Euro/GJ		8,5
Kost plus prijs electriciteit	Totale productiekosten/GJ	Euro/GJ		11,0
Kostprijs electriciteit	Kosten af plant/kWh	Euro/kWh		0,056
Kost plus prijs electriciteit	Totale productiekosten/kWh	Euro/kWh		0,073
Cash flow	Opbrengsten(excl besp)-kosten var/var			2789
Initiele investering	Totaal kapitaal-werkkapitaal	kEuro		10038
Terugverdiëntijd			jaren:	3,6

Appendix 8: Dimensionering GT-ABC en GT ovens
broodoven model 1 Conventionele direct gestookte oven

Input

Aant.ton deeg/hr	1,00 ton/hr	0,28 kg/s	
Energie in deeg	500 MJ/ton		
Energieverliezen	200 MJ/ton		
Schoorsteenverliezen	974 MJ/ton		
benod.MJ/ton deeg	1674 MJ/ton	1673,89 MJ/hr	465 kW
schoorsteen temp	200 C	473,15 K	
lambda	7,00		(natte lucht)
Cal. waarde NG	31,70 MJ/Nm ³		
normaaldichtheid rookgas	1,36 kg/Nm ³		
cp rookgas	1,50 kJ/Nm ³ .K	1,50E-03 MJ/Nm ³ .K	
normaaldichtheid aardgas	0,83 kg/Nm ³		

Resultaten

benodigde NG	52,8 Nm ³ /ton		
Adiabatische vlam temp	333 C	606 K	
		per uur	per sec.
Schoorsteen verlies		974 MJ/hr	= 271 kW
Gasverbruik		53 Nm ³ /hr	= 0,0122 kg/sec
volume flow in Nm ³		3507 Nm ³ /hr	= 0,97 Nm ³ /sec
vol.flw bij	606,23 K (inlaat oven)	7594 m ³ /hr	= 2,11 m ³ /sec
vol.flw bij	473,15 K (schoorstemp.)	5885 m ³ /hr	= 1,63 m ³ /sec
massa flow rookgas		4786 kg/hr	= 1,33 kg/sec
Energie excl. rookgasverlieze	700 MJ/ton		

Energiebalans

Aardgas in	465 kW	Electr.	0 kW
Lucht in	0 kW	Rookgas	271 kW
Brood in	0 kW	Brood	194 kW
	465 kW		465 kW

Berekening hoeveel lucht voor stoichiometrische verbranding				
DATA	liters/mol	22,40		atm getal
benodigde O ₂ (stoich)	1,77 m ³ /m ³ NG	652 Nm ³ /hr	931,99 kg/hr	32,00
N ₂	6,58 m ³ /m ³ NG	2434 Nm ³ /hr	3042 kg/hr	28,00
Ar	0,08 m ³ /m ³ NG	29 Nm ³ /hr	51 kg/hr	40,00
CO ₂	0,03 m ³ /m ³ NG	11 Nm ³ /hr	22 kg/hr	44,00
H ₂ O	0,10 m ³ /m ³ NG	36 Nm ³ /hr	29 kg/hr	18,00
benodigde lucht	8,53 m ³ /m ³ NG	3152 Nm ³ /hr	4076 kg/hr	
verbandings prod. (stoich)				
N ₂	6,73 m ³ /m ³ NG	2486 Nm ³ /hr	3552 kg/hr	32,00
Ar	0,08 m ³ /m ³ NG	29 Nm ³ /hr	51 kg/hr	40,00
CO ₂	0,90 m ³ /m ³ NG	333 Nm ³ /hr	653 kg/hr	44,00
H ₂ O	1,78 m ³ /m ³ NG	659 Nm ³ /hr	529 kg/hr	18,00
exhaust gas	9,49 m ³ /m ³ NG	3507 Nm ³ /hr	4786 kg/hr	

broodoven model 2 Oven direct gestookt met gasturbineafgasen

aant.ton deeg/hr	1,00 ton/hr	totaal/hr	
MJ deeg/ton	700 MJ/ton	700 MJ/hr	0,194 MW
schoorsteen verl(guess)	425 MJ/ton		
benodigde energie/ton deeg	1125 MJ/ton		0,313 MW
Elektrische efficiency	0,23		
MJ systeem/ton deeg	1461 MJ/ton	1461,09 MJ/hr	0,406 MW
rookgas temp	200 C	473 K	
Inlaat temp oven	505 C	778 K	
Cal. waarde NG	31,7 MJ/Nm3		
benodigde NG	46 Nm3/tn br.	46 Nm3/hr	
lambda =	3,50 (natte lucht)		
Normaaldichtheid rookgas	1,36 kg/Nm3		
cp schoorsteengas	1,50 kJ/Nm3.K	1,50E-03 MJ/Nm3.K	1,10 kJ/kg K
Vlamtemp. GT	651,31 C	924,46 K	

		per uur	=	per sec.
schoorsteen verlies		425 MJ/hr	=	0,12 MJ/sec
gasverbruik		46 Nm3/hr	=	0,011 kg/sec
extra gas t.o.v. systeem 1		-7 Nm3/hr	=	-1,86E-03 Nm3/sec
volume flow in Nm3		1530 Nm3/hr	=	0,43 Nm3/sec
vol.flw bij	778 K (inlaat oven)	4278 m3/hr	=	1,19 m3/sec
vol.flw bij	473 K (schoorst.temp.)	2568 m3/hr	=	0,71 m3/sec
massa flow		2089 kg/hr	=	0,58 kg/sec
relatieve gasverbruik		87 %		
relatieve volumeflow		44 %		
rel.volume flow bij	778 K (inlaat)	56 %		
rel.volume flow bij	473 K (schrstn)	44 %		

Energiebalans

Aardgas in	406 kW	Electriciteit	93 kW
Lucht in	0 kW	Rookgas	118 kW
<u>Brood in</u>	<u>0 kW</u>	<u>Brood</u>	<u>194 kW</u>
	406 kW		406 kW

DATA	liters/mol	22,40	atm getal	
benodigde O2(stoich)	1,77 m3/m3NG	284,73 Nm3/hr	406,75 kg/hr	32,00
N2	6,58 m3/m3NG	1062,13 Nm3/hr	1327,66 kg/hr	28,00
Ar	0,08 m3/m3NG	12,58 Nm3/hr	22,47 kg/hr	40,00
CO2	0,00 m3/m3NG	0,48 Nm3/hr	0,95 kg/hr	44,00
H2O	0,10 m3/m3NG	15,81 Nm3/hr	12,70 kg/hr	18,00
benodigde lucht	8,53 m3/m3NG	1375,73 Nm3/hr	1770,54 kg/hr	
verbandings prod. (stoich)				
N2	6,73 m3/m3NG	1085,19 Nm3/hr	1550,28 kg/hr	32,00
Ar	0,08 m3/m3NG	12,58 Nm3/hr	22,47 kg/hr	40,00
CO2	0,90 m3/m3NG	145,19 Nm3/hr	285,19 kg/hr	44,00
H2O	1,78 m3/m3NG	287,47 Nm3/hr	231,00 kg/hr	18,00
rookgas	9,49 m3/m3NG	1530,44 Nm3/hr	2088,94 kg/hr	

Elektriciteitsproductie 93 kWe

Rendement elektriciteitspark	42 %
Energieverbruik separate elektriciteit	222 kW _e
Relatieve energiebesparing	41%

broodoven model 3

Oven direct gestookt met GT-ABC

aant.ton deeg/hr	1,00 ton/hr	totaal/hr	
MJ deeg+lek/ton	700 MJ/ton	700 MJ/hr	0,194 MW
schoorsteen verliezen (iteratief)	1571 MJ/ton		0,436 MW
benodigde energie lucht/ton deeg	2271 MJ/ton		0,631 MW
benodigde energie lucht	631 kW		0,631 MW
Temperatuur ingang oven	278 C	551,15 K	
Schoorsteentemperatuur	200 C	473,15 K	
cp schoorsteengas (lucht)	1,374 kJ/Nm3.K	1,37E-03 MJ/Nm3.K	1,01 kJ/kg K
Normaaldichtheid schoorsteengas	1,360 kg/Nm3		
Benodigde hete lucht flow	2,47 kg/s	1,81 Nm3/s	6533 Nm3/hr
Energie in hete lucht	631 kW		
Benodigde energie brood	194 kW		
Elektriciteitsproductie Korobitsyn	7,090 kWe		
Massaflow Korobitsyn	19,50 kg/s		
Elektriciteitsproductie	897 kW		0,90 MW
Elektrisch rendement GT-ABC	0,43 -		
Aardgasverbruik	2087 kW	7513 MJ/hr	2,09 MW
Cal. waarde NG	31,7 MJ/Nm3		
benodigde NG	66 Nm3/tn br.	237 Nm3/hr	
		per uur	per sec.
schoorsteen verlies		1571 MJ/hr	= 436,25 kWe
gasverbruik		237 Nm3/hr	= 0,055 kg/sec
extra gas t.o.v. systeem 1		184 Nm3/hr	= 5,12E-02 Nm3/sec
volume flow in Nm3		6533 Nm3/hr	= 1,81 Nm3/sec
vol.flw bij	551 K (inlaat oven)	12831 m3/hr	= 3,56 m3/sec
vol.flw bij	473 K (schoorst.temp.)	10964 m3/hr	= 3,05 m3/sec
relatieve gasverbruik		449 %	
relatieve volumeflow		186 %	
rel.volume flow bij	551 K (inlaat)	169 %	
rel.volume flow bij	473 K (schrstrn)	186 %	
Energiebalans			
Aardgas in	2087 kW	Electriciteit	897 kW
		GT verlies	483 kW
Lucht in	0 kW	Schoorsteen	436 kW
<u>Brood in.</u>	<u>0 kW</u>	<u>deeg+lek</u>	<u>194 kW</u>
	2087 kW		2011 kW
Energie separate opwekking elektriciteit		2137 kWe	
Relatieve energiebesparing		20%	

broodoven model 1

Conventionele indirect gestookte oven

Input

Aant.ton deeg/hr	1,00 ton/hr	0,28 kg/s	
Energie in deeg	500 MJ/ton		
Energieverliezen	200 MJ/ton		
Schoorsteenverliezen	184 MJ/ton	Berekeningsresultaat iteratieve berekening	
benod.MJ/ton deeg	884 MJ/ton	883,60 MJ/hr	245 kW
schoorsteen temp	200 C	473,15 K	
lambda	2,50		(natte lucht)
Cal. waarde NG	31,70 MJ/Nm3		
normaaldichtheid rookgas	1,36 kg/Nm3		
cp rookgas	1,50 kJ/Nm3.K	1,50E-03 MJ/Nm3.K	
normaaldichtheid aardgas	0,83 kg/Nm3		

Resultaten

benodigde NG	27,9 Nm3/ton		
Adiabatische vlam temp	906 C	1179 K	
		per uur	per sec.
Schoorsteen verlies		184 MJ/hr	= 51 kW
Gasverbruik		28 Nm3/hr	= 0,0064 kg/sec
Energie excl. rookgasverlieze	700 MJ/ton		

Energiebalans

Aardgas in	245 kW	Electr.	0 kW
Lucht in	0 kW	Rookgas	51 kW
<u>Brood in</u>	<u>0 kW</u>	<u>Brood</u>	<u>194 kW</u>
	245 kW		245 kW

Berekening hoeveel lucht voor stoichiometrische verbranding

	liters/mol	22,40		atm getal
DATA				
benodigde O2(stoich)	1,77 m3/m3NG	123 Nm3/hr	175,71 kg/hr	32,00
N2	6,58 m3/m3NG	459 Nm3/hr	574 kg/hr	28,00
Ar	0,08 m3/m3NG	5 Nm3/hr	10 kg/hr	40,00
CO2	0,03 m3/m3NG	2 Nm3/hr	4 kg/hr	44,00
H2O	0,10 m3/m3NG	7 Nm3/hr	5 kg/hr	18,00
benodigde lucht	8,53 m3/m3NG	594 Nm3/hr	769 kg/hr	
verbandings prod. (stoich)				
N2	6,73 m3/m3NG	469 Nm3/hr	670 kg/hr	32,00
Ar	0,08 m3/m3NG	5 Nm3/hr	10 kg/hr	40,00
CO2	0,90 m3/m3NG	63 Nm3/hr	123 kg/hr	44,00
H2O	1,78 m3/m3NG	124 Nm3/hr	100 kg/hr	18,00
exhaust gas	9,49 m3/m3NG	661 Nm3/hr	902 kg/hr	

broodoven model 3

Oven indirect gestookt met GT-ABC

aant.ton deeg/hr	1,00 ton/hr	totaal/hr	
MJ deeg+lek/ton	700 MJ/ton	700 MJ/hr	0,194 MW
schoorsteen verliezen (iteratief)	1571 MJ/ton		0,436 MW
benodigde energie lucht/ton deeg	2271 MJ/ton		0,631 MW
benodigde energie lucht	631 kW		0,631 MW
Temperatuur ingang oven	278 C	551,15 K	
Schoorsteentemperatuur	200 C	473,15 K	
cp schoorsteengas (lucht)	1,374 kJ/Nm3.K	1,37E-03 MJ/Nm3.K	1,01 kJ/kg K
Normaaldichtheid schoorsteengas	1,360 kg/Nm3		
Benodigde hete lucht flow	2,47 kg/s		
Energie in hete lucht	631 kW	1,81 Nm3/s	6533 Nm3/hr
Benodigde energie brood	194 kW		

Elektriciteitsproductie Korobitsyn	7.090 kWe		
Massaflow Korobitsyn	19,50 kg/s		
Elektriciteitsproductie	897 kW		0,90 MW

Elektrisch rendement GT-ABC	0,43 -		
Aardgasverbruik	2087 kW	7513 MJ/hr	2,09 MW

Cal. waarde NG	31,7 MJ/Nm3		
benodigde NG	66 Nm3/tn br.	237 Nm3/hr	

		per uur	=	per sec.
schoorsteen verlies		1571 MJ/hr	=	436,25 kWe
gasverbruik		237 Nm3/hr	=	0,055 kg/sec
extra gas t.o.v. systeem 1		209 Nm3/hr	=	5,81E-02 Nm3/sec
volume flow in Nm3		6533 Nm3/hr	=	1,81 Nm3/sec
vol.flw bij	551 K (inlaat oven)	12831 m3/hr	=	3,56 m3/sec
vol.flw bij	473 K (schoorst.temp.)	10964 m3/hr	=	3,05 m3/sec

relatieve gasverbruik 850 %

Energiebalans

Aardgas in	2087 kW	Electriciteit	897 kW
		GT verlies	483 kW
Lucht in	0 kW	Schoorsteen	436 kW
<u>Brood in</u>	<u>0 kW</u>	<u>Deeg+lek</u>	<u>194 kW</u>
	2087 kW		2011 kW

Energie separate opwekking elektriciteit 2137 kWe
 Relatieve energiebesparing 12%

broodoven model 2 Oven indirect gestookt met gasturbineafgasen

aant.ton deeg/hr	1,00 ton/hr	totaal/hr	
MJ deeg/ton	700 MJ/ton	700 MJ/hr	0,194 MW
schoorsteen verl(guess)	425 MJ/ton		
benodigde energie/ton deeg	1125 MJ/ton		0,313 MW
Elektrische efficiency	0,23		
MJ systeem/ton deeg	1461 MJ/ton	1461,09 MJ/hr	0,406 MW
rookgas temp	200 C	473 K	
Inlaat temp oven	505 C	778 K	
Cal. waarde NG	31,7 MJ/Nm3		
benodigde NG	46 Nm3/tn br.	46 Nm3/hr	
lambda =	3,50 (natte lucht)		
Normaaldichtheid rookgas	1,36 kg/Nm3		
cp schoorsteengas	1,50 kJ/Nm3.K	1,50E-03 MJ/Nm3.K	1,10 kJ/kg K
Vlamtemp. GT	651,31 C	924,46 K	

		per uur	=	per sec.
schoorsteen verlies		425 MJ/hr	=	0,12 MJ/sec
gasverbruik		46 Nm3/hr	=	0,011 kg/sec
extra gas t.o.v. systeem 1		18 Nm3/hr	=	5,06E-03 Nm3/sec
massa flow		2089 kg/hr	=	0,58 kg/sec

relatieve gasverbruik 165 %

Energiebalans

Aardgas in	406 kW	Electriciteit	93 kW
Lucht in	0 kW	Rookgas	118 kW
<u>Brood in</u>	<u>0 kW</u>	<u>Brood</u>	<u>194 kW</u>
	406 kW		406 kW

DATA	liters/mol	22,40	atm getal	
benodigde O2(stoich)	1,77 m3/m3NG	284,73 Nm3/hr	406,75 kg/hr	32,00
N2	6,58 m3/m3NG	1062,13 Nm3/hr	1327,66 kg/hr	28,00
Ar	0,08 m3/m3NG	12,58 Nm3/hr	22,47 kg/hr	40,00
CO2	0,00 m3/m3NG	0,48 Nm3/hr	0,95 kg/hr	44,00
H2O	0,10 m3/m3NG	15,81 Nm3/hr	12,70 kg/hr	18,00
benodigde lucht	8,53 m3/m3NG	1375,73 Nm3/hr	1770,54 kg/hr	
verbandings prod. (stoich)				
N2	6,73 m3/m3NG	1085,19 Nm3/hr	1550,28 kg/hr	32,00
Ar	0,08 m3/m3NG	12,58 Nm3/hr	22,47 kg/hr	40,00
CO2	0,90 m3/m3NG	145,19 Nm3/hr	285,19 kg/hr	44,00
H2O	1,78 m3/m3NG	287,47 Nm3/hr	231,00 kg/hr	18,00
rookgas	9,49 m3/m3NG	1530,44 Nm3/hr	2088,94 kg/hr	

Elektriciteitsproductie 93 kWe

Rendement elektriciteitspark	42 %
Energieverbruik separate elektriciteit	222 kWe
Relatieve energiebesparing	13%

