

Samenvatting

Het SIA/RAAK-project "Duurzaam produceren in de kunststofindustrie" is samen met elf deelnemende bedrijven door het Lectoraat Kunststoftechnologie opgezet om materiaal- en energieverbruik in de kunststofverwerkende industrie te reduceren. Het project is financieel mogelijk gemaakt door de Stichting Innovatie Alliantie (SIA) via de regeling Regionale Aandacht en Actie voor Kenniscirculatie (RAAK). Doel van dit project is het reduceren van het gebruik aan grondstoffen en energie om bij te dragen aan de doelstellingen zoals geformuleerd in de MeerJarenAfspraken (MJA) tussen de overheid en het bedrijfsleven. Om dit doel te bereiken zijn er twee belangrijke onderzoeken uitgevoerd.

Het eerste onderzoek is een studie naar het energieverbruik van de deelnemende bedrijven. Hiertoe is de Windesheim-energiescan, genaamd NRG-Scope, voor de kunststofindustrie ontwikkeld. De NRG-Scope heeft geresulteerd in de Windesheim Efficiency Energy Index (WEEI). Dit is een benchmark score waarmee inzicht verkregen wordt in de algemene energieprestatie van bedrijven. Uit het onderzoek met de NRG-Scope is gebleken dat de WEEI sterk afhankelijk is van de gebruikte verwerkings-technieken. Bedrijven die zich voornamelijk bezighouden met spuitgieten en extruderen halen een betere WEEI ($> 0,7$) dan bedrijven die gebruik maken van blaastechnieken (folie- en extrusieblazen). Uit het onderzoek kan geconcludeerd worden dat bij alle deelnemende bedrijven nog ruimte is voor verdere energiebesparende maatregelen.

In het tweede onderzoek is gebruik gemaakt van de Procesparameter Effect Methode (PEM) waarmee inzicht verkregen wordt in de invloed die machine-instellingen hebben op producteigenschappen. Uit de studies die met de PEM gedaan zijn, blijkt dat het mogelijk is om gemiddeld 3% materiaal te besparen met behoud van productkwaliteit. Extrapolatie van deze resultaten naar de landelijke kunststofverwerkende sector, met een totale productie van 1.200.000 ton kunststof per jaar, kan resulteren in een besparing van 31.200 ton kunststof per jaar.

Naast een besparing op grondstof is er ook gekeken naar een mogelijke besparing op kleurstofgebruik. Met de PEM is gebleken dat het mogelijk is om minder kleurstof aan producten toe te voegen met gelijkblijvende productkwaliteit. De kosten van kleurstof kunnen, op basis van de uitgevoerde onderzoeken, tot 35% omlaag gebracht worden. Daarnaast betekent dit dat er potentieel minder kleurstof geproduceerd hoeft te worden, waardoor er indirect minder milieubelasting is. Een interessant resultaat is dat het in de onderzoeken mogelijk bleek om de productietijd met 7% te verkorten. Hierbij viel op dat het energieverbruik van de machine gelijk bleef. Dit leidt tot de conclusie dat ook het energieverbruik en de daarmee gepaarde CO₂-uitstoot per kilogram product met 6,8% gereduceerd kan worden. Dit percentage draagt sterk bij aan de CO₂-reductie van 8% ten opzichte van het ijkjaar 1990, zoals afgesproken is in het verdrag van Kyoto en waarop de MJA zijn gebaseerd.

Geconcludeerd kan worden dat het project "Duurzaam produceren in de kunststofindustrie" een goede bijdrage heeft geleverd in het realiseren van de doelstellingen zoals geformuleerd in de MJA.

Meer producten, minder energie Duurzaam produceren in de kunststofindustrie

Lectoraat Kunststoftechnologie

Colofon

Auteurs: Niels Boks, Tonny van Dijk

Eindredactie: Niels Boks, Tonny van Dijk, Masja Mooij, Alexander Jansen, Hans Wolf, Harold Gankema

ISBN/EAN: 978-90-77901-42-7

Met dank aan:

Jolling Lodema voor zijn bijdrage aan de ontwikkeling van de NRG-Scope.

Harm Jan Dekker, Sander van Vliet, Bert-Jan Veldkamp en Michel Pouw voor hun aandeel in het uitvoeren van de experimenten.

Jorien Brak en Frens Tromop voor hun bijdragen aan de illustraties.

Alle betrokken medewerkers van de deelnemende bedrijven voor hun inzet.

Meer producten, minder energie

Duurzaam produceren in de kunststofindustrie

Lectoraat Kunststoftechnologie

Duurzaam produceren in de kunststofindustrie

Lectoraat Kunststoftechnologie

Inhoudsopgave

Inleiding “Duurzaam produceren in de kunststofindustrie”	5
<i>Doelstelling</i>	5
Projectdeelnemers	6
Gebruikte onderzoekstechnieken	7
<i>NRG-Scope</i>	7
<i>Procesparameter Effect Methode</i>	12
Onderzochte verwerkingstechnieken	15
<i>Spuitgieten</i>	15
<i>Extrusie</i>	16
<i>Folieblazen</i>	17
<i>Extrusieblazen</i>	18
<i>Gieten van polyurethaan</i>	19
Resultaten NRG-Scope onderzoek	20
Resultaten PEM-onderzoek	23
<i>Optimalisaties in het spuitgietproces</i>	25
<i>Gewichtsbesparing</i>	25
<i>Besparing energieverbruik</i>	27
Optimalisaties in het extrusieproces	29
<i>Gewichtsbesparing</i>	30
<i>Besparing gebruik van kleurstof</i>	31
<i>Besparing energieverbruik</i>	32
Optimalisaties in blaasprocessen	33
<i>Gewichtsbesparing</i>	33
<i>Besparing gebruik van kleurstof</i>	34
<i>Besparing energieverbruik</i>	36
Analyse van afvalstromen	37
PEM-resultaten samengevat	39
Vergelijkend onderzoek spuitgietmachines	40
Conclusies en aanbevelingen	44
 Bijlage 1: Projectpartners	 46

Inleiding “Duurzaam produceren in de kunststofindustrie”

Schaarste van bronnen zorgt ervoor dat bedrijven zowel nu als in de toekomst duurzamer willen produceren. Als we spreken van duurzaam produceren gaan we uit van een balans tussen de verschillende economische, ecologische en maatschappelijke belangen. Met dit in gedachten hebben circa 1000 bedrijven de MeerJarenAfspraken ‘Energie-Efficiency 2005-2010’ ondertekend (MJA). Van deze 1000 bedrijven zijn er circa 115 actief in de rubber-, lijm- en kunststofindustrie.

De energiekosten vormen een significant onderdeel (5-10%) van de kostprijs van kunststofproducten. De laatste jaren is de prijs voor energie fors gestegen. De materiaalkosten vormen echter het grootste aandeel in de kostprijs (gemiddeld 50-75%) en door de stijgende olieprijs zal dit aandeel blijven groeien.

Door efficiënter materiaalgebruik en effectieve recycling van kunststoffen kan met behulp van nieuwe technieken voor procesoptimalisatie een materiaalbesparing van gemiddeld 2% per jaar behaald worden. Dit komt overeen met de ambitie die in de MJA3 van het Ministerie van Economische Zaken is overeengekomen. Om deze MJA3 te realiseren hebben de bedrijven toegezegd elke vier jaar een Energy-Efficiency Plan (EEP) op te stellen waarin zekere, onzekere en voorwaardelijke maatregelen zijn opgenomen. Vervolgens gaan de bedrijven, deels in de door de NRK georganiseerde collectieve projecten, werken aan de uitvoering van de voorgenomen maatregelen. Het SIA/RAAK-project “Duurzaam produceren in de kunststofindustrie” draagt hier aan bij door bij diverse bedrijven in de kunststofverwerkende industrie onderzoek te doen naar het verbruik van energie en grondstoffen. Het project betreft een samenwerkingsverband tussen Windesheim en elf regionale bedrijven en één internationale onderneming en is gesubsidieerd door de Stichting Innovatie Alliantie (SIA).

Doelstelling

De belangrijkste doelstelling binnen dit project is het in kaart brengen en verlagen van materiaalgebruik en energieverbruik bij kunststofverwerkende bedrijven.

Om dit doel te bereiken wordt bij elf bedrijven in de kunststofverwerkende industrie een energiescan (NRG-Scope onderzoek) uitgevoerd. Hiermee wordt het globale energieverbruik van een bedrijf in kaart gebracht.

De Procesparameter Effect Methode (PEM) wordt bij deze bedrijven ingezet om in het productieproces te zoeken naar betere procesinstellingen voor het vervaardigen van dat product. Hierbij is het doel om dezelfde productkwaliteit te realiseren, maar met gebruik van minder materiaal en energie. Oftewel: duurzamer produceren in de kunststofindustrie.

Projectdeelnemers

Het project “Duurzaam produceren in de kunststofindustrie” wordt uitgevoerd door een consortium dat bestaat uit het Lectoraat Kunststoftechnologie van Windesheim in samenwerking met de volgende kunststofverwerkende bedrijven:

Deelnemende bedrijven en hun belangrijkste verwerkingsprocessen

Bedrijf	Spuittgieten	Extruderen	Folieblazen	Extrusieblazen	Gieten
Schoeller Arca Systems BV	X				
Promens BV	X				
Timmerije BV	X				
Gerhardi Kunststoftechnik GmbH	X				
AKG Mouldings BV	X				
Kornelis Caps & Closures BV	X				
Wavin BV	X	X			
Dyka BV	X	X			
Hertalan BV		X			
Sphere BV			X		
bpi.indupac			X		
Euro Mouldings BV				X	
Herikon BV					X

Figuur 1: Kunststof, grondstof voor veel producten



Gebruikte onderzoekstechnieken

Om het project “Duurzaam produceren in de kunststofindustrie” uit te voeren, wordt er gebruik gemaakt van verschillende onderzoeksmethoden. In dit hoofdstuk worden de twee belangrijkste technieken toegelicht.

NRG-Scope

Het onderzoek naar het energieverbruik van de deelnemende bedrijven wordt verricht door middel van de, bij Windesheim ontwikkelde, NRG-Scope. Met deze techniek wordt in kaart gebracht wat het energieverbruik van de totale onderneming is. Met de resultaten van dit onderzoek ontstaat niet alleen de mogelijkheid tot het maken van een benchmark, maar ook wordt in kaart gebracht welke maatregelen nog getroffen kunnen worden om het energieverbruik te reduceren.

Door gebruik te maken van de Windesheim-energiescan kan een bedrijf op een eenvoudige wijze een indruk krijgen van zijn energieverbruik. Deze zogenoemde NRG-Scope is een quick scan waarmee een bedrijf een indicatie krijgt van zijn energieverbruik. Wanneer een bedrijf deze scan een aantal jaren achtereen uitvoert, kan een goed inzicht worden verkregen in de eigen energieprestatie. Echter, de methode is vanwege de black box-benadering ook geschikt voor benchmark doeleinden tussen bedrijven. De black box-benadering maakt het ook mogelijk om bedrijven die wel in de kunststofverwerkende sector actief zijn te vergelijken, ook al maken zij gebruik van verschillende verwerkings-technieken. Naast feitelijke gegevens, zoals energieverbruik per kilogram product, levert de NRG-Scope dan ook een benchmark indicator: de Windesheim Efficiency Energy Index (WEEI).

De NRG-Scope bestaat uit een vragenlijst met betrekking tot energieverbruik en energiebesparende maatregelen en wordt rekenkundig ondersteund met een Excel-bestand. Wanneer deze basisgegevens beschikbaar zijn en in het Excel-bestand worden ingevoerd, genereert het werkblad een uitslag over de energieprestatie van het bedrijf. Hierdoor is het dus mogelijk om het effect van eventueel genomen energiebesparende maatregelen in kaart te brengen. Omdat het invullen van de scan relatief weinig tijd in beslag neemt, is de NRG-Scope een geschikte tool om het energieverbruik periodiek in kaart te brengen. Hiermee kan de invloed van een energiebesparende maatregel direct in kaart worden gebracht en is het mogelijk verdere acties in te zetten. Dit betekent dat deze scan gebruikt kan worden als optimalisatietool om het energieverbruik terug te dringen om zodoende de concurrentiepositie van een bedrijf te versterken. Dit houdt ook in dat deze scan ingezet kan worden voor het behalen van resultaten, zoals onder meer afgesproken in de MeerJarenAfspraken tussen de overheid en het bedrijfsleven (MJA3).

Zoals eerder aangegeven maakt de NRG-Scope gebruik van een black box-benadering. Hierdoor is de energiescan gebaseerd op algemene indicatoren met betrekking tot energieverbruik. Ook al wordt een grote diversiteit aan bedrijven onderzocht, toch maakt deze benadering het mogelijk om de resultaten/bedrijven met elkaar te vergelijken. In de praktijk bestaat de NRG-Scope uit een eenvoudige vragenlijst die is opgesplitst in drie hoofdgroepen:

- De eerste hoofdgroep heeft betrekking op het energieverbruik. In deze hoofdgroep staan het gasverbruik, het elektriciteitsverbruik, het aantal medewerkers en het productievolume (in kilogram) centraal.
- De tweede hoofdgroep heeft betrekking op de huisvesting (zowel de productieomgeving als de kantoorruimtes) en de al dan niet aanwezige maatregelen met betrekking tot energiebesparing. Hierbij kan gedacht worden aan het gebruik van spaarlampen, het aanwezig zijn van airconditioning, pandisolatie enzovoort.
- In de derde hoofdgroep wordt er een onderscheid gemaakt tussen de productieomgeving en het management. Voor de eerste subgroep (productieomgeving) worden vooral vragen gesteld met betrekking tot het benutte capaciteitsniveau van de machines, het al dan niet gebruik van perslucht, het handhaven van onderhoudsschema's, mogelijkheden voor warmteterugwinning en de inregeling van koelsystemen. Voor de tweede subgroep hebben de vragen betrekking op de aanwezigheid van de gegevens die nodig zijn om energiebesparende maatregelen te treffen. Een voorbeeld van een dergelijke vraag is: *“Wordt het energiezorgsysteem minimaal één keer per jaar door het management geëvalueerd?”*.

Vervolgens worden de antwoorden op alle vragen samengevoegd in één werkblad waarin de resultaten worden gepresenteerd. Deze vragen hebben betrekking op de rekeningen van energieleveranciers en gaan verder over makkelijk te beantwoorden algemene vragen.

Zoals eerder beschreven bestaat de NRG-Scope uit het beantwoorden van een vragenlijst. In Figuur 2 is een gedeelte van het Excel-bestand weergegeven.

Figuur 2: Voorbeeldvragen NRG-Scope

2.1.1 Elektrotechniek	Score	Impact	Totaal
Hoog frequente verlichting		1	0
Reflectoren achter open TL-lampen		1	0
Aanwezigheidssensoren		1	0
PL/SL lampen i.p.v. gloeilampen		1	0

In Figuur 2 is een gedeelte afgebeeld uit de tweede hoofdgroep (huisvesting), waarbij gekeken wordt naar de verlichting in werkruimtes. Bij het beantwoorden van de vragen moeten alleen de scores en de impacts ingevuld worden. De scores moeten op de volgende wijze worden ingevuld:

- Als het antwoord op de vraag ‘nee’ is, dan krijgt deze de score 0.
- Als het antwoord op de vraag ‘ja’ is, dan krijgt deze de score 2.
- Als het antwoord een tussenweg betreft, dan krijgt deze de score 1.

De hierboven beschreven tussenweg kan bijvoorbeeld ontstaan als een deel van de gebruikte lampen in een kantoorruimte uit hoog frequente verlichting bestaat.

Bij impacts kan worden aangegeven of een vraag wel of niet relevant is door middel van een 0 of een 1. Hierbij geldt dat een 0 wordt ingevoerd als het betreffende onderwerp niet relevant is en een 1 wanneer dit wel het geval is. Hierdoor kunnen vragen worden uitgesloten die niet van toepassing zijn op het desbetreffende bedrijf. Dit is vooral van toepassing als het gaat om productieproces afhankelijke parameters.

In de volgende stap wordt per cluster van vragen een sub totaal berekend door de scores en impacts met elkaar te vermenigvuldigen en deze vervolgens op te tellen. In Figuur 3 is een fictief voorbeeld weergegeven.

Figuur 3: Voorbeeld van een ingevulde sectie vragen

2.1.1 Elektrotechniek	Score	Impact	Totaal
Hoog frequente verlichting	2	1	2
Reflectoren achter open TL-lampen	1	1	1
Aanwezigheidssensoren	2	1	2
PL/SL lampen i.p.v. gloeilampen	1	1	1
Nachtschakeling verlichting	1	1	1
Veegpulsschakeling	0	0	0
Lichtreclame 's nachts uitgeschakeld	1	1	1
Daglichtregeling	1	1	1
Automatische uitschakeling computers	0	0	0
Periodiek onderhoud	1	1	1
		8	10

In het voorbeeld is te zien dat het betreffende bedrijf gebruik maakt van hoog frequente verlichting en dat een gedeelte van de TL-lampen niet voorzien is van een reflector. Daarnaast blijkt dat in dit bedrijf geen veegpulsschakeling aanwezig is, maar dat deze voor het bedrijf ook niet relevant is (de impact is namelijk op 0 gezet). De subtotalen staan onderaan de kolommen. Het sub totaal van de impact is 8. Dit komt doordat twee aspecten

voor dit bedrijf niet relevant zijn. De kolom 'totaal' wordt verkregen door de score te vermenigvuldigen met de betreffende impact. Vervolgens worden deze uitkomsten bij elkaar opgeteld. Deze optelsom geeft aan wat de werkelijke absolute score is voor die sectie. In het voorbeeld van Figuur 3 is dat de waarde 10.

In de resultatensectie (zie Figuur 4 voor een voorbeeld) wordt vervolgens gekeken naar de maximale score per sectie. Deze is afhankelijk van het aantal vragen dat voor het bedrijf relevant is. Uit Figuur 2 blijkt dat acht vragen wel relevant zijn voor het bedrijf (aangegeven met een 1 in de kolom 'impact') en twee niet (aangegeven met een 0 in de kolom 'impact'). Als elk van de acht vragen met een 'ja' zou zijn beoordeeld, zouden deze in de kolom 'score' beoordeeld worden met de waarde 2. Dit betekent dat, in dit voorbeeld, het maximaal haalbare aantal punten gelijk is aan $8 \cdot 2 = 16$.

Om de WEEI te berekenen wordt de werkelijke waarde gedeeld door de maximaal haalbare waarde en uitgedrukt in een percentage. In dit geval is dat 63% ($10/16 \cdot 100\%$). Deze procedure wordt toegepast voor elke sectie binnen de vragenlijsten.

In Figuur 4 is een fictief voorbeeld afgebeeld voor de sectie 'huisvesting kantoor'.

Figuur 4: Voorbeeld van een ingevulde sectie 'huisvesting kantoor'

4.1.1 Huisvesting Kantoor	Totaal	Impact	Percentage
Elektrotechniek	10	8	63
Centrale verwarming	11	8	69
Ventilatie en koeling	8	8	50
Bouwkundig	6	8	38

Met deze informatie kan de NRG-Scope op twee manieren gebruikt worden. Ten eerste is in Figuur 4 te zien dat de uitkomsten voor het onderdeel 'elektrotechniek' uit Figuur 3 geleid hebben tot een relatieve score van 63%. Tevens is te zien dat ook voor de overige drie onderdelen (centrale verwarming, ventilatie en koeling en bouwkundig) gegevens zijn ingevuld. Uit dit figuur is direct op te maken dat de relatieve score van het onderdeel 'bouwkundig' erg slecht scoort (38%). Dit houdt in dat het bedrijf een energiewinst kan behalen, door meer aandacht te besteden aan de bouwkundige staat van het kantoor. Ook is te zien dat het onderdeel 'ventilatie en koeling' een gemiddelde score heeft (50%). Hier valt ook nog veel winst te behalen. Op deze manier is per sectie goed te zien waar energiebesparende maatregelen uitgevoerd kunnen worden of gewenst zijn. Dit geeft de organisatie snel inzicht in de mogelijkheden om energie te besparen en daardoor duurzamer te produceren.

De tweede manier om de NRG-Scope te gebruiken is het bepalen van de Windesheim Efficiency Energy Index (WEEI). Dit wordt voor elke sectie op dezelfde wijze gedaan als het bepalen van de relatieve score voor een willekeurig onderdeel (zoals eerder gedaan is voor het onderdeel 'elektrotechniek' dat uitkwam op een score van 63%). Voor de sectie 'huisvesting kantoor' (Figuur 4) zou dit uitkomen op een percentage van 55%. Deze waarde wordt gevonden door eerst de maximale score voor de hele sectie te bepalen. In dit geval is dat gelijk aan 64 (vier onderdelen met elk impact 8. Als elke vraag met ja was beantwoord, was bij elke vraag een score van 2 ingevuld waardoor het totaal uitkomt op $4 \times 8 \times 2 = 64$). De werkelijke score bedraagt 35 ($10+11+8+6$), waardoor het subtotaal voor de sectie 'huisvesting kantoor' uitkomt op $35/64 \times 100\% = 55\%$. Op gelijke wijze worden voor de secties 'huisvesting productie', 'productie' en 'management' percentages bepaald. Deze percentages zijn de input om de WEEI te berekenen. Deze index is altijd een getal tussen 0 en 1. De beschreven methodiek zorgt ervoor dat, onafhankelijk van de gebruikte verwerkingstechnieken binnen een onderneming, een maximale score van 1 altijd mogelijk is. Hoe meer een bedrijf afwijkt van deze maximale waarde, hoe meer mogelijkheden er zijn tot verbeteren van de energieprestatie.

Procesparameter Effect Methode

Om een productieproces te kunnen optimaliseren moet er vooraf goed worden nagedacht over een strategie om dit te realiseren. Allereerst moet bepaald worden op welke gebieden optimalisatie gewenst is. In het kader van dit SIA/RAAK-onderzoek is gekozen voor het reduceren van het productgewicht. Door te besparen op grondstoffen kan een bijdrage geleverd worden aan duurzaam produceren. Als het spuitgietproces als voorbeeld genomen wordt, zijn er meerdere procesparameters die het uiteindelijke productgewicht beïnvloeden. Het gaat dan bijvoorbeeld om de inspuitnelheid, de hoeveelheid nadruk, maar ook de tijd die gebruikt wordt in de nadrukstap van het proces. Verder kunnen de temperaturen van de smelt en de matrijs een rol spelen. Om een indruk te krijgen van de invloed van deze parameters op het productgewicht, moeten er experimenten uitgevoerd worden.

Bijvoorbeeld, als gekozen wordt om de invloed van twee parameters te bestuderen, moeten er minimaal vier experimenten uitgevoerd worden. Immers, elke parameter moet minstens op twee instelwaarden (een lage en een hoge) geëvalueerd worden en die instellingen moeten in elke mogelijke combinatie voorkomen. In Tabel 1 is een overzicht te zien van de benodigde instellingen voor de experimenten.

Tabel 1: Schematische overzicht voor experimenten met twee parameters

Experiment	Instelwaarde parameter A	Instelwaarde parameter B
1	Laag	Laag
2	Laag	Hoog
3	Hoog	Laag
4	Hoog	Hoog

Hierbij wordt aangenomen dat de invloed van de parameters op de producteigenschappen (bijvoorbeeld gewicht) lineair is. Stel dat één van de gekozen parameters de nadruk is en dat voor de instelwaarden 50 en 60 bar respectievelijk wordt gekozen. Na het uitvoeren van de experimenten blijkt dat de producten, die geproduceerd zijn met een nadruk van 50 bar, een gewicht hebben van 150 gram. De overige producten hebben een gewicht van 170 gram. De aanname van lineaire verbanden zou nu inhouden dat per 1 bar nadruk het product een gewichtverandering van 2 gram (20/10) ondergaat. Deze aanname blijkt in de praktijk ook goed toepasbaar te zijn als het verschil tussen de instelwaarden niet te groot is.

Zoals eerder is aangegeven, hebben meerdere parameters binnen het spuitgietproces invloed op het gewicht van het product. Wanneer deze mee worden genomen in analyses, zal het aantal uit te voeren experimenten toenemen. Bij drie parameters zijn dit acht (namelijk 2^3) experimenten en bij vier parameters moeten zestien (2^4) experimenten uitgevoerd worden om de invloeden te bepalen. Hierbij moet in gedachten worden gehouden dat er niet alleen sprake is van zuivere invloeden van de parameters. Wanneer in een spuitgietanalyse de hoogte van de nadruk en de duur van de nadruk worden betrokken, is direct duidelijk dat bij een hogere nadrukwaarde het gewicht van het product toeneemt.

Ook wanneer de duur van de nadruk verhoogd wordt, is voor te stellen dat het gewicht van het product toeneemt (mits de aanspuiting nog niet gestold is). Echter, het is ook direct duidelijk dat deze twee parameters elkaar beïnvloeden. Het product zal nog zwaarder worden wanneer zowel de nadruk verhoogd en de nadrukduur verlengd wordt. Dit soort beïnvloeding wordt ‘interactie’ genoemd. Bij een full testing (acht experimenten in het geval van drie parameters, of zestien experimenten in het geval van vier parameters), worden alle mogelijke interactietermen uitgerekend en wordt een compleet beeld verkregen. Er bestaat wel een spanningsveld bij het doen van dergelijk onderzoek. Enerzijds is het nodig om bij de analyses zoveel mogelijk parameters en invloeden volledig te bestuderen, anderzijds gaat dan de benodigde tijd voor experimenten sterk omhoog. Vooral dit laatste is in veel bedrijven een probleem. De wens om veel informatie te krijgen is er wel, maar het uitvoeren van een dergelijk uitgebreid onderzoek kost teveel tijd.

De oplossing voor dit spanningsveld ligt in de methodiek Design of Experiments (DoE). In deze methodiek wordt gekeken naar een manier om zoveel mogelijk informatie te verkrijgen uit zo min mogelijk experimenten. Eén van de belangrijkste personen op het gebied van DoE is de Japanner Genichi Taguchi. Hij ontwikkelde een model op basis van de statistische ANalysis Of Variances-analyse (ANOVA) om significante verschillen tussen de gemiddelden van groepen te bepalen. Taguchi ontdekte dat, als de te onderzoeken parameters weinig interactie met elkaar vertonen, één van de interactietermen verwaarloosd kan worden. Om dit te illustreren wordt gebruik gemaakt van Tabel 2. In deze tabel is niet alleen te zien welke experimenten uitgevoerd moeten worden als er een full testing met twee parameters wordt uitgevoerd, maar ook welke interactietermen voorkomen.

Tabel 2: Full testing twee parameters met interactietermen

Test	Instelwaarde parameter A	Instelwaarde parameter B	Interacties
1	Laag	Laag	A _{Laag} x B _{Laag}
2	Laag	Hoog	A _{Laag} x B _{Hoog}
3	Hoog	Laag	A _{Hoog} x B _{Laag}
4	Hoog	Hoog	A _{Hoog} x B _{Hoog}

Met de voorwaarde dat de gekozen parameters A en B elkaar weinig beïnvloeden, is het logisch dat de interactietermen AxB erg klein zijn. Taguchi ontdekte dat in die gevallen de kolom met daarin de interactietermen, vervangen kon worden door een derde in te stellen parameter. De voordelen zijn duidelijk: in hetzelfde tijdsbestek kan meer informatie worden ingewonnen. Hierbij wordt wel geaccepteerd dat de uitkomsten minder nauwkeurig zijn, omdat er geen interactietermen meer worden meegenomen.

Deze methodiek is uit te breiden naar zoveel parameters als wenselijk is, waarbij steeds één kolom met interactietermen vervangen wordt door een kolom met een in te stellen parameter.

Op basis van deze technieken is de Procesparameter Effect Methode (PEM) ontwikkeld. Deze methode maakt gebruik van bovenstaande principes en is toegesneden op het onderzoeken van vier parameters in een productieproces, stuurparameters genoemd. Eén van de grote krachten van de PEM is dat het gebruik maakt van één overzichtelijke Excel-sheet. Nadat bepaald is met welke stuurparameters gevarieerd wordt en op welke waarden deze ingesteld moeten worden, worden de gegevens in de Excel-sheet ingevoerd. Het model genereert vervolgens een schema van experimenten. De onderzoeker voert deze experimenten uit en noteert de resultaten (zogenoemde 'doelparameters' zoals bijvoorbeeld het gewicht of de mechanische eigenschappen van een product) in het Excel-werkblad. Als alle experimenten zijn afgerond en verwerkt, heeft het model de invloeden uitgerekend. Het grote voordeel van de PEM is dat de analyses niet gedaan worden op basis van varianties (die nodig zijn voor het bepalen van statistisch significante verschillen tussen groepen), maar dat de resultaten direct worden weergegeven in daadwerkelijk meetbare effecten (hoeveel het gewicht van een product bijvoorbeeld groter wordt als de nadrukhoogte wordt verhoogd). Hiermee wordt direct duidelijk welke invloed een parameter heeft en hoe groot deze is. Het model stelt onderzoekers (machine operators) in staat om te voorspellen wat er met een specifieke eigenschap van een product gebeurt als de instellingen worden veranderd.

In de laatste stap van een PEM-onderzoek kunnen de vooraf bedachte optimale instellingen ingevoerd en geëvalueerd worden om zodoende ook te controleren of de voorspellingen kloppen. De analyse van een productieproces kan met de PEM binnen één werkdag worden afgerond, waarmee deze techniek zeer interessant is voor gebruik in (productie)bedrijven.

De Procesparameter Effect Methode is een zeer krachtige techniek waarmee onderzoek naar een betere kwaliteit van producten gedaan kan worden. Maar door deze methode wordt men ook in staat gesteld om in bredere zin naar het proces te kijken. De enige voorwaarden zijn dat de parameters waarmee gevarieerd wordt, goed in te stellen zijn en dat er duidelijk meetbare 'doelparameters' zijn. Omdat in de kunststofverwerkende industrie diverse productietechnieken gebruikt worden is de PEM, vanwege de universele toepasbaarheid, een geschikte analysetechniek binnen het project "*Duurzaam produceren in de kunststofindustrie*". In dit project zal de PEM vooral worden ingezet om het gebruik van materiaal en energie te verminderen. Omdat de deelnemende bedrijven gebruik maken van verschillende verwerkingstechnieken, worden in overleg met een specialist van het deelnemende bedrijf de te onderzoeken parameters vastgesteld.

Onderzochte verwerkingstechnieken

De meest voorkomende processen om producten van kunststof te vervaardigen, zijn spuitgieten en extrusie. Tevens spelen de, aan extrusie gerelateerde, processen van folieblazen en extrusieblazen een belangrijke rol. In dit hoofdstuk worden deze processen kort beschreven.

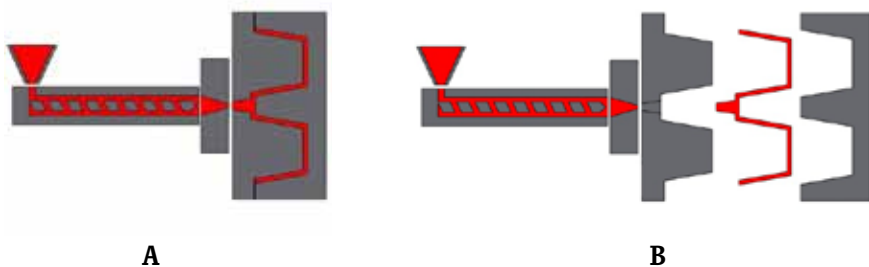
Spuitgieten

Spuitgieten is een bekende verwerkingstechniek om van granulaat een kunststofproduct te maken. In Figuur 5 is het spuitgietproces schematisch weergegeven. Allereerst wordt granulaat verwarmd en onder druk in een matrices gespoten. In de matrices koelt de kunststof af en krijgt het materiaal een vaste vorm. Na het openen van de matrices wordt het product door middel van uitwerpers uit de matrices gedrukt. Daarna wordt de matrices weer gesloten en begint de cyclus opnieuw.

Parameters die een rol spelen in dit proces zijn onder andere:

- | | | |
|--------------------|-------------|------------------------|
| ✓ nadruktijd | ✓ materiaal | ✓ matrijstemperatuur |
| ✓ nadrukhoogte | ✓ stuwdruk | ✓ cilindertemperatuur |
| ✓ koeltijd | ✓ doseerweg | ✓ spuitkoeltemperatuur |
| ✓ injectiesnelheid | | |

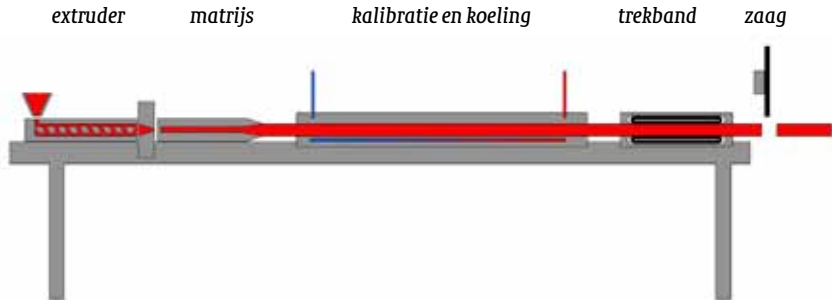
Figuur 5: Schematische weergave van het spuitgietproces: injectie- en nadrukfase (A), uitstoten van het product (B)



Extrusie

Een andere verwerkingstechniek van kunststofproducten is extruderen. In Figuur 6 is een schematische weergave te zien van een extrusielijijn.

Figuur 6: Schematische weergave van een extrusielijijn



Extruderen is een continu proces waarbij door het draaien van de schroef in de extruder het granulaat wordt samengedrukt en vloeibaar wordt gemaakt. Daarna wordt de vloeibare massa door een matrijs gedrukt. Vervolgens wordt de vorm van het product gekalibreerd en het materiaal gekoeld. Met behulp van een trekband wordt het profiel verplaatst waarna een zaag het profiel zaagt op de gewenste lengte.

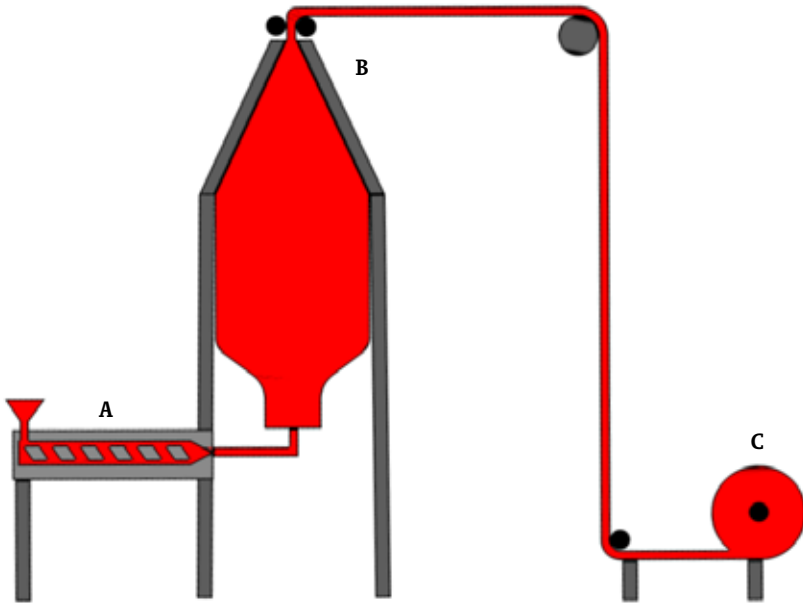
Belangrijke parameters in dit proces zijn onder andere:

- | | |
|---------------------------|--------------------|
| ✓ schroefsnelheid | ✓ koptemperatuur |
| ✓ vulgraad van de schroef | ✓ stuwdruk |
| ✓ vacuümdruk ontgassing | ✓ materiaal |
| ✓ cilindertemperatuur | ✓ trekbandsnelheid |

Folieblazen

Een derde verwerkingstechniek van kunststofproducten is folieblazen. Folieblazen is een techniek om producten met een dunne wand, zoals foliezakken, te produceren. Het proces is vergelijkbaar met extruderen. Het verschil bij folieblazen is dat uit de spuitkop een product met een dunnere wand komt die daarna in de vrije lucht wordt opgeblazen in de vorm van een ballon. In Figuur 7 is een schematische weergave te zien van een opstelling voor folieblazen.

Figuur 7: Schematische weergave folieblazen met de extruder (A), ballon (B) en opwikkelinstallatie (C)



Belangrijke parameters in dit proces zijn vergelijkbaar met die van het ‘gewone’ extrusieproces en zijn onder andere:

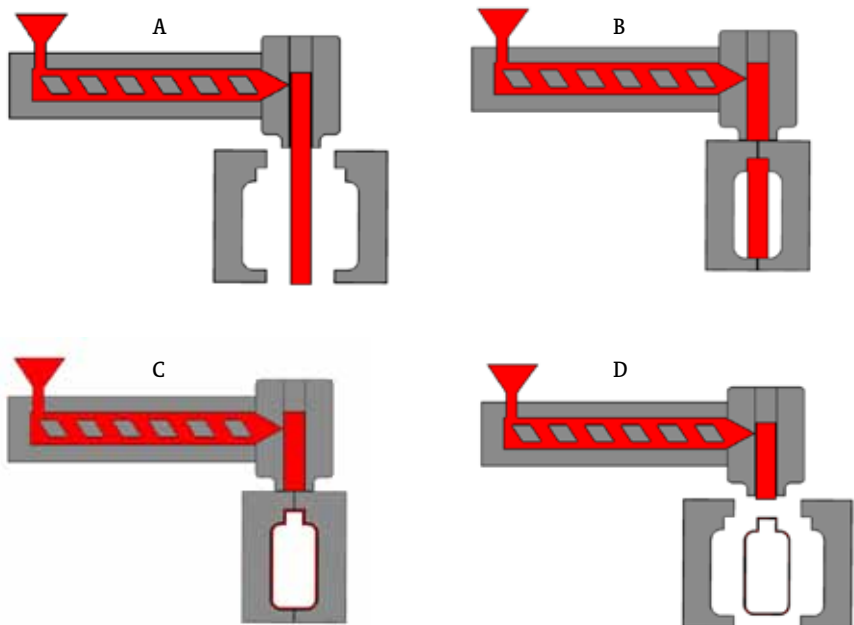
- | | | |
|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| ✓ schroefsnelheid | ✓ koptemperatuur | ✓ luchtdruk in de zak |
| ✓ vulgraad van de schroef | ✓ stuwdruk | ✓ temperatuur van perslucht |
| ✓ vacuümdruk ontgassing | ✓ materiaal | |
| ✓ cilindertemperatuur | ✓ trekband-/opwikkelingsnelheid | |

Extrusieblazen

Naast het hiervoor beschreven folieblazen, bestaat ook het zogenoemde extrusieblaasproces (zie Figuur 8). Het essentiële verschil is dat de geëxtrudeerde kunststofbuis haar eindvorm krijgt doordat het blaasproces in een matrijsholte plaatsvindt. De belangrijkste parameters in dit proces komen overeen met de belangrijkste parameters in zowel het extrusie- als het spuitgietproces en zijn onder andere:

- | | | |
|---------------------------|----------------------|-----------------------------|
| ✓ schroefsnelheid | ✓ koptemperatuur | ✓ blaasdruk |
| ✓ vulgraad van de schroef | ✓ stuwdruk | ✓ temperatuur van perslucht |
| ✓ vacuümdruk ontgassing | ✓ materiaal | ✓ koeltijd |
| ✓ cilindertemperatuur | ✓ matrijstemperatuur | |

Figuur 8: Schematische weergave van het extrusieblaasproces: geleiden van een plastische buis in de matrijs (A), sluiten van de matrijs (B), blaasproces en koelen (C), openen van de matrijs en uitwerpen (D)

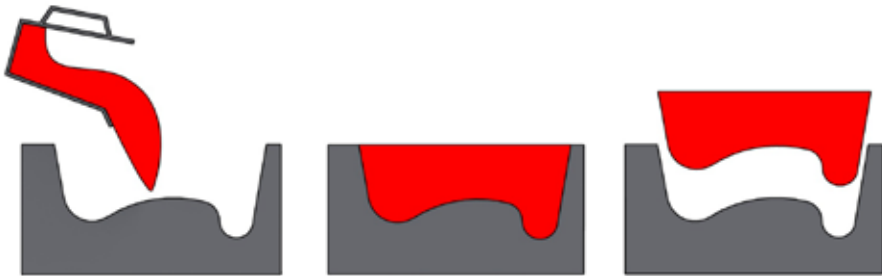


Gieten van polyurethaan

De tot nu toe behandelde productieprocessen zijn hoofdzakelijk bedoeld voor thermoplastische materialen. Polyurethanen (PU) zijn echter thermoharders en het verwerken ervan vraagt om een eigen aanpak. Eén van de mogelijke manieren om PU-producten te maken, is door de vloeibare componenten te gieten in een mal. Echter, voordat er gegoten kan worden moeten de verschillende componenten met elkaar gemengd worden. De hoofdcomponenten zijn polyol en isocyanaat. De chemische structuur van deze stoffen in combinatie met de verhouding tussen polyol en isocyanaat bepalen de eigenschappen van het resulterende PU-materiaal. Na het gieten moet de mal waarin het PU-mengsel zit nog enige tijd bij een geschikte temperatuur uitharden.

Omdat het eigenlijke gieten handmatig gedaan wordt, is de gieter zelf een van de belangrijke factoren voor het verkrijgen van een goed product. Verder zijn belangrijke parameters in dit proces: temperaturen van grondstoffen, matrijs en uithardtemperatuur, gebruikstijd van gemaakt mengsel, samenstelling van het materiaal en de uithardtijd.

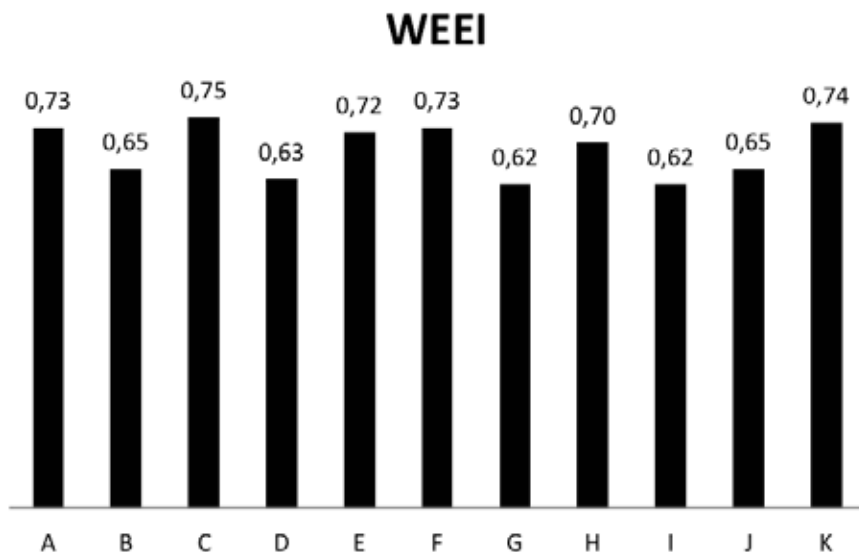
Figuur 9: Schematische weergave van het gietproces



Resultaten NRG-Scope onderzoek

De resultaten van alle deelnemende bedrijven worden gepresenteerd met behulp van de WEEI (zie Figuur 10).

Figuur 10: Geanonimiseerde WEEI van de deelnemende bedrijven



Uit Figuur 10 is direct af te lezen dat alle bedrijven een WEEI hebben in de range van 0,62–0,75. Op deze schaal bekeken, met een maximale WEEI van 1,0 als referentie, scoren alle bedrijven een voldoende als het gaat om energiebesparing. Het valt op dat een aantal bedrijven een lagere voldoende hebben (bedrijven B, D, G, I en J), terwijl andere bedrijven een ruimere voldoende scoren (A, C, E, F, H en K). In algemene zin kan gesteld worden dat de relatief grotere bedrijven beter in staat zijn om energiebesparende maatregelen door te voeren dan de relatief kleine bedrijven.

Bedrijven die zich bezighouden met spuitgieten en/of extrusie zijn doorgaans in staat een relatief hoge WEEI-score te behalen. Een uitzondering hierop moet gemaakt worden voor de volgende situaties:

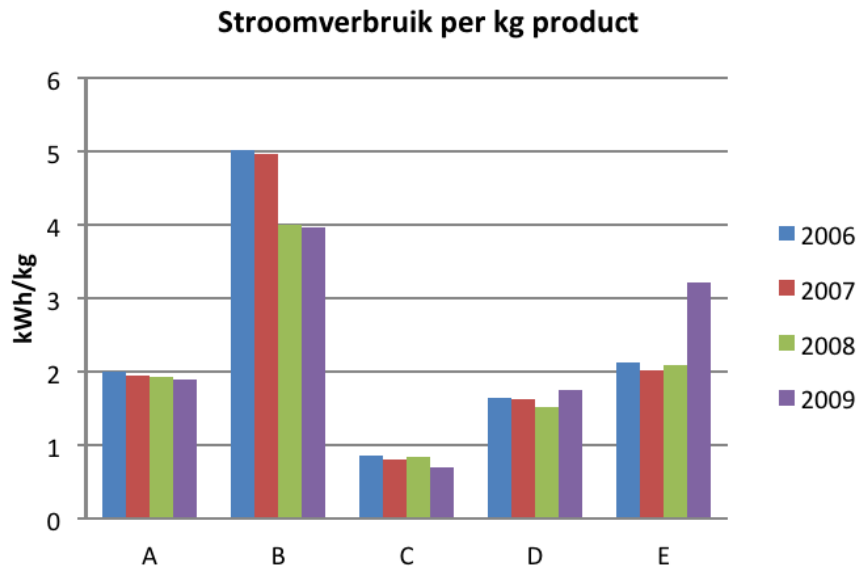
- 1) Het bedrijf is actief in een speciality sector.
- 2) Het bedrijf maakt gebruik van “bijzondere” processen, zoals blaastechnieken.

Een mogelijke verklaring hiervoor is dat bij deze twee situaties de producten en/of benodigde processen complexer zijn. Als dan ook bij investeringsbeslissingen meer gekeken wordt naar economische factoren dan naar duurzame facetten van een productiemiddel, heeft dit een negatief effect op de WEEI. Echter, voor alle deelnemende bedrijven geldt dat er nog mogelijkheden bestaan voor het reduceren van het algemene energieverbruik en daarmee de WEEI te maximaliseren.

De NRG-Scope maakt het ook mogelijk om over meerdere jaren te kijken naar andere prestatie-indicatoren. Voorbeelden hiervan zijn het gasverbruik per vierkante meter, medewerker of kilogram product, maar ook stroomverbruik per vierkante meter, medewerker of kilogram product. Deze getallen zijn voor een bedrijf heel zinvol om de eigen, interne energiehuishouding in kaart te brengen. Maar vanwege de grote verscheidenheid aan huisvesting, aantallen medewerkers en verwerkingsprocessen, zijn deze indicatoren niet erg zinvol om bedrijven in algemene zin onderling met elkaar te vergelijken.

In het uitgevoerde onderzoek zijn deze kengetallen wel uitgerekend. In Figuur 11 is een voorbeeld weergegeven voor vijf bedrijven waarbij de hoeveelheid kWh per kilogram product is berekend.

Figuur 11: Voorbeeld van het verbruik aan kWh per kilogram product voor vijf geanonimiseerde bedrijven



In Figuur 11 vallen een aantal aspecten op. Ten eerste is te zien dat voor bedrijven A en C, het elektriciteitsverbruik per kilogram langzaam afneemt. Bij bedrijf D lijkt deze trend op te gaan voor de jaartallen 2006-2008. Echter in 2009 is een lichte toename te zien bij bedrijf D, waardoor gesteld kan worden dat het verbruik over vier jaar nagenoeg gelijk is gebleven. Ten tweede valt op dat bij bedrijf B een afname van 20% in elektriciteitsverbruik per kilogram product waarneembaar is. Dit is grotendeels toe te schrijven aan de grotere hoeveelheid geproduceerde producten in het betreffende bedrijf. Als laatste is bij bedrijf E te zien dat gedurende de periode 2006-2008 het elektriciteitsverbruik per kilogram product nagenoeg constant is. In 2009 echter, vindt bij bedrijf E een toename van 33% in dit verbruik plaats. Naar aanleiding van het onderzoek met de NRG-Scope heeft het betreffende bedrijf besloten een diepgaander onderzoek in te stellen naar dit verschijnsel. Dit voorbeeld laat goed zien hoe de NRG-Scope gebruikt kan worden voor interne controle en het inzetten van verbeterprocessen met betrekking tot het energieverbruik. Dit houdt in dat de NRG-Scope een goed instrument is bij de handhaving van de doelen zoals geformuleerd in de MeerJarenAfspraken 'Energie-Efficiency 2005-2010'.

Resultaten PEM-onderzoek

De Procesparameter Effect Methode geeft de gebruiker de mogelijkheid om te zien wat de invloed van procesparameters is op een gekozen uitkomst (bijvoorbeeld het gewicht) van een product. Deze invloed geldt dan specifiek voor dat product bij die omstandigheden. Het is echter interessant om te onderzoeken of de resultaten bij verschillende bedrijven ook een algemene invloed voor een parameter kunnen genereren. Is het bijvoorbeeld mogelijk om voor spuitgietprocessen te bepalen hoeveel het gewicht toeneemt als de nadruk met 1 bar verhoogd wordt? Zoals eerder vermeld zijn er in het project “*Duurzaam produceren in de kunststofindustrie*” bij diverse bedrijven PEM-onderzoeken op verschillende producten uitgevoerd. Dit impliceert ook dat het onderling vergelijken van PEM-resultaten een mooie kans geeft om deze vraag te beantwoorden.

De onderzochte spuitgietproducten variëren van zeer dunwandige voorwerpen van polypropreen tot producten met een dikkere wand gemaakt van PVC of ABS. In onderstaande tabel wordt per spuitgietproces aangegeven hoeveel invloed de nadruk had op het gewicht van de producten. Voor elk experiment staat aangegeven wat de absolute en relatieve verandering in de gebruikte nadruk is.

Als voorbeeld wordt gekeken naar de verschillen tussen experimenten 6 en 8. In experiment 6 is er gewerkt met een nadrukhoogte van 40 en 45 bar (delta = 5 bar). Bij experiment 8 is er gewerkt met nadrukhoogtes van 400 en 450 bar (delta = 50 bar). Op basis van deze instellingen wordt verwacht dat de invloed op het productgewicht bij experiment 6 groter is. Immers, het verschil in gebruikte nadruk is hier het grootst. Uit Tabel 3 blijkt echter dat dit niet het geval is. De grootste invloed van nadrukhoogte op productgewicht, wordt gevonden bij experiment 4 (67%). In dit experiment is de nadruk ingesteld op respectievelijk 68 en 88 bar (delta = 20).

Tabel 3: Invloed van nadruk (bar) op het gewicht van de onderzochte spuitgietproducten, alle waarden zijn absolute getallen en geven daarom geen indicatie voor een toename of afname in productgewicht

Experiment	Invloed parameter (%)	Delta nadruk (bar)	Relatieve nadruk (%)
1	0,19	15	17
2	26,4	20	50
3	33,8	10	22
4	67,3	20	23
5	25,7	10	15
6	40,0	5	11
7	11,4	10	22
8	24,0	50	13
9	27,6	20	29
10	46,7	25	42

Om te zoeken naar een verband tussen de invloed op het productgewicht en de absolute verandering in nadruk wordt gebruik gemaakt van het absolute verschil in nadruk (delta nadruk) tussen de standaardinstellingen en de alternatieve instellingen. Als laatste wordt gekeken naar de relatieve verandering van nadruk in relatie tot veranderingen in productgewicht. Uit de tabel kan worden opgemaakt dat zowel de absolute, als de relatieve verandering in nadruk, in algemene zin geen eenduidig verband heeft met de invloed van de druk op het productgewicht. Vergelijkbare tabellen kunnen worden gemaakt voor de overige onderzochte parameters en processen.

De oorzaak hiervoor ligt in het feit dat elk specifiek product een eigen procesvenster heeft waarbinnen geproduceerd kan worden. Dit procesvenster wordt bijvoorbeeld bepaald door het type materiaal, maar ook door de wanddikte van het product. Daarnaast speelt mee dat niet in ieder onderzoek de grenzen van het procesvenster kunnen worden opgezocht, omdat de productie tijdens de experimenten gewoon doorgaat. Ook geldt dat het niet mogelijk is om altijd exact dezelfde combinatie van parameters te kiezen in alle experimenten. Daarnaast speelt mee dat de bedrijven op verschillende typen machines produceren en bij het aanpassen van een instelbare parameter er mogelijk ook andere (niet in te stellen) parameters mee kunnen veranderen. Ook hierdoor wordt het één op één vergelijken bemoeilijkt.

Hiermee kan worden geconcludeerd dat het niet mogelijk is om in algemene zin conclusies te trekken over de afzonderlijke invloed van één individuele parameter. Dit is te veel afhankelijk van de dimensies van het product en het gebruikte materiaal.

Het blijft echter wel mogelijk om met de PEM-analyses optimalisaties in afzonderlijke productieprocessen te bewerkstelligen. De resultaten hiervan zullen in de volgende paragrafen besproken worden. Als eerste zullen de resultaten in het spuitgietproces worden toegelicht, vervolgens die in het extrusieproces en als laatste worden de blaastechnieken (folieblazen en extrusieblazen) behandeld.

Figuur 12: Productie van kunststof kratten (Foto: Schoeller Arca Systems, Hardenberg)



Optimalisaties in het spuitgietproces

Zoals in de inleiding is aangegeven, is duurzamer produceren het doel van dit onderzoek. In de PEM-analyses van het spuitgietproces is vooral onderzoek gedaan naar parameters die een verwachte invloed hebben op het productgewicht. Zoals bekend is, worden de meeste kunststoffen gewonnen uit aardolie. Dit betekent dat minder gebruik van grondstoffen past in het principe van duurzaam produceren.

Gewichtsbesparing

Eerder is aangegeven dat het niet mogelijk is om in algemene zin iets te concluderen over de absolute invloed van een procesparameter. Wel kan, op basis van de uitgevoerde experimenten, gesteld worden dat er twee parameters uitspringen die het meest bepalend zijn voor het productgewicht. Uit de PEM-analyses blijkt dat de hoogte en de duur van de nadruk de belangrijkste parameters zijn die het productgewicht bepalen. Dit is op zichzelf geen verrassende uitkomst, maar de PEM geeft per (individueel) productieproces aan hoe groot deze invloed is. Tabel 4 geeft een samenvatting van de relatieve invloeden van deze twee parameters. Op verzoek van de deelnemende bedrijven zijn de specifieke instellingen en resultaten geanonimiseerd.

Tabel 4: Relatieve invloed van nadrukhoogte en nadruktijd op het gewicht van de onderzochte spuitgietproducten, experiment 1 geeft de globale PEM-resultaten weer voor een spuitgietproces, in totaal zijn tien spuitgietprocessen geanalyseerd

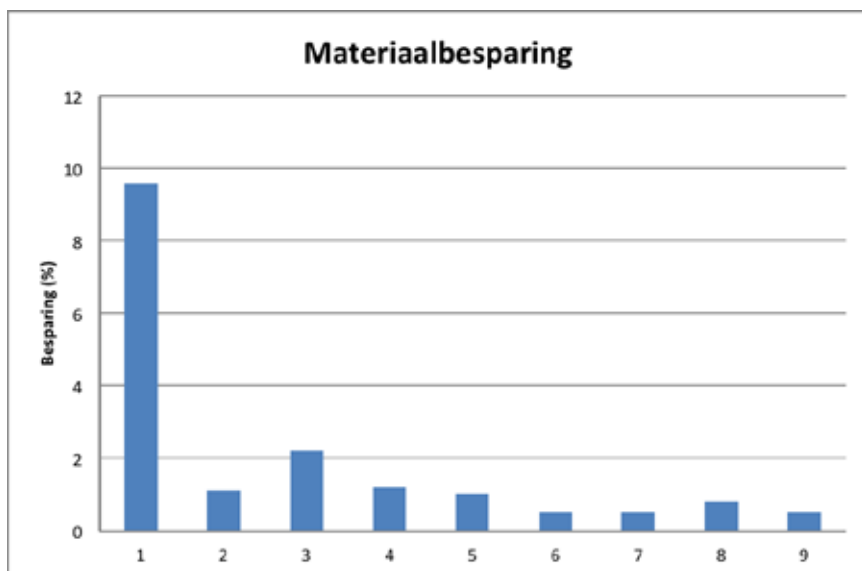
Experiment	Invloed hoeveelheid nadruk (%)	Invloed nadruktijd (%)	Totaal (%)
1	0,19	8,7	8,9
2	26,4	15,3	41,7
3	33,8	39,2	73,0
4	67,3	25,3	92,6
5	25,7	62,6	88,3
6	40,0	43,4	83,4
7	11,4	63,4	74,8
8	24,0	50,8	74,8
9	27,6	53,3	80,9
10	46,7	-*	-*

* Nadruktijd niet gekozen als één van de te onderzoeken parameters

Hierbij moet worden opgemerkt dat de resultaten in experiment 1 een uitzondering zijn. De oorzaak hiervan ligt in het feit dat het type materiaal (gerecycled materiaal vs. virgin materiaal) als parameter is gekozen. Gerecycled materiaal is, ten opzichte van virgin materiaal, zeer heterogeen waardoor het niet altijd constante eigenschappen heeft. Dit maakt het in feite ongeschikt om als parameter te onderzoeken, omdat verondersteld wordt dat de te onderzoeken parameters binnen hun instelling constant te houden zijn. Verder kan uit de tabel worden geconcludeerd dat gemiddeld genomen nadruk en nadruktijd samen verantwoordelijk zijn voor 70-80% van veranderingen in het productgewicht.

Dit betekent dus dat, als het productgewicht omlaag gebracht moet worden, dit het beste gaat als met deze twee parameters gestuurd wordt. Er moet echter wel worden gewaakt voor een verlies aan productkwaliteit. Hierbij moet vooral gedacht worden aan maatvoering (pasvorm op andere producten) en krimp. In alle genoemde productieprocessen is voor dat specifieke product een kwaliteitseis meegenomen in de analyses. Op deze manier is er gezocht naar nieuwe instellingen voor het produceren van het betreffende product, waarbij minder grondstof wordt verbruikt, maar een gelijke kwaliteit wordt bereikt. In Figuur 13 worden de behaalde materiaalbesparingen in het spuitgietproces weergegeven.

Figuur 13: Gerealiseerde materiaalbesparingen bij producten in het spuitgietproces



Uit Figuur 13 kunnen twee belangrijke conclusies getrokken worden. De grootste reductie in productgewicht is gerealiseerd bij product 1. De reden hiervoor is het gebruik van virgin grondstofmateriaal. Wanneer er gerecycled materiaal wordt gebruikt om het voorwerp te produceren, is dit voorwerp 9,6% zwaarder. Echter, in het kader van duurzame productie moet deze winst niet meegerekend worden. Immers, het is duurzamer om recyclaat te gebruiken dan nieuw grondstof te verwerken. Samen met de resultaten uit Tabel 4 kan worden opgemaakt dat voor een succesvolle PEM-analyse een goed gedefinieerd materiaal essentieel is.

De tweede belangrijke conclusie die uit Figuur 13 getrokken kan worden, is dat het mogelijk is om kwalitatief goede producten te produceren terwijl er gemiddeld 1,0% minder materiaal wordt verbruikt. Hierbij moet worden opgemerkt dat het best mogelijk kan zijn om meer materiaal te besparen als aanvullende analyses worden uitgevoerd. Zo kunnen per product dezelfde parameters worden onderzocht, maar in een bredere instellingsrange (nog meer de uitersten van het procesvenster opzoeken).

Figuur 14: Productie van stoelen (Foto: Timmerije, Neede)



Besparing energieverbruik

Een belangrijk aspect in het verwerken van kunststof is dat het energie kost om granulaat te verwarmen en producten te maken. Hoe minder energie nodig is voor het productieproces, hoe beter dat is in het kader van duurzaamheid.

Om een indruk te krijgen van het energieverbruik van een productieproces moeten er twee aspecten betrokken worden. Ten eerste de daadwerkelijke energieconsumptie van de machine tijdens de productie en ten tweede de hoeveelheid grondstof die verwerkt wordt. Voor het in kaart brengen van de energieconsumptie is bij een aantal experimenten gebruik gemaakt van een directe energiemeting. Echter, in deze gevallen bleek dat gedurende de hele experimenteertijd het energieverbruik geen grote veranderingen liet zien. Ook een meer indirecte aanpak, namelijk het bijhouden van het gebruikte motorvermogen van extruders tijdens de productie, gaf aan dat tijdens de diverse instellingen gemiddeld genomen een gelijke hoeveelheid energie werd verbruikt. Hieruit kan geconcludeerd worden dat bij het zoeken naar optimale instellingen voor het spuitgietproces niet meer energie voor het verwerken van de kunststof nodig is.

Omdat in de onderzochte producten de productieomvang (en daarmee materiaalverbruik) erg verschilt, is er besloten om te kijken naar de cyclustijd waarmee de producten geproduceerd worden. Immers, een reductie in cyclustijd betekent dat er gedurende een vastgestelde tijdsperiode meer producten geproduceerd kunnen worden. Voor een vijftal producten is tijdens de PEM-analyses met nadruk gekeken naar veranderingen in de cyclustijd. Deze veranderingen zijn samengevat in Tabel 5.

Tabel 5: Gerealiseerde cyclustijdreducties bij producten in het spuitgietproces

Product	Reductie cyclustijd (%)
2	8,1
3	6,5
4	13,4
5	1,8
6	3,0
Gemiddeld	6,6

Uit de resultaten in Tabel 5 blijkt dat de gemiddelde reductie in cyclustijd 6,6% bedraagt. Samen met het gegeven dat het energieverbruik van de machines gelijk bleef, kan gesteld worden dat de reductie in energieverbruik per kilogram product ook 6,6% bedraagt. Hierbij moet worden opgemerkt dat het gaat om metingen bij vijf producten met verschillende karakteristieken. Wat de exacte reductie in energieverbruik bij een willekeurig kunststofverwerkend bedrijf is, zal door middel van meerdere PEM-analyses op meerdere productielijnen van dat bedrijf moeten blijken. Echter, als de resultaten met voorzichtigheid worden geïnterpreteerd, betekent dit dat het mogelijk is om in een bedrijf zeker 2-3% sneller te kunnen produceren. In dit verband is het goed om te vermelden dat de temperatuercilinder, om de kunststofmassa te verwarmen, op een hogere waarde is ingesteld. Hiermee wordt voorkomen dat de kunststof veel warmer is en dat er mogelijk meer energie nodig is om de producten te koelen dan bij produceren met de standaardinstellingen.

Deze bevindingen leiden dan tot de conclusie dat het gemiddeld energieverbruik per kilogram product potentieel met circa 7% gereduceerd kan worden.

Optimalisaties in het extrusieproces

De aanpak van de PEM in het extrusieproces is vergelijkbaar met de aanpak in het spuitgietproces. Ook in deze onderzoeken is gekeken of er lichtere producten geproduceerd kunnen worden met gelijke kwaliteit. Tevens is er gekeken naar het energieverbruik per kilogram product.

Figuur 15: Extrusielijn voor rubber (Foto: Hertalan, Kampen)



Echter, wat tot nu toe onderbelicht is gebleven is het feit dat zeer veel kunststofproducten voorzien zijn van een kleurstof. Het betreft hier vaak slechts 1-2% van de totale massa van het kunststofproduct. Echter, pigmenten bevatten vaak zware metalen. Tijdens de productie van kleurstoffen en pigmenten wordt er gebruik gemaakt van milieuonvriendelijke chemicaliën. Daarom is het interessant om te kijken naar de mogelijkheden om kleurstofverbruik te reduceren. In de PEM-onderzoeken van het extrusieproces is hier aandacht aan besteed.

Gewichtsbesparing

In totaal is bij drie extrusieprocessen onderzoek gedaan naar materiaalbesparing. Het betreft twee extrusielijnen voor PVC en één lijn voor de productie van rubber. In Tabel 6 zijn de behaalde besparingen weergegeven.

Tabel 6: Gerealiseerde materiaalbesparing bij producten in het extrusieproces

Experiment	Materiaalbesparing (%)
1	1,0
2	8,0
3*	0,0
Gemiddeld	3,0

** Extrusielijn voor productie van rubber*

Opvallend is dat bij experiment 3 geen materiaalbesparing is gerealiseerd. De oorzaak hiervan is dat tijdens het uitvoeren van de PEM-analyses het geëxtrudeerde rubberproduct niet voldeed aan de kwaliteitseisen. Hierdoor moest er tijdens de productie worden bijgestuurd waardoor de resultaten met betrekking tot gewichtsreductie niet betrouwbaar zijn.

Ook is in Tabel 6 te zien dat er bij de PVC besparingen te realiseren zijn met betrekking tot extrusielijnen. Deze zijn toe te schrijven aan de invloed van de snelheid van de trekband en de vacuümdruk in de ontgassingssectie van de extruder. Vooral de materiaalbesparing bij experiment 2 is opvallend te noemen. De verklaring van dit percentage wordt gevonden in zowel de mechanische eigenschappen als de kwaliteitseis van het betreffende product. In de praktijk wordt gesteld dat de mechanische eigenschappen gegarandeerd worden bij een zeker minimum productgewicht. Echter, tijdens de PEM-analyses bleek dat het gehanteerde minimum gewicht aan de hoge kant is. Zelfs wanneer het productgewicht met 8% omlaag werd gebracht, werd nog voldaan aan de gestelde minimale mechanische eigenschappen.

Uit deze experimenten blijkt dat ook bij thermoplastische extrusieprocessen een minimale materiaalbesparing van 1% realiseerbaar is.

Besparing gebruik van kleurstof

Een andere vorm van materiaalbesparing kan gevonden worden in het gebruik van toevoegingen. Eén van de toevoegingen die in nagenoeg alle kunststofproducten te vinden is, is kleurstof. Hoewel het gebruik van zware metalen in pigmenten en kleurstoffen steeds meer aan banden wordt gelegd, blijft het produceren van deze toevoegingen gepaard gaan met energieverbruik en afvalproductie. Het verminderen van kleurstofgebruik in de kunststofverwerkende industrie draagt dus bij aan het concept van duurzaam produceren. Om te onderzoeken of, en zo ja in hoeverre, het mogelijk is om kleurstofbesparing te realiseren is dit onderzocht in één extrusieproces.

Figuur 16: Voorbeeld van producten van het extrusieblaasproces (Foto: EuroMouldings, Nijverdal)



Om het product van dit onderzoek te vervaardigen wordt er bij de standaardproductie 0,5% kleurstof aan de batch toegevoegd. In de alternatieve instellingen is gebruik gemaakt van een toevoeging van 0,35% kleurstof. Per machine-instelling zijn er vijf producten apart gehouden voor analyse en van elke machine-instelling is één product gekozen voor visuele inspectie. Uit deze inspectie bleek dat elk product goedgekeurd zou worden.

Dit leidt tot de conclusie dat er een besparing van circa 30% in gebruik van kleurstof mogelijk is.

Besparing energieverbruik

Naast de onderzoeken naar besparingen in materiaalgebruik is ook bij extrusieprocessen gekeken naar besparingen in energieverbruik. Net als bij de PEM-studies in de spuitgietprocessen is bij de extrusielijnen tijdens de onderzoeken gekeken naar energieverbruik van de machines. Ook hier bleek dat gedurende de onderzoeken, de energieconsumptie en/of het opgenomen vermogen van de extruders niet of nauwelijks veranderden.

Echter, tijdens de alternatieve instellingen bleek dat er wel sneller geproduceerd kon worden zonder nadelige effecten op de productkwaliteit. In Tabel 7 zijn de reducties in productietijd weergegeven.

Tabel 7: Gerealiseerde productietijdverkorting bij producten in het extrusieproces

Product	Productietijdverkorting (%)
1	1,1
2	6,0
3*	4,0
Gemiddeld	3,5

** Extrusielijn voor productie van rubber*

De verklaring van deze productietijdverkorting wordt gevonden in de instellingen van de schroefsnelheid en/of de snelheid van de trekband. Wanneer deze verhoogd worden, worden per tijdseenheid meer producten vervaardigd. In combinatie met een gelijkblijvende energieconsumptie kan geconcludeerd worden dat het energieverbruik per kilogram product, op basis van deze gegevens, met gemiddeld 3,5% omlaag gebracht kan worden. Ook bij deze onderzoeken geldt dat de cilindertemperatuur tijdens de processen op dezelfde instellingen is gebleven en dat de productietijdverkorting inderdaad goed te relateren zijn aan besparingen in energieverbruik.

Optimalisaties in blaasprocessen

In deze paragraaf worden de resultaten gepresenteerd van de onderzoeken die gedaan zijn bij folie- en extrusieblaasprocessen. Bij de folieblaasprocessen is er gekeken naar reductie in productgewicht en wanddikte en productietijdverkorting. Bij de extrusieblaasprocessen is vooral gekeken naar gebruik van kleurstof en perslucht om de druk van het productieproces op het milieu te verkleinen.

Gewichtsbesparing

Uit de PEM-analyses bleek dat bij alle onderzochte folieblaasprocessen één parameter het productgewicht sterk beïnvloedt. Deze parameter is de snelheid waarmee de folie uit de extruderkop wordt getrokken. De invloed van deze parameter op gewichtsveranderingen bedraagt gemiddeld 47% (zie Tabel 8).

Tabel 8: Relatieve invloed van de treksnelheid op het gewicht van de onderzochte folies

Product	Invloed treksnelheid (%)
1	39,2
2	76,2
3	27,0
Gemiddeld	47,5

Figuur 17: Folieblaasinstallatie (Foto: Sphere, Hardenberg)



Het is dan ook logisch dat vooral met deze parameter gevarieerd gaat worden om het materiaalverbruik te reduceren. Echter, wanneer de treksnelheid te hoog is, zal de folie tijdens productie scheuren. In een enkel geval is daarom, bij het vinden van alternatieve instellingen voor gewichtsreductie, ook de schroefsnelheid enigszins vergroot. De gerealiseerde materiaalbesparingen zijn samengevat in Tabel 9.

Tabel 9: Gerealiseerde materiaalbesparing bij producten in het folieblaasproces

Experiment	Materiaalbesparing (%)
1	3,3
2	4,7
3	11,0
Gemiddeld	6,3

Zoals uit Tabel 9 blijkt, is het mogelijk om het gemiddelde materiaalverbruik met 6% te reduceren. Dit is een aanzienlijk percentage en de vraag rijst of de geproduceerde producten nog wel voldoen aan de kwaliteitseisen. Alle producten zijn getest op hun perforatiesterkte. Uit de experimenten bleek dat de producten die met alternatieve instellingen zijn geproduceerd allemaal voldeden aan de minimale waarde. Bij deze besparingen moet echter wel een kanttekening gezet worden. In deze branche komt het vaak voor dat klanten willen dat hun producten een bepaald minimum gewicht hebben, om productkwaliteit te garanderen. De gerealiseerde materiaalbesparingen worden daarom in de praktijk nog niet toegepast.

Besparing gebruik van kleurstof

Bij de onderzoeken in het extrusieproces is gebleken dat er een aanzienlijke besparing in kleurstofgebruik mogelijk is. Het is daarom interessant om te onderzoeken of dit in het extrusieblaasproces ook mogelijk is. Immers, als een geëxtrudeerde buis direct wordt opgeblazen, wordt de wand van het product dunner en bestaat er de mogelijkheid dat de wand transparant wordt.

Om het effect van kleurstofreductie te bestuderen zijn twee producten uit het extrusieblaasproces geselecteerd. Voor één product zijn twee kleurstofanalyses uitgevoerd, voor het andere product is er één kleurstofanalyse uitgevoerd. In Tabel 10 is te zien hoeveel kleurstof aan de kunststof is toegevoegd in de verschillende analyses

Tabel 10: Toegepaste hoeveelheden kleurstof in analyses

Analyse*	Standaard hoeveelheid kleurstof (%)	Alternatieve hoeveelheid kleurstof (%)
A1	1,3	1,0
A2	1,3	0,8
B1	1,0	0,6

* Analyses A1 en A2 betreffen hetzelfde product.

Figuur 18: Kleurstofgebruik in kunststof doppen (Foto: Kornelis Caps & Closures, Steenwijk)



Nadat per analyse acht experimenten zijn uitgevoerd, zijn er per studie vier producten gemaakt met de standaard hoeveelheid kleurstof en vier producten met de alternatieve hoeveelheid. Verder zijn in de analyses ook andere parameters gevarieerd die de optische kwaliteit van de producten kunnen beïnvloeden, namelijk de druk waarmee de kunststofmassa wordt opgeblazen, de tijd waarmee deze druk wordt toegepast (de blaastijd) en de matrijstemperatuur. Binnen het bedrijf zijn verschillende werknemers, variërend van machine operator tot kwaliteitsmedewerker, gevraagd om producten te rangschikken op optische kwaliteit. Uit deze subjectieve scores viel op te maken dat de hoeveelheid kleurstof geen eenduidige relatie had met het afkeuren van de producten. De enige parameter die een zeer duidelijke relatie had met het goed- of afkeuren van het product, is de blaastijd. Wanneer deze korter wordt, is de kans op afkeuren van het product groter.

Op basis van deze analyses kan geconcludeerd worden dat de te gebruiken hoeveelheid kleurstof met circa 40% omlaag gebracht kan worden.

Besparing energieverbruik

Net als bij de onderzoeken naar spuitgieten en extrusie richt de besparing in energieverbruik bij de folieblaasonderzoeken zich op productietijdverkorting. Zoals aangegeven bleek de snelheid waarmee de folie uit de extruderkop wordt getrokken de parameter te zijn waar de meeste materiaalbesparing mee gerealiseerd kon worden. Ten opzichte van de standaardinstellingen is dus voornamelijk deze parameter aangepast. Daar waar mogelijk is de energieconsumptie aan de machine gemeten en hieruit kon geconcludeerd worden dat er nauwelijks meer energie verbruikt werd. Dat betekent dat ook in dit proces een verkorting van de productietijd leidt tot een lager energieverbruik per kilogram product.

Bij het extrusieblaasproces is vooral het gebruik van perslucht een energieverbruikende factor. Tijdens de PEM-analyses is er dan ook onderzocht of de blaasfase uitgevoerd kan worden met minder druk of een kortere blaastijd. In de vorige paragraaf is al aan bod gekomen dat de blaastijd een bepalende factor is in het halen van de optische kwaliteitseis van het product. Uit de vier analyses kan geconcludeerd worden dat het verkorten van de blaastijd leidt tot producten van mindere, optische, kwaliteit. Dit betekent dat dit geen alternatief is om de productietijd te versnellen en daarmee energie te besparen zoals wel mogelijk is bij extrusie en spuitgieten.

Wel is gebleken dat het mogelijk is om kwalitatief goede producten te vervaardigen bij een gereduceerde blaasdruk. Uit alle tests bleek dat wanneer de blaasdruk met 2 bar verlaagd wordt, de producten nog voldeden aan de optische kwaliteitseis. Binnen het bedrijf wordt als vuistregel gesteld dat per bar perslucht de kosten met circa 5% stijgen. Dit betekent dat het, voor de onderzochte producten, mogelijk is om de kosten van de persluchtdruk met 10% te reduceren.

Figuur 19: Met extrusieblazen geproduceerde jerrycans (Foto: EuroMouldings, Nijverdal)



Analyse van afvalstromen

Tot nu toe zijn alle PEM-analyses uitgevoerd met als achterliggende gedachte producten te vervaardigen die een lager gewicht hebben. Dit is echter moeilijk wanneer het polyurethaan-gietproces wordt bestudeerd. Wanneer een PEM-analyse wordt uitgevoerd, wordt er gewerkt met vier parameters in totaal acht combinaties van instellingen. Om tot een goede middeling van gegevens te komen, zijn er voor elke instelling vijf producten nodig. Hiermee komt het totaal op minimaal veertig te analyseren producten. Aangezien polyurethanen (PU) thermoharders zijn, is het niet mogelijk om afgekeurde producten te recyclen. Tevens vindt het gieten handmatig plaats, waardoor tijdens deze stap het zeer lastig is vier onafhankelijk in te stellen parameters te definiëren. Samen met het gegeven dat de productievolumes van de PU-producten doorgaans niet groot zijn, is het niet mogelijk om per combinatie van parameters voldoende producten te analyseren. Vanwege dit probleem met de reproduceerbaarheid is een PEM-analyse zoals uitgevoerd bij de overige processen praktisch niet haalbaar gebleken in dit proces.

Daarom is gekeken naar een fase in het productieproces waar de PEM wel op kon worden toegepast. Tijdens een normale productiedag worden er veel verschillende PU-producten geproduceerd. Producten verschillen niet alleen in vorm, maar vooral in de samenstelling van de componenten (polyol, isocynaat, kleurstof enzovoort). De componenten komen bijeen in de mengkamer van de mengmachine en vervolgens wordt de gewenste hoeveelheid afgetapt. Tijdens het aftappen wordt het eerste deel van het PU-mengsel weggegooid, omdat de stroom van het PU-mengsel eerst stabiel moet zijn. Wanneer voldoende PU-mengsel is afgetapt, zal de machine moeten worden doorgespoeld om te voorkomen dat de samenstelling voor een nieuw product vervuild raakt met de samenstelling van een voorgaand product. Het reinigen vindt plaats met behulp van een organisch chemisch oplosmiddel. Hoe minder van dit middel gebruikt wordt, hoe lager de druk op het milieu wordt. Dit betekent dat er twee afvalstromen gedurende het proces ontstaan. De eerste voor het aftappen (PU-afval) en de tweede na het aftappen (spoelmiddel + PU-resten). Er is besloten om middels een PEM-analyse te onderzoeken of het mogelijk is de hoeveelheid afval te reduceren.

*Figuur 20: Boei van polyurethaan
(Foto: Herikon, Almelo)*



Hiertoe zijn de volgende belangrijke parameters onderzocht: het volume van de gebruikte mengkamer, de spoeltijd en het al dan niet aanwezig zijn van kleurstof in een mengsel. Tevens is gekeken of de stroomsnelheid van het PU-mengsel een invloed had op de PU-afvalstroom voordat de gewenste hoeveelheid voor een product wordt afgetapt.

De resultaten lieten zien dat de PU-afvalstroom (voor aftappen) voornamelijk beïnvloed wordt door het volume van de mengkamer en het gebruik van kleurstof. Zoals eerder is vermeld, moet het uitstromende PU-mengsel homogeen zijn en de mengkamer gelijkmatig verlaten. Er wordt meer PU-afval geproduceerd als er kleurstof aan het mengsel wordt toegevoegd. De verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat het langer duurt voordat het mengsel homogeen de mengkamer verlaat wanneer er pigmenten gebruikt worden. Als het mengsel eenmaal homogeen is, kan het pas worden afgetapt voor productie als de straal ook gelijkmatig, vertikaal, uit de mengkamer stroomt. Uit onderzoek bleek dat dit langer duurt bij een kleine mengkamer dan bij een grote mengkamer. Deze bevindingen leiden tot de conclusie dat er meer PU-afval wordt gegenereerd bij gebruik van een kleine mengkamer.

De afvalstroom van het organisch spoelmiddel wordt voornamelijk bepaald door de tijd waarmee gespoeld wordt (hoe langer men spoelt, hoe meer afval gegenereerd wordt). Echter, er bleek minder afval van het oplosmiddel te ontstaan als er gewerkt werd met een grotere mengkamer. Een mogelijke verklaring hiervoor kan zijn dat er spoelmiddel in de grote mengkamer achterblijft. Omdat deze vloeistof vluchtig is, bestaat de mogelijkheid dat restanten ervan in de mengkamer verdampen en daardoor niet worden meegewogen in de afvalstroom. Het is dus niet mogelijk om een eenduidige conclusie te trekken met betrekking tot het volume van de mengkamer en de afvalstroom van het organische spoelmiddel. Als er een vergelijking wordt gemaakt met spoelen van de kleine mengkamer en er wordt aangenomen dat er even lang wordt gespoeld en de vloeistof stroomt in alle gevallen met dezelfde snelheid de mengkamer in, dan kan worden geconcludeerd dat in beide gevallen evenveel spoelmiddel verbruikt wordt.

Wanneer deze resultaten vervolgens gecombineerd worden, dan leidt dit tot het advies om voornamelijk de grote mengkamer te gebruiken. Hiermee wordt de PU-afvalstroom verkleint en blijft de afvalstroom van het spoelmiddel gelijk. Een verdere verkleining van de afvalstroom kan vervolgens bereikt worden door in de planning rekening te houden met zo min mogelijk kleurstofomschakelingen. Als aanbeveling kan gegeven worden om een nader onderzoek te verrichten naar de spoeltijd om zodoende de afvalstroom van het spoelmiddel ook te reduceren.

PEM-resultaten samengevat

Onderstaande tabel geeft een korte samenvatting van de in dit project gerealiseerde besparingen.

Tabel 11: Gerealiseerde besparingen per proces

Proces	Materiaalbesparing (%)	Energiebesparing (%)	Besparing kleurstof (%)
Spuittieten	1,0	4,6	
Extrusie	3,0	3,5	30
Folieblazen	6,3	12,2	
Extrusieblazen	0,0	10,0*	40
Gemiddeld	2,6	6,7*	35

* Reductie in energiekosten, dit percentage is niet meegenomen in de berekening van het gemiddelde

Bij het trekken van algemene conclusies moet rekening worden gehouden met het feit dat de resultaten betrekking hebben op een verscheidenheid van producten, materialen en processen. Echter, uit Tabel 11 blijkt dat de gemiddeld gerealiseerde besparingen op materiaal 2,6% bedraagt. Voor de hele kunststofverwerkende sector, die jaarlijks 1.200.000 ton kunststof^[1] verwerkt, betekent dit een directe besparing op materiaalgebruik van 31.200 ton kunststof.

Energieverbruik binnen de kunststofverwerkende industrie bedraagt^[1] circa 75% van het totaalverbruik. Op basis van het huidige onderzoek kan, door productieverhoging, 6,7% energiebesparing gerealiseerd worden.

Als laatste blijkt dat de hoeveelheid gebruikte kleurstof drastisch omlaag gebracht kan worden. Gezien de grote variatie in kleurstoffen en pigmenten en de wijze waarop die geproduceerd worden, is het niet mogelijk om een indicatie te geven van de doorwerking van minder pigment op de milieubelasting. Het is echter duidelijk dat er gemiddeld genomen meer kleurstoffen en pigmenten aan de kunststofmassa worden toegevoegd dan nodig is.

Figuur 21: Productie van doppen (Foto: Kornelis Caps & Closures, Steenwijk)



¹ www.infomil.nl/publish/pages/68292/e05.pdf

Vergelijkend onderzoek spuitgietmachines

Tot nu toe is er vooral gekeken naar de mogelijkheden om een product duurzamer te produceren met gebruik van dezelfde machine. De invloed van de gebruikte machine op energieverbruik is echter buiten beschouwing gelaten. Eerder is al een pilotstudie uitgevoerd om een vergelijking te maken tussen het gebruik van elektrisch en hydraulisch aangedreven spuitgietmachines^[2]. Er zijn drie machines onderzocht: twee hydraulisch aangedreven machines met sluitkrachten van 100 en respectievelijk 175 ton en een elektrisch aangedreven machine met een sluitkracht van 155 ton. Tevens is geprobeerd om op elke machine Polypropreen-producten met vergelijkbaar shotgewicht te produceren om zodoende de resultaten te kunnen vergelijken. In deze pilot is tevens gebruik gemaakt van de PEM om materiaalbesparing en cyclustijdverkortung te bepalen. Belangrijke conclusies uit dit onderzoek waren:

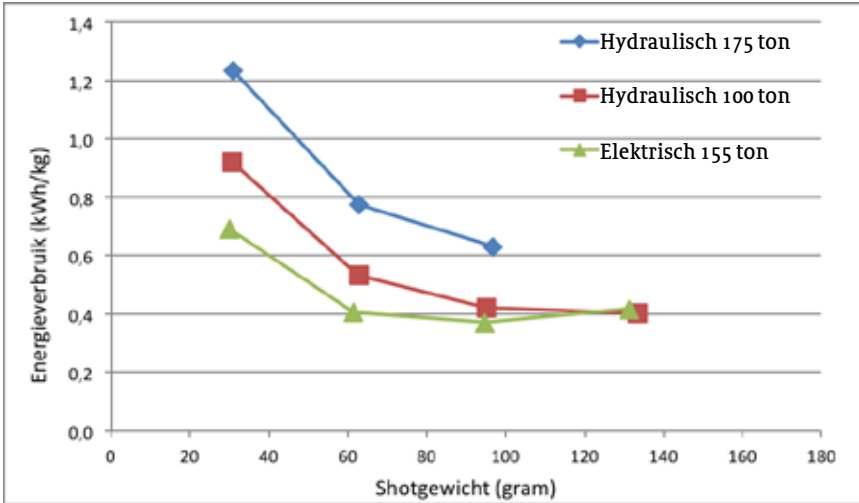
- Onafhankelijk van de gebruikte spuitgietmachine is een materiaalbesparing van gemiddeld 0,4% mogelijk. De reden hiervoor is het relatief lage gewicht van de onderzochte producten.
- Onafhankelijk van de gebruikte spuitgietmachine is een cyclustijdverkortung van gemiddeld 5% mogelijk.
- De cyclustijd was het kortste op de hydraulisch aangedreven machine met een sluitkracht van 100 ton.

Voor elke combinatie van machine en product is het energieverbruik per kilogram materiaal gemeten. Dit resulteerde in Figuur 22.

De algemene trend is dat het energieverbruik per kilogram materiaal hoog is bij lage shotgewichten en vervolgens daalt zodra het productgewicht toeneemt. Het energieverbruik lijkt constant te worden vanaf een zeker kritisch productgewicht. Met behulp van deze grafiek kon geconcludeerd worden dat produceren met de elektrisch aangedreven machine het laagste energieverbruik heeft, zolang het beneden 130 gram blijft.

² “Sprint Innovatief 2010, 6 voorbeelden van innovatieve samenwerking in de bètaketen” www.sprintprogramma.nl

Figuur 22: Energieverbruik per gram shotgewicht voor drie spuitgietmachines ^[2]

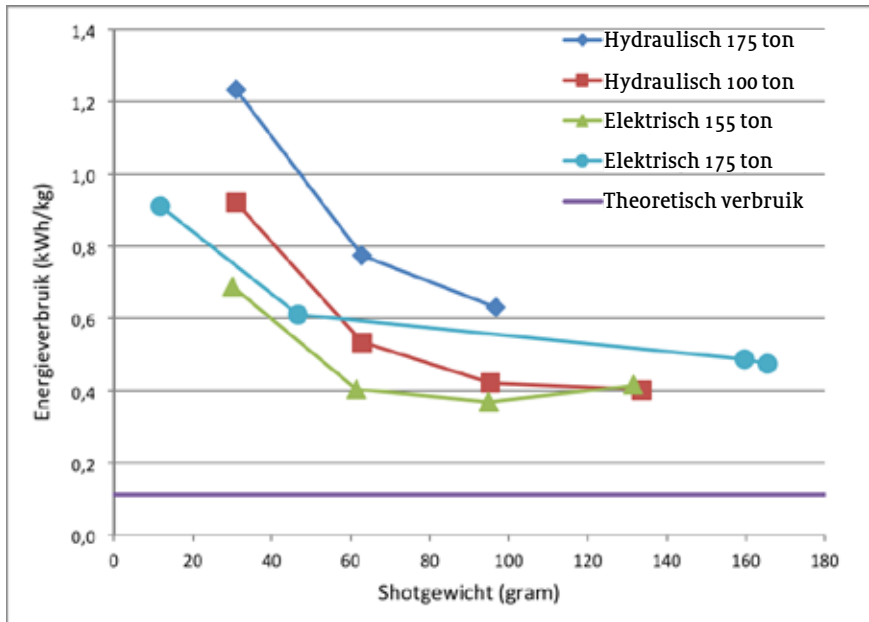


In een vervolgstudie is geprobeerd om de gegevens in Figuur 22 uit te breiden, om zodoende een betere vergelijking te kunnen maken. Om geschikte machines te selecteren is gebruik gemaakt van de volgende criteria:

- Hydraulisch aangedreven machine met een sluitkracht van circa 155 ton.
- Elektrisch aangedreven machine met een sluitkracht van circa 100 ton of circa 175 ton.
- Het onderzochte product moet van polypropreen zijn.
- De machine moet in staat zijn om een product te produceren met een shotgewicht in de range van 10–200 gram.

Er is één machine gevonden die aan de criteria voldeed en ter beschikking gesteld kon worden. Dit betrof een elektrisch aangedreven machine met een sluitkracht van 175 ton. De resultaten van de experimenten zijn toegevoegd aan Figuur 22 en te zien in Figuur 23. Hierbij moet worden opgemerkt dat er geen optimalisatieonderzoek (PEM) is uitgevoerd voor de elektrisch aangedreven machine met een sluitkracht van 175 ton. Dat betekent dat voor deze machine het energieverbruik per kilogram gewicht nog omlaag gebracht kan worden.

Figuur 23: Energieverbruik per kilogram shotgewicht voor drie spuitgietmachines



Figuur 23 levert interessante resultaten op. Zo is voor de elektrisch aangedreven machine van 175 ton dezelfde trend in energieverbruik waarneembaar als voor de overige machines. Het kritische productgewicht voor een constant energieverbruik per kilogram materiaal, lijkt voor deze machine 60 gram te zijn. Hiervoor zullen aanvullende experimenten uitsluitsel moeten geven.

Wanneer de twee elektrisch aangedreven machines met elkaar vergeleken worden, blijkt dat de machine met een sluitkracht van 175 ton altijd meer energie per kilogram verbruikt dan de machine met een sluitkracht van 155 ton. Hierbij moet worden opgemerkt dat er geen optimalisatieonderzoek is geweest voor de elektrisch aangedreven machine met een sluitkracht van 175 ton. Zeker in het gebied tot circa 50 gram zou dit kunnen resulteren in een even groot, of zelfs lager energieverbruik voor de zwaardere machine.

Wanneer naar vergelijkbare sluitkrachten wordt gekeken, valt op dat de elektrische machine tot een shotgewicht van 100 gram minder energie verbruikt dan de vergelijkbare hydraulisch aangedreven machine. Hoewel op deze laatste geen experimenten zijn uitgevoerd bij zwaardere shotgewichten, lijkt de curve te wijzen op een kritisch shotgewicht van circa 80 gram. Vanaf dit gewicht lijkt het energieverbruik per kilogram naar een constante waarde te gaan. Hiermee kan voorzichtig gesteld worden dat, in de

range van 10-180 gram, produceren op een elektrisch aangedreven spuitgietmachine met een sluitkracht van 175 ton voordeliger is dan op een vergelijkbare hydraulisch aangedreven machine.

In Figuur 23 is tevens te zien wat de theoretisch benodigde maximale hoeveelheid energie is om polypropreen te laten smelten en stollen. Hiervoor is gebruik gemaakt van de aanname dat het gebruikte materiaal 100% kristallijn is, een smeltenergie van 207 J/g ³ heeft en dat er evenveel energie nodig is om het materiaal te laten smelten als dat er nodig is om warmte uit de kunststof te halen in het stollingsproces.

Met behulp van deze theoretische lijn is te zien hoeveel energie de machine zelf nodig heeft om de kunststof te verwerken. Hierbij moet bijvoorbeeld gedacht worden aan aspecten zoals de energie die nodig is om de schroef van de extruder te bewegen. In Figuur 23 is ook te zien dat de elektrisch aangedreven machine met een sluitkracht van 155 ton het minste energie nodig heeft. De zwaarste hydraulisch aangedreven machine verbruikt de meeste energie. Opvallend is dat de hydraulisch aangedreven machine met een sluitkracht van 100 ton vanaf een gewicht van circa 60 gram, efficiënter met energie omgaat dan een elektrisch aangedreven machine met een sluitkracht van 175 ton. Dit lijkt ook te gebeuren bij 130 gram als de elektrisch aangedreven 155 tonner vergeleken wordt met de hydraulische 100 tonner. Als alle resultaten bekeken worden, lijkt de sluitkracht in de range van 60–110 gram de bepalende factor te zijn voor het energieverbruik. Hierbij geldt echter wel dat een hydraulisch aangedreven machine, bij vergelijkbare sluitkracht, meer energie verbruikt. Echter, voor een duidelijkere vergelijking tussen machines is meer onderzoek nodig.

³Roger Blaine: “Thermal applications note; Polymers Heats of Fusion”, www.tainstruments.com

Conclusies en aanbevelingen

De Procesparameter Effect Methode (PEM) is een krachtige methodiek die bedrijven in staat stelt om op eenvoudige wijze snel resultaat te boeken. Uit de uitgevoerde PEM-onderzoeken blijkt dat de te behalen materiaalbesparingen per proces en per product verschillen. Als alle resultaten worden samengevoegd dan kunnen de volgende algemene conclusies getrokken worden:

- De Windesheim Energie Efficiency Index (WEEI) ligt voor de onderzochte bedrijven tussen 0,62 en 0,75.
- De WEEI voor bedrijven met bijzondere producten of processen is gemiddeld genomen lager.
- Grotere bedrijven zijn beter in staat een hoge WEEI te realiseren dan kleine bedrijven.
- Bij kleinere bedrijven is er nog veel potentieel om op energieverbruik te besparen.
- Voor alle deelnemende bedrijven is er nog optimalisatie mogelijk om de WEEI naar 1.0 te brengen.
- De NRG-Scope is een goed hulpmiddel voor het monitoren van de energiehuishouding in een bedrijf en daarmee te voldoen aan de doelstellingen uit de MeerJarenAfspraken (MJA).
- Het is niet mogelijk is om algemene, specifieke conclusies te trekken over de afzonderlijke invloed van individuele parameters.
- De gemiddelde materiaalbesparing in de onderzochte processen bedraagt 2,6%. Geëxtrapoleerd naar de landelijke situatie betekent dit op jaarbasis een besparing van ruim 30.000 ton kunststof.
- De tijdens dit onderzoek gemeten gemiddelde besparing op energieverbruik bedraagt 6,8% en is toe te schrijven aan productietijdversnelling.
- Op grond van dit onderzoek is de verwachting dat de hoeveelheid toegevoegde kleurstoffen en pigmenten aan de te verwerken kunststofmassa met circa 35% verlaagd kan worden.
- Voor elke spuitgietmachine bestaat er een kritisch shotgewicht voor het constant worden van het energieverbruik per kilogram materiaal.
- Een elektrisch aangedreven spuitgietmachine is niet per definitie zuiniger in energieverbruik dan een hydraulisch aangedreven machine. Dit is afhankelijk van het shotgewicht van het product.

Op basis van deze deelconclusies kan gesteld worden dat het doel van het project 'Duurzaam produceren in de kunststofindustrie' gerealiseerd is. De gebruikte methoden demonstreren dat het mogelijk is om een substantiële bijdrage te leveren aan het reduceren van energie- en materiaalgebruik en zodoende te doelstellingen uit de MJA te realiseren.

Naar aanleiding van dit onderzoek kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:

Om een betere indicatie te krijgen van wat de gemiddelde WEEI voor een specifieke verwerkingstechniek is, zou de NRG-Scope bij meer bedrijven uitgevoerd moeten worden. Hierbij zou tegelijkertijd rekening moeten worden gehouden met de omvang van de betrokken bedrijven. In dit kader is het interessant om bij dit onderzoek ook bedrijven uit het buitenland te betrekken om een indicatie te krijgen van de Nederlandse concurrentiekracht. Tevens is het interessant om een verdiepend onderzoek te starten om te zien hoe groot het energiebesparende potentieel bij midden- en kleinbedrijven daadwerkelijk is.

Het is raadzaam verder onderzoek te doen naar het gebruik van pigmenten. De uitgevoerde onderzoeken hebben, op basis van subjectieve scoring, geleid tot een besparing van 40%. Het is aan te bevelen een dergelijk onderzoek te herhalen en een objectieve kleurmeetmethode toe te passen.

Hierbij kan ook als aanbeveling worden gegeven om met de PEM de samenstelling van het te verwerken materiaal (kunststof + toevoegingen) te analyseren. Uit het pigmentonderzoek bleek dat hier veel winst te halen valt. Mogelijkerwijs is dit ook van toepassing op weekmakers, blaasmiddelen en eventueel andere toevoegingen. Ook als het gaat om compounceren van samengestelde kunststoffen kan de PEM wellicht een bijdrage leveren aan het bepalen van de juiste samenstelling van componenten.

Tevens wordt aanbevolen de PEM-analyse te blijven gebruiken binnen productiebedrijven. Ten eerste bij het opleiden van machine operators. De methodiek is een goed hulpmiddel om operators inzicht te geven in het productieproces. Ten tweede kan gebruik van de PEM bij het in productie nemen van nieuwe producten helpen om vanaf het eerste moment zo efficiënt mogelijk met materiaal en energie om te gaan.

Tenslotte is voor een goede vergelijking van energieverbruik van verschillende spuitgietmachines meer onderzoek nodig. Hierbij kan gedacht worden aan het aanvullen van de huidige studie met producten van andere soorten kunststoffen, maar ook het gebruik maken van meer verschillende typen spuitgietmachines.

Dr. ir. H.G.J. (Harold) Gankema

Harold Gankema heeft Chemische Technologie gestudeerd aan de Universiteit Twente met als specialisatie Polymeertechnologie. Na deze studie heeft hij een promotieonderzoek afgerond (1995) binnen de vakgroep Makromoleculaire Chemie en Materiaalkunde (ook aan de UT).

Vanaf 1995 tot 2008 heeft hij verschillende leidinggevende functies gehad in het toegepast industrieel onderzoek bij achtereenvolgens Acheson Colloiden BV (thans Henkel) en Arizona Chemical.

Vanaf september 2008 is hij werkzaam bij het Dutch Polymer Institute (DPI) als programma coördinator op het gebied van Coatings Technologie en High Throughput Experimentation. Een functie die hij sinds september 2009 combineert met die van lector kunststoftechnologie bij Windesheim.

Drs. ing. A.M. (Tonny) van Dijk

De opleiding Kunststoftechnologie aan de Hogeschool Drenthe (Stenden) heeft Tonny afgesloten met zowel een Duits als Nederlands diploma. Om de opleidingen Kunststoftechnologie en Polymeer Chemie te kunnen afronden, heeft hij zijn afstudeeronderzoek gericht op het recyclen van kunststof automobieleronderdelen. Het betrof hier het mechanisch scheiden van vervuilde kunststoffen om deze vervolgens weer te kunnen inzetten in de productie. Onderdeel van zijn werkzaamheden was het uitvoeren van kostencalculaties en dergelijke. Hierdoor werd zijn interesse gewekt voor bedrijfskunde en is hij Technische Bedrijfswetenschappen gaan studeren aan de Rijksuniversiteit Groningen.

Ook deze opleiding is afgerond met een afstudeeronderzoek bij een kunststofverwerkend bedrijf (AKG: Aufderhaar KunststofGroep). Hierbij is onderzocht welke investeringsalternatieven haalbaar waren om op economisch verantwoorde manier kunststof palen en planken te kunnen produceren. Na zijn opleiding heeft Tonny verschillende logistieke functies vervuld in het bedrijfsleven. Sinds 2005 is hij werkzaam bij de School of Engineering and Design op Windesheim.

Ir. A.F.C.M. (Alexander) Jansen

Alexander is docent werktuigbouwkunde en industrieel product ontwerpen en met name op het snijvlak van deze opleidingen. Juist in de kunststofverwerking, waar aan de ene kant hoogtechnologische matrijs- en machinecombinaties ontworpen moeten worden en aan de andere kant massaproducten van de band af rollen, is er behoefte aan goed opgeleide mensen.

De interactie met bedrijven, natuurlijk in de vorm van stages en afstudeerprojecten, maar steeds vaker in de vorm van onderzoeken, levert een continue drang om te verbeteren, om bij te dragen aan het optimaliseren van productie en het ontwikkelen van producten.

In het Lectoraat Kunststoftechnologie, waarbij de nadruk ligt op de technologie van de verwerking van kunststoffen, komen een aantal stromen bij elkaar. Technologisch gedreven, innovatief, in combinatie met onderzoek met, en in bedrijven, maken zijn job voor hem uitdagend.

Ir. M.B. (Masja) Mooij

De opleiding Industrieel Ontwerpen heeft Masja afgerond met een afstudeerproject bij Wavin Trepak in Hardenberg onder begeleiding van professor J.L. Spoormaker. In de daarop volgende jaren heeft zij voor hetzelfde bedrijf veel verschillende kunststof transportverpakkingen ontwikkeld, welke in grote aantallen geproduceerd zijn.

Vervolgens heeft zij gedurende een aantal jaren voor Philips DAP in Singapore gewerkt aan de uitontwikkeling van een nieuw strijkijzerconcept, dat verkocht is o.a. op de Nederlandse markt. Weer in Nederland heeft zij haar kennis uitgebreid door de ontwikkeling van blow-moulding producten voor CurTec in Rijen.

In 2005 is zij teruggekeerd naar haar afstudeerbedrijf, inmiddels Schoeller Arca Sytems genaamd, waar zij verantwoordelijk was voor de ontwikkeling van bierkratten in Europa. Naast de ontwikkeling van het Grolsch beugelkrat, heeft zij het door Porsche Design ontworpen Veltins krat en het eerste 2K bierkrat van Radeberger technisch uitgewerkt. Vanaf mei 2009 is ze doorgesloven in de rol van product manager van bierkratten, waar ze zich naast businessplannen bezig heeft gehouden met innovatieve projecten voor het 'bierkrat' van de toekomst.

Sinds september 2010 is zij werkzaam als docent industrieel product ontwerpen bij de School of Engineering and Design op Windesheim.

Dr. ir. N.P. (Niels) Boks

Na afronden van het VWO is Niels Chemische Technologie gaan studeren aan de Universiteit Twente. Zijn interesse in materiaalkunde werd al snel gewekt en zodoende is hij zich in de eindfase van zijn studie gaan specialiseren binnen de vakgroep 'Polymeerchemie en Biomaterialen'. Hier heeft hij zich tijdens zijn afstudeeronderzoek bezig gehouden met de ontwikkeling van bloedvatprotheses. Na zijn studie in Enschede heeft hij in Groningen een functie als promovendus aanvaard bij de faculteit Medische Wetenschappen (RuG/UMCG) waar hij onderzoek heeft gedaan naar het voorspellende karakter van specifieke meettechnieken op de vorming van zogenoemde biomateriaal gerelateerde infecties. De resultaten van dit onderzoek zijn beschreven in het proefschrift "Bacterial Interaction Forces in Adhesion Dynamics".

Na zijn promotieonderzoek wilde Niels graag zijn blik verder verruimen op zowel onderwijs- als onderzoeksgebied en zodoende is hij sinds augustus 2009 werkzaam bij de School of Engineering & Design van Windesheim als docent/onderzoeker in de kunststoftechnologie.

Projectbedrijven



Wavin Nederland maakt deel uit van de Wavin-groep, de marktleider in kunststofleidingsystemen in Europa. Wavin levert moderne en flexibele oplossingen die van wezenlijk belang zijn voor onder meer drinkwatervoorziening, oppervlakteverwarming en -koeling, opvang van regen- en stormwater, water- en gasdistributie en telecommunicatietoepassingen.



Schoeller Arca Systems is een spuitgietsbedrijf dat verpakkingssystemen produceert aan een breed scala van industrieën, onder andere voor de horeca en de automobiellindustrie. Verder maakt Schoeller Arca landbouw-, retail- en postproducten. Bij de locatie in Hardenberg, waar het onderzoek is uitgevoerd, worden voornamelijk kunststofbakken, -kratten en pallets geproduceerd.



DYKA ontwerpt, produceert en verkoopt kunststofleidingsystemen bestaande uit buizen en hulpstukken, vervaardigd uit PVC, PE en PP. Haar missie is het leveren van een constructieve bijdrage aan integraal watermanagement door middel van het op een maatschappelijk verantwoorde wijze produceren en distribueren van kunststofleidingssystemen. Haar visie is dat zij voor haar klanten de hoogst gewaardeerde leverancier wil zijn van duurzame oplossingen in kunststofleidingsystemen met een toonaangevende positie in de markten voor woningbouw, utiliteitsbouw en grond-, weg- en waterbouw.



AKG Mouldings uit Vroomshoop is compounder en spuitgietproducent van verschillende verpakkingsproducten, bouwproducten en producten voor transport en opslag. De meeste producten worden geproduceerd met regranulaat (gerecycled plastic).



Timmerije BV, gevestigd in Neede, is een ISO / TS 16949 (automotive) gecertificeerd Full Service producent van kunststof spuitgietonderdelen. Ze zijn gespecialiseerd in producten met een technologisch complex karakter. Met ondersteuning in product- en procesontwikkeling zorgt Timmerije er voor dat haar klanten een next level in plastics bereiken. Ze beschikken over state of the art simulatie en CAD-technieken en hebben een geoutilleerd machinepark met vijftig spuitgietmachines. In 2012 bestaat Timmerije 80 jaar en loopt vooraan met 2K/3K spuitgiet-, gasinjectie-, insert molding- en in-mould decoratietechnieken. Timmerije zet haar kennis en ervaring in voor de maakindustrie van onder andere: HVAC-toestellen, huishoudelijk apparatuur, fietsonderdelen, kinderveiligheid artikelen, intern transport, meubelindustrie, procesapparatuur, elektrotechniek en auto-onderdelen.



Hertalan Nederland uit Kampen produceert diverse rubberproducten, waaronder EPDM dak- en gevelsystemen, vijverfolies, technische rubberproducten en voeg- en vacuümprofielen. Hertalan gebruikt een wals- en extrusieproces voor het fabriceren van rubbermatten.



bpi.indupac is een producent van verpakkingsfolie voor de 'business-to-business' markt met een focus op kwaliteit en service. Het bedrijf produceert enkellaags, tweelaags en drielaags folies voor zakken die naar het ontwerp van de klant worden bedrukt. bpi.indupac is onderdeel van British Polythene Industries.



Promens Zevenaar is in 1948 opgericht en heeft zich ontwikkeld van een pionier op het gebied van kunststof verwerken tot een internationale leverancier van technische producten. Promens heeft als voornaamste afzetmarkten de automotive en de agrarische- en tuinbouwsector (logistieke systemen) en richt zich verder op klantspecifieke (technische) producten.



Herikon BV uit Almelo is gespecialiseerd in het ontwerpen en in de ontwikkeling en de productie van klantspecifieke, technisch hoogwaardige, polyurethaan producten. Doordat de gebruikte grondstoffen vloeibaar zijn, wordt er voornamelijk gebruik gemaakt van een gietproces en zijn complexe en moeilijke vormen mogelijk. Herikon heeft afzetmarkten in diverse industrieën en sectoren, waaronder de machinebouw, scheepsbouw, landbouw en voedingsmiddelen- en verlichtingsindustrie.



SPHERE Nederland is onderdeel van de SPHERE Groep, Europa's grootste producent van huishoudelijke verpakkingen. SPHERE Nederland is al jaren één van de grootste producenten van de bekende KOMO-huisvuilzakken. Ook andere diverse producten, zoals zakjes voor het maken van ijsblokjes en magnetronfolies worden door SPHERE gemaakt.



Euro Mouldings BV uit Nijverdal is ontstaan uit Euro BV uit Vroomshoop, Polymij uit Nijverdal en Ten Cate Mouldings uit Oldenzaal. Het bedrijf produceert met haar 36 blaasmachines diverse kunststof verpakkingen (flessen, jerrycans etc.) voor verschillende markten. Hierbij kan gedacht worden aan de automotive, chemicaliën, food, cosmetica en agrarische markt.

GERHARDI

Gehardi Kunststofftechnik GmbH te Ibbenbüren is een spuitgietbedrijf dat interieur- en exterieuonderdelen maakt voor de automobiellndustrie. Het bedrijf produceert voornamelijk producten voor de Duitse automobiellmarkt. Verder heeft het bedrijf de beschikking over een verchroomlijn voor kunststofonderdelen.



KORNELIS

CAPS & CLOSURES

Kornelis Caps&Closures uit Steenwijk ontwikkelt en produceert plastic deksels, doppen en sluitingen voor verpakkingen. Deze producten variëren van 'standaard' schroefdoppen tot klantspecifieke, hersluitbare, kunststof schenksluitingen voor gebruik in conservenblikken.

Procesparameter Effect Methode

Handleiding

Lectoraat Kunststoftechnologie

Handleiding

Lectoraat Kunststoftechnologie

Inhoudsopgave

Inleiding	5
Procesparameter Effect Methode	6
Het gebruik van de PEM-sheet	9
Stap 1: Kiezen van parameters, instelwaarden en doelparameters	9
Stap 2: Uitvoeren van experimenten	11
Stap 3: Bepalen en evalueren van nieuwe instellingen	12
Kort stappenplan opzet PEM-analyse	16

Inleiding

Hoewel in het midden- en kleinbedrijf veel zaken goed gaan, is men continu op zoek naar verbetering. Hierbij valt te denken aan optimalisaties in de logistiek, maar ook op het gebied van productieprocessen en productontwerpen. In de kunststofverwerkende industrie gaat men te maken krijgen met toenemende kosten als gevolg van schaarste in grondstoffen en zwaardere milieuwetgeving om energieverbruik en CO₂-uitstoot te verminderen. Om deze uitdagingen het hoofd te bieden, is het nodig om de bestaande producten en processen nog eens goed tegen het licht te houden: is het mogelijk om te besparen op grondstoffen en energieverbruik? Hiervoor moet allereerst gekeken worden naar de processen en welke parameters daar een invloed op hebben. Hoewel er veel meer belangrijke parameters in het spuitgietproces te bedenken zijn, worden hieronder zes voorbeelden opgesomd:

- smelttemperatuur
- injectiesnelheid
- nadruk
- duur van de nadruk
- matrijstemperatuur
- koeltijd

Om te bepalen welke invloed de bovenstaande parameters hebben op bijvoorbeeld het productgewicht, zal een aantal experimenten uitgevoerd moeten worden. Per parameter moeten daarvoor minimaal twee instelwaarden worden gekozen. Bij zes verschillende parameters en twee instelwaarden komt het totaal aantal mogelijke combinaties van instellingen uit op $2^6 = 64$ combinaties. Als al deze 64 combinaties worden gebruikt om de invloed te meten, is er sprake van een zogenoemde 'full testing'.

Echter, in de praktijk is het vaak niet rendabel om zoveel experimenten uit te voeren. Vaak moet een machine uit de productie worden genomen. Tevens is het belangrijk dat er per gekozen instelling minimaal vijf producten worden geanalyseerd om conclusies op basis van uitschieters te voorkomen. Dit zorgt echter voor het risico dat er veel niet-verkoopbare producten geproduceerd worden tijdens een dergelijk onderzoek. Het is daarom wenselijk om een meer efficiënte methode te gebruiken om procesoptimalisatie te realiseren.

Eén van deze methoden is de Procesparameter Effect Methode (PEM). Met de PEM is het mogelijk om in één dag inzicht te krijgen in de invloed van vier parameters op één of meer vooraf bepaalde producteigenschap(pen). Met deze informatie is het mogelijk om direct meer optimale instellingen te vinden voor het betreffende product op de onderzochte machine.

Procesparameter Effect Methode

De Procesparameter Effect Methode (PEM) is een manier om in één dag inzicht te krijgen in de invloed die vier parameters hebben op de eigenschappen van een product. In deze methodiek is voor vier parameters gekozen, omdat gebleken is dat er vaak vier parameters gebruikt worden om een proces te beïnvloeden. De PEM is een analyse die gebaseerd is op de statistische analyse van varianties in meetgegevens: ANalysis Of VAriances (ANOVA). Met deze ANOVA-analyse kan bijvoorbeeld bepaald worden of Friezen statistisch gezien langer zijn dan mensen uit Noord-Limburg, maar ook of een groep spuitgietproducten statistisch gezien zwaarder is dan een andere groep spuitgietproducten. Ook andere kenmerken, zoals stijfheid van een product en rek bij breuk, kunnen op deze wijze beoordeeld worden.

De kenmerken van bijvoorbeeld spuitgietproducten zijn afhankelijk van de parameters waarmee het spuitgietproces beïnvloed wordt. Voorbeelden van deze parameters zijn:

- verwerkingstemperatuur van de smelt
- injectiesnelheid
- nadruk
- duur van de nadruk

Als men de invloed van deze vier parameters op het productieproces wil meten, moet men minimaal $2^4 = 16$ experimenten uitvoeren. In dat geval worden dan per parameter twee instelwaarden gekozen. In een productieomgeving is dit vaak een te groot aantal, omdat het risico te groot is dat producten, die gedurende de experimenten geproduceerd zijn, niet verkoopbaar zijn.

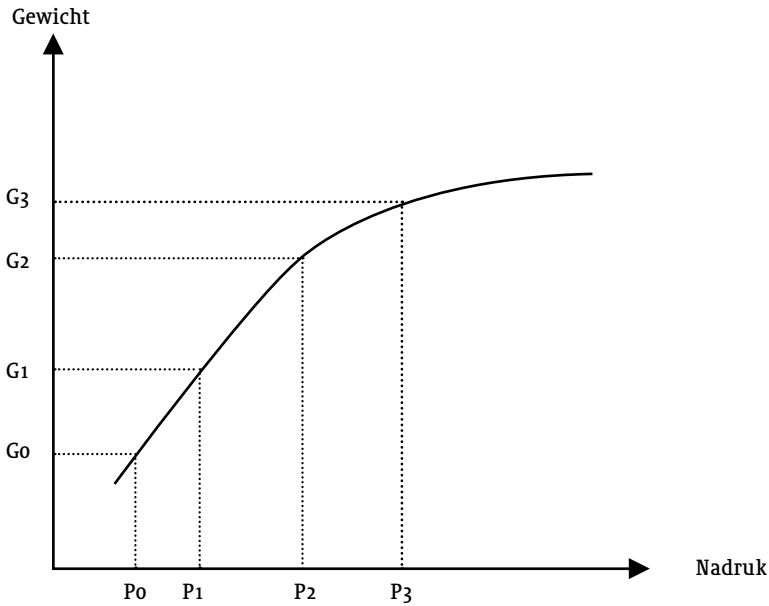
Een oplossing voor dit probleem is gevonden door Genichi Taguchi. Taguchi heeft een slimme methode ontwikkeld die gebruik maakt van de ANOVA-analyse, zonder dat alle instelwaarden ook daadwerkelijk gemeten hoeven te worden. Dit principe wordt “Design of Experiments” genoemd. Taguchi heeft hierbij wel een paar belangrijke aannames gedaan. Deze aannames zijn:

1. De vier gekozen parameters beïnvloeden elkaar onderling niet of nauwelijks.
2. De invloed van de parameters op de te meten producteigenschap is lineair.

Het gevolg van de eerste aanname is dat het mogelijk is om de helft van het aantal experimenten uit te voeren en toch nog voldoende informatie te verkrijgen om een optimalisatie van het product te realiseren. Dit is in een productieomgeving een zeer belangrijk aspect.

Het gevolg van de tweede aanname is dat men vooraf goed moet nadenken over de instelwaarden die gekozen worden voor het meten van effecten. Dit is geïllustreerd in Figuur 1.

Figuur 1: Schematische weergave van een mogelijk effect van nadruk op productgewicht, het procesvenster voor experimenten ligt tussen P_1 en P_2



Stel dat voor het uitvoeren van de optimalisatie-experimenten gebruik is gemaakt van het procesvenster $P_1 - P_2$, dan blijkt uit Figuur 1 dat binnen deze instelwaarden het verband tussen nadruk en gewicht lineair is en de voorspellingen nauwkeurig zijn. Zodra gekozen wordt voor een nadruk buiten het procesvenster, bestaat het risico dat voorspellingen sterk gaan afwijken. Uit de schematische weergave blijkt dat dit gebeurt wanneer P_3 als instelwaarde wordt gekozen. Het tegenovergestelde gebeurt als P_0 als instelwaarde wordt gekozen.

Er bestaat dus een spanningsveld bij het kiezen van het procesvenster. Enerzijds moet dit venster groot genoeg zijn om effecten te kunnen meten (als het procesvenster van nadruk van 50 bar tot 51 bar loopt, zal er weinig effect gemeten worden), anderzijds kan het venster niet te groot worden omdat dan de voorspellingen niet zullen kloppen.

Zoals eerder is vermeld, is de PEM-methode gebaseerd op het principe van “Design of Experiments” en de statistische ANOVA-analyse. Maar statistische benaderingen zijn een vak apart en veel mensen kunnen hier niet goed mee overweg. De PEM is daarom wel gebaseerd op de ANOVA-analyse, maar de achterliggende statistiek is verwerkt in het goed kiezen van de parameters die onderzocht moeten worden. Ten eerste moet voldaan worden aan de twee aannames die eerder behandeld zijn. Daarbij moet vooraf geprobeerd worden de parameters te kiezen die naar verwachting de meeste invloed op de te meten producteigenschap hebben.

Als aan deze drie voorwaarden wordt voldaan, is de kracht van de PEM niet alleen dat het een snelle methode is, maar ook dat het een goed beeld geeft van de daadwerkelijke effecten die instellingen hebben op producteigenschappen. Bijvoorbeeld, als gekeken wordt naar de invloed van nadruk op het productgewicht, geeft de PEM informatie over het aantal gram materiaal dat per bar nadruk aan de matrijs moet worden toegevoegd. Hierdoor is, bij spuitgieten, het gewicht van een product nauwkeurig te voorspellen.

Hoewel dit document zich vooral richt op het toepassen van de PEM in het spuitgietproces, is de methode ook goed toepasbaar in alle andere voorbeelden waarin een specifieke eigenschap gestuurd kan worden door goed definieerbare en in te stellen parameters. Enkele voorbeelden hiervan zijn opgenomen in Tabel 1.

Tabel 1: Voorbeelden van processen en parameters voor de PEM

Proces	Stuurparameter	Doelparameter
Spuitgietproces	injectiesnelheid	productgewicht, cyclustijd
	nadruk	productgewicht, cyclustijd
	koeltijd	energieverbruik, krimp
Extrusieproces	vacuüm in de kalibratiestap	diameter buis
	trekband snelheid	gewicht per meter buis, productietijd
	schroefsnelheid	gewicht per meter buis
Spuitgietproces, extrusieproces	% kleurstof	uiterlijk van product
	massatemperatuur	energieverbruik
	samenstelling grondstof	mechanische eigenschappen product

Het gebruik van de PEM-sheet

De PEM-methode bestaat uit een drietal stappen:

1. Kiezen van parameters, instelwaarden en doelparameters.
2. Uitvoeren van experimenten.
3. Bepalen en evalueren van nieuwe instellingen.

Hieronder zullen de stappen nader worden toegelicht.

Stap 1: Kiezen van parameters, instelwaarden en doelparameters

De PEM-sheet is opgebouwd uit vier tabellen. De eerste tabel is hieronder weergegeven.

Figuur 2: Lege invoertabel

1. Experimenten-Parameter -Tabel (EPT-L8P4)					
S1	S2	S3	S4	S5	
Parameter	Beschrijving	Data 1	Data 2	Δ Par.	Dim.
				0,0	
				0,00	
				0,0	
				0,0	
S6	S7	S8			
Q1-Waarde	Gewicht	gram	= eerste te optimaliseren parameter		
Q2-Waarde	Inhoud	ml	= tweede te optimaliseren parameter		

De eerste tabel wordt gevuld met algemene gegevens over de gekozen parameters. Allereerst worden de parameters ingevuld waarmee gedurende de experimenten gevarieerd gaat worden. In kolom S1 wordt een afkorting of symbool geplaatst. De volgende kolom biedt, indien nodig, plaats voor een korte beschrijving van de betreffende parameter. De volgende stap is het bepalen van de waarden waarop de gekozen parameters worden ingesteld. Als richtlijn kan gekozen worden om de kolom 'Data 1' te vullen met de standaardwaarden van de betreffende parameters. Vervolgens kan kolom 'Data 2' met alternatieve instelwaarden worden gevuld. Deze instelwaarden mogen zowel groter als kleiner zijn dan de standaardinstellingen. Ter volledigheid kunnen de dimensies (bijvoorbeeld bar, sec, °C) van de parameters in de laatste kolom worden ingevuld.

In kolommen S6 tot en met S8 komt informatie te staan over de doelparameters. Zo kan bijvoorbeeld bij een spuitgietsproces het doel zijn om materiaalbesparing te realiseren. Productgewicht (in gram) kan dan een eerste te optimaliseren parameter zijn. Een voorbeeld van een ingevulde tabel voor het optimaliseren van een spuitgietsproces, is in Figuur 3 weergegeven.

Figuur 3: Ingevulde invoertabel voor een spuitgietproces

1. Experimenten-Parameter -Tabel (EPT-L8P4)

S1	S2	S3	S4	S5	
Parameter	Beschrijving	Data 1	Data 2	Δ Par.	Dim.
Pna	Nadruk	55	75	20,0	Bar
tinj	Inspuitsnelheid	20	40	20,00	%
Tsmelt	Temp. Smelt	246	258	12,0	C
Tkoel	Koeltijd	28	38	10,0	sec
S6	S7	S8			
Q1-Waarde	Gewicht	gram	= eerste te optimaliseren parameter		
Q2-Waarde	Inhoud	ml	= tweede te optimaliseren parameter		

In het voorbeeld in Figuur 3 is te zien dat er gekozen is om te variëren met de nadruk, de injectiesnelheid, de temperatuur van de gesmolten kunststof en de tijd die gebruikt wordt om het product in de matrijs af te koelen. Het doel van de PEM-analyse in het voorbeeld, is het besparen van materiaal. Daarom is ervoor gekozen om het gewicht als eerste doelparameter te nemen. Echter, een lichter product mag niet leiden tot een slechtere kwaliteit. Om dit designers dilemma het hoofd te bieden, geeft de PEM de mogelijkheid om een tweede doelparameter direct mee te nemen in de analyse. In Figuur 3 is hiervoor de doelparameter inhoud genomen. Bij gebruik van minder materiaal kan het krimpgedrag, en dus het volume van het product, veranderen. De keuze van de doelparameters is natuurlijk helemaal afhankelijk van het doel van de PEM-analyse.

De PEM-sheet genereert vervolgens de lijst met experimenten die uitgevoerd moeten worden (zie Figuur 4). Uit deze lijst is af te leiden dat de instellingen van experiment 1 overeenkomen met de standaardinstellingen van de machine. Bij onderzoek in een lopende productie heeft dit als voordeel dat de producten uit experiment 1 gewoon verkocht kunnen worden.

Stap 2: Uitvoeren van experimenten

Figuur 4: Schema met uit te voeren experimenten

2. Experimenten- Instellingen-Tabel (EIT-L8P4)					S9	S10	
Test-Nr:	Pna Bar	tinj %	Tsmelt C	Tkoel sec		Gewicht gram	Inhoud ml
1	55	20	246	28			
2	55	20	258	38			
3	55	40	246	38			
4	55	40	258	28			
5	75	20	246	38			
6	75	20	258	28			
7	75	40	246	28			
8	75	40	258	38			

De volgorde, waarin experimenten worden uitgevoerd, heeft geen invloed op het resultaat van de PEM-analyse. In dit voorbeeld ligt het dan voor de hand om eerst de experimenten 1, 3, 5 en 7 uit te voeren. In de praktijk duurt het namelijk relatief lang voordat een vloeibare kunststof een homogene temperatuur heeft. Vervolgens kan de alternatieve temperatuur ingesteld worden. Als de vloeibare massa een homogene temperatuur heeft, kunnen de experimenten 2, 4, 6 en 8 uitgevoerd worden.

Figuur 4 laat tevens zien dat er ruimte is om de uitkomsten van de betreffende experimenten te noteren. Het is belangrijk om per experiment meerdere producten te analyseren op de doelparameters. In het voorbeeld zijn dit: gewicht en inhoud. Gemiddelde waarden geven een betere indicatie voor de effecten dan de informatie van een enkel product. Het is daarom raadzaam om, indien mogelijk, minimaal vijf producten per experiment te evalueren. Wanneer slechts twee producten worden geanalyseerd, is er een grote kans dat er gerekend wordt met waarden die mogelijk uitschieters zijn. Hierdoor zouden vreemde optimalisatiesresultaten geboekt kunnen worden.

De Excel-sheet biedt de mogelijkheid om twee doelparameters te bestuderen. Dit wil echter niet zeggen dat er per meetdag maar twee doelparameters bestudeerd kunnen worden. Zo kan men bijvoorbeeld op één meetdag direct het energieverbruik van de machine tijdens het produceren evalueren, evenals het productgewicht. Tevens kunnen de mechanische eigenschappen van de producten worden bepaald en in een tweede Excel-sheet worden ingevuld. Op deze manier kunnen gedurende één meetsessie de invloed van de gekozen parameters op meerdere doelparameters worden bepaald. Het is dus zelfs mogelijk om nog achteraf te besluiten een bepaalde kwaliteitseis in de evaluatie mee te nemen. Voorwaarde hiervoor is dat de geproduceerde producten bewaard blijven.

In dit document zal het voorbeeld ‘gewicht’ als doelparameter verder worden uitgewerkt. In Figuur 5 is te zien wat het gemiddelde gewicht van de producten bij de overeenkomstige experimenten is.

Figuur 5: Testresultaten productgewicht, gewichten zijn gemiddelden over vijf producten

2. Experimenten- Instellingen-Tabel (EIT-L8P4)						S9
Test-Nr:	Pna Bar	tinj %	Tsmelt C	Tkoel sec		Gewicht gram
1	55	20	246	28		154,7
2	55	20	258	38		153,7
3	55	40	246	38		154,9
4	55	40	258	28		153,8
5	75	20	246	38		156,0
6	75	20	258	28		154,1
7	75	40	246	28		156,4
8	75	40	258	38		155,3

De resultaten uit Figuur 5 worden door de PEM-sheet gebruikt om effecten te meten. De PEM-sheet voert deze berekeningen automatisch uit. Voordat de resultaattabellen gepresenteerd worden, geeft het inzicht om een effect een keer handmatig uit te rekenen. Dit wordt behandeld in de volgende paragraaf.

Stap 3: Bepalen en evalueren van nieuwe instellingen

Om het effect van de nadruk (Pna) te bepalen, wordt er gekeken naar de experimenten waarin de nadruk hetzelfde is. Het gaat hier dan enerzijds om de experimenten 1 tot en met 4 en anderzijds om de experimenten 5 tot en met 8.

Producten die geproduceerd worden met een nadruk van 55 bar wegen gemiddeld:

$$\text{Gewicht}_{(Pna=55)} = \frac{(154.7+153.7+154.9+153.8)}{4} = 154.3 \text{ gram}$$

Producten die geproduceerd worden met een nadruk van 75 bar wegen gemiddeld:

$$\text{Gewicht}_{(Pna=75)} = \frac{(156.0+154.1+156.4+155.3)}{4} = 155.4 \text{ gram}$$

Uit deze twee rekensommen blijkt dat het product 1.1 gram zwaarder wordt als de nadruk 20 bar hoger is dan bij de standaardinstellingen. Eveneens kan dit gedaan worden voor de overige drie parameters. De uitkomsten van deze berekeningen worden weergegeven in Figuur 6 (kolom QE 1).

Figuur 6: Deel van de resultatentabel uit de PEM-sheet

3. Resultaten-Tabel (RET-L8P4)

Tabel	EFFECT-Waarde		Gewicht	
	S11	S12	S13	S14
Par.	QE 1	%-QE1	dQE 1	Variantie1
Pna	1,18	30,5	0,0589	40,1
tinj	0,47	12,2	0,0236	6,4
AxB	-0,32	-8,3		3,0
Tsmelt	-1,27	-32,9	-0,1060	46,8
AxC	0,22	5,8		1,4
BxC	-0,17	-4,5		0,9
Tkoel	0,22	5,8	0,0223	1,4
				0,1
SUM	3,86	100,0		100,0

Figuur 6 geeft een overzicht van de belangrijkste resultaten van de PEM-analyse. Per parameter is te zien wat het totaal bereikte verschil in gewicht is (kolom S11; QE 1). Het biedt inzicht om bij het interpreteren van de waarden uit Figuur 6 nog eens te kijken naar de gekozen instellingen (Figuur 3). De belangrijkste informatie is samengevat in Tabel 2.

Tabel 2: Invloeden parameters

Parameter		Delta instelling	Effect [gram]
Pna	[bar]	+20	+ 1.18
tinj	[%]	+20	+ 0.47
Tsmelt	[°C]	+12	- 1.27
tkoel	[sec]	+10	+ 0.22

Uit de analyse blijkt dat producten 1,18 gram zwaarder worden als de nadruk 20 bar hoger is dan bij standaardinstellingen. Op deze wijze kan een goed beeld verkregen worden van het effect van een parameter, waarbij rekening wordt gehouden met een verhoging/verlaging van die parameter. Zo valt op dat het gemiddeld productgewicht 1.27 gram lager wordt als de smelttemperatuur 12 graden hoger is ten opzichte van de standaardinstellingen. Een logische verklaring hiervoor kan zijn dat het volume van de smelt licht is toegenomen doordat de temperatuur verhoogd is. Bij een gelijke injectietijd (of injectiesnelheid) zal per tijdseenheid dus minder massa in de matrijs geïnjecteerd worden. Dit brengt een gewichtsreductie met zich mee.

Figuur 6 geeft ook een indruk van de wijze waarop parameters elkaar onderling beïnvloeden. Zo geeft AxB (zie Figuur 6) aan wat de interactie is tussen de nadruk (Pna) en de inspuitsnelheid (tinj). Belangrijk is dat deze interactietermen ten opzichte van de invloed van de parameters zelf erg klein zijn. Om hier een indruk van te krijgen is kolom S12 (% QE 1) uit Figuur 6 behulpzaam. Eerst worden alle afzonderlijke effectbijdragen bij elkaar opgeteld (laatste waarde kolom QE 1) en vervolgens worden de relatieve bijdragen als percentage weergegeven in kolom S12. In het voorbeeld is te zien dat de totaalsom van interactiebijdragen 18.6% bedraagt. De absolute waarden van de interactietermen (AxB + AxC + BxC) zijn hiervoor bij elkaar opgeteld.

Het blijft lastig om aan te geven bij welk totaalpercentage aan interactietermen het model niet meer nauwkeurig is. Uit ervaring kan gesteld worden dat het model nog voldoende nauwkeurigheid biedt als het totaalpercentage aan interactietermen kleiner is dan 30%. Soms is vooraf duidelijk dat parameters elkaar kunnen beïnvloeden. Het is in die situaties aan te raden om voor een andere combinatie van parameters te kiezen en meerdere PEM-analyses uit te voeren. Uit de onderzoeken kan ook blijken dat er onverwachte interacties zijn. In die gevallen kan de PEM niet direct bijdragen aan een procesoptimalisatie. De PEM levert dan wel een inzicht in het productieproces waarmee een nieuwe analyse gestart kan worden om alsnog een optimalisatie te kunnen bereiken.

Wanneer het totaalpercentage van interactietermen acceptabel is (kleiner dan 30%), kunnen de gemeten effecten gebruikt worden om vooraf te bepalen bij welke instellingen optimaler geproduceerd kan worden (bijvoorbeeld het realiseren van materiaalreductie). Hiervoor gebruikt de PEM kolom S13 uit Figuur 6. De waarden in deze kolom worden verkregen uit de informatie uit Tabel 2 en de aanname dat er binnen het gekozen procesvenster een lineair verband bestaat tussen de stuurparameter en de doelparameter (zie Figuur 1). Feitelijk wordt uitgerekend hoeveel de doelparameter verandert per eenheid van de stuurparameter. Hieronder zal een concreet voorbeeld worden uitgewerkt.

Uit Tabel 2 is op te maken dat het productgewicht met 1.18 gram stijgt zodra, ten opzichte van de standaardinstellingen, bij het produceren 20 bar meer nadruk gegeven wordt. Onder de aanname dat een nadruk tussen 55 bar en 75 bar een lineair verband heeft met het productgewicht, veroorzaakt elke bar nadruk een verschil van 0.059 gram in het productgewicht:

$$\text{Invloed per bar nadruk op gewicht} = \frac{1.18}{20} = 0.059 \text{ gram/bar}$$

In algemene termen is bovenstaande vergelijking als volgt te omschrijven:

$$\text{Invloed per parameter eenheid} = \frac{\text{Totaal gevonden effect}}{\text{Totaal gebruikte delta in parameter}}$$

Op deze manier worden voor de andere parameters vergelijkbare berekeningen uitgevoerd en in Figuur 6 weergegeven in kolom S13; dQE 1. De gegevens uit deze kolom worden gebruikt om voorspellingen te doen met behulp van de vierde tabel uit de PEM-sheet (zie Figuur 7, volgende bladzijde). Hiertoe hoeven alleen de alternatieve, gewenste instellingen in de tabel worden ingevuld.

Figuur 7: Optimalisatietabel PEM-sheet

4. Nieuwe Experimenten- Instellingen-Tabel

Test-Nr:	Pna Bar	tinj %	Tsmelt C	Tkoel sec		Gewicht gram
9	55	20	258	28		153,43
10	25	20	258	28		151,66

Er moet worden opgemerkt dat de voorspelde waarde het meest betrouwbaar is binnen het gebruikte procesvenster. Als de verschillen in instelwaarden niet te groot zijn, is de aanname van lineaire verbanden geldig. Echter, buiten het procesvenster bestaat de mogelijkheid dat deze aanname niet gedaan mag worden (zie Figuur 1).

Kort stappenplan opzet PEM-analyse

1. Bepaal het doel van de PEM-analyse, bijvoorbeeld: gewichtsbesparing, mechanische eigenschappen.
2. Bepaal de doelparameters: de te optimaliseren productkenmerken (bijvoorbeeld productgewicht, rek bij breuk of stijfheid).
3. Vul in de Excel-sheet de doelparameters in.
4. Kies vier onafhankelijke (stuur)parameters die de meeste invloed op het de optimaliseren productkenmerk hebben en noteer deze in Tabel 1 van de Excel-sheet.
5. Bepaal de standaard- en alternatieve instellingen van de stuurparameters en noteer deze in Tabel 1 van de Excel-sheet.
6. Bekijk welke interactietermen wel worden uitgerekend en welke niet. Wanneer vooraf wordt verwacht dat stuurparameters elkaar beïnvloeden kan Tabel 1 nog zodanig worden aangepast dat de betreffende interacties wel worden uitgerekend.
7. Voer uit Tabel 2 van de Excel-sheet de 8 experimenten uit. De volgorde van deze experimenten is niet belangrijk.
8. Evalueer de uitkomsten van Tabel 3 uit de Excel-sheet. Hierin staat per stuurparameter het effect op de doelparameter.
9. Gebruik Tabel 4 van de Excel-sheet om meer optimale instellingen te voorspellen.
10. Voer uit Tabel 4 de experimenten uit en evalueer de uitkomsten.