

2015•2016
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterproef

Vergelijkende studie tussen conventioneel, variotherm en hybride variotherm spuitgieten

Promotor :
Prof. dr. ir. Albert VAN BAEL

Copromotor :
Prof. dr. ir. Jozefien DE KEYZER

Promotor :
ing. GERT-JAN BEX

Tim Evens

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2015•2016

Faculteit Industriële

ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterproef

Vergelijkende studie tussen conventioneel, variotherm en
hybride variotherm spuitgieten

Promotor :
Prof. dr. ir. Albert VAN BAEL

Copromotor :
Prof. dr. ir. Jozefien DE KEYZER

Promotor :
ing. GERT-JAN BEX

Tim Evens

*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële
wetenschappen: elektromechanica*

Woord vooraf

Ik heb de kans gekregen om mijn masterproef uit te voeren in Cel Kunststoffen, een onderzoeksgroep van KU Leuven op de Technologicampus Diepenbeek. Deze interessante en leerrijke ervaring maakt deel uit van mijn opleiding master industriële wetenschappen elektromechanica.

Graag wil ik iedereen bedanken die een bijdrage heeft geleverd aan de verwezenlijking van deze masterproef. Mijn dank gaat in de eerste plaats uit naar mijn promotor prof.dr.ir. Albert Van Bael en copromotor prof. dr. ir. Jozefien De Keyzer voor hun goede begeleiding en kritische reflecties.

Daarnaast wil ik in het bijzonder mijn dagelijkse begeleider ing. Gert-Jan Bex bedanken. Niet alleen voor al de hulp en technische inzichten, maar ook voor de goede sfeer die heeft bijgedragen tot het uitvoeren van de masterproef.

Voorts wil ik alle docenten en begeleiders bedanken die betrokken zijn bij de masteropleiding industriële wetenschappen elektromechanica van de Universiteit Hasselt en KU Leuven. Dankzij hun werd de opleiding een zeer mooi leerproces waarbij ik mijn vaardigheden konden verscherpen en op professioneel vlak kon uitgroeien.

Tot slot bedank ik mijn ouders voor de mogelijkheid die ze mij hebben gegeven om zowel een bachelor als masteropleiding te volgen. Hierbij heb ik eerst de basis gelegd van mijn kennis, welke ik vervolgens heb uitgebreid in mijn masteropleiding.

Tim Evens
Diepenbeek, juni 2015

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren	7
Abstract	9
Summary	11
1 Inleiding	13
1.1 Situering.....	13
1.2 Probleemstelling	15
1.3 Doelstelling.....	15
1.4 Materiaal en methode	16
2 Literatuurstudie	17
2.1 Spuitgieten	17
2.1.1. Spuitgietmachine	17
2.1.2. Spuitgietyclus	18
2.1.3. Spuitgietparameters	18
2.2 Conventioneel, variotherm en hybride variotherm spuitgieten	20
2.2.1. Variotherm spuitgieten versus conventioneel spuitgieten.....	21
2.2.2. Matrijsverwarming en -koeling.....	23
2.3 Vloeilijn	26
2.3.1. Ontstaan van een vloeilijn	26
2.3.2. Sterkte van een vloeilijn.....	26
2.4 Procesvenster	28
2.5 Design of Experiments	32
3 Materiaal- en installatiekeuzes	35
3.1 Kunststof.....	35
3.2 Matrijs.....	37
3.3 Spuitgietmachine	41
3.4 Meetopstelling vloeilijnbreedte	42
4 Experimentele studie, conventioneel spuitgieten	45
4.1 Procesopbouw.....	45
4.2 Procesvenster	46

4.3	Design of Experiments	48
4.3.1.	DoE parametermatrix	48
4.3.2.	Resultaatanalyse	49
4.4	Cyclustijd.....	51
5	Experimentele studie, variotherm	55
5.1	Procesopbouw.....	55
	Proces initialisatie	56
5.2	Procesvenster	56
	Opstellen van het procesvenster.....	56
5.3	Design of Experiments	58
5.3.1.	DoE parametermatrix	58
5.3.2.	Resultaatanalyse	59
5.4	Cyclustijd.....	61
6	Experimentele studie, hybride variotherm spuitgieten	65
6.1	Procesopbouw.....	65
	Proces initialisatie	66
6.2	Procesvenster	67
	Opstellen van het procesvenster.....	67
6.3	Design of Experiments	69
6.4	Cyclustijd.....	69
7	Vergelijking resultaten	73
7.1	Cyclustijd.....	73
7.2	Thermische camera.....	75
7.3	Vloeilijn.....	79
7.4	Proces opbouw.....	81
8	Bespreking eindresultaten	85
8.1	Conclusie	85
8.2	Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek	86
	Literatuurlijst	89
	Bijlagen.....	89

Lijst van tabellen

Tabel 1: Verschillende matrijsverwarmingsmethodes	23
Tabel 2: Verschillende matrijskoelingsmethodes	25
Tabel 3: DoE-matrix.....	33
Tabel 4: Metingen voor het bepalen van viscositeitscurve	46
Tabel 5: Ingestelde- en bekomen parameters voor het conventioneel procesvenster	47
Tabel 6: DoE-analyse parameters met waardes bij conventioneel spuitgieten	48
Tabel 7: DoE-matrix conventioneel spuitgieten.....	49
Tabel 8: Meetresultaten vloeilijnbreedte conventioneel spuitgieten.....	49
Tabel 9: Effect van parameters op vloeilijn bij conventioneel spuitgieten	50
Tabel 10: Optimale parameters voor min vloeilijnbreedte bij conventioneel spuitgieten	51
Tabel 11: Vloeilijnbreedte bij optimale parameters van conventioneel spuitgieten	52
Tabel 12: Ingestelde- en bekomen parameters voor het variotherm procesvenster	57
Tabel 13: DoE-analyse parameters met waardes bij variotherm spuitgieten	58
Tabel 14: DoE-matrix ingevuld variotherm spuitgieten	59
Tabel 15: Instellingen waarbij vloeilijn verwijderd is op mat gedeelte	60
Tabel 16: Optimale parameters voor minimale vloeilijnbreedte bij variotherm spuitgieten ...	62
Tabel 17: Ingestelde- en bekomen parameters voor het hybride variotherm procesvenster	68
Tabel 18: Optimale parameters voor vloeilijnbreedte bij hybride variotherm spuitgieten	70
Tabel 19: Vergelijking cyclustijd en type verwarming	74

Lijst van figuren

Figuur 1: Machinepark Cel Kunststoffen.....	13
Figuur 2: Verschil in matrijstemperatuur bij variotherm (1) t.o.v. conventioneel (2)	14
Figuur 3: Verschil in cyclustijd bij conventioneel en variotherm spuitgieten	15
Figuur 4: Schematische opbouw van een spuitgietmachine.....	17
Figuur 5: Verschil in vloeinaad bij conventioneel en variotherm.....	21
Figuur 6: Reproductie vormholte	21
Figuur 7: Verschil in cyclustijd variotherm & conventioneel spuitgieten	22
Figuur 8: Voorbeeld keramisch verwarmingselement	24
Figuur 9: Ontstaan van een vloeilijn bij conventioneel spuitgieten	26
Figuur 10: Visuele perceptie van de vloeilijn, i.f.v. injectiesnelheid en matrijstemperatuur...	27
Figuur 11: Voorbeeld procesvenster	28
Figuur 12: Screw intensification ratio	29
Figuur 13: Voorbeeld viscositeitscurve.....	30
Figuur 14: Samenstelling matrijs	37
Figuur 15: Inzet achtermatrijs	38
Figuur 16: Inzet voormatrijs, voor conventioneel en variotherm spuitgieten	38
Figuur 17: Inzet voormatrijs, hybride variotherm spuitgieten	39
Figuur 18: Positionering temperatuursensoren in matrijs	39
Figuur 19: a) Vooraanzicht kaartjeshouder, b) Achteraanzicht kaartjeshouder.....	40
Figuur 20: Demag Ergotech IntElect ET 50/300-100	41
Figuur 21: Meetopstelling vloeilijnbreedte conventioneel spuigieten	42
Figuur 22: Meting vloeilijnbreedte met microscoop.....	43
Figuur 23: Procesopbouw conventioneel spuitgieten.....	45
Figuur 24: Tempereerapparaat HB-THERM	45
Figuur 25: Viscositeitscurve.....	46
Figuur 26: Procesvenster conventioneel spuitgieten	47
Figuur 27: Procesvenster conventioneel spuitgieten	47
Figuur 28: Verloop spuitgietyclus conventioneel spuitgieten	52
Figuur 29: Procesopbouw variotherm spuitgieten	55
Figuur 30: Procesvenster variotherm spuitgieten.....	57
Figuur 31: Verschil met of zonder vloeilijn op het matte gedeelte	59
Figuur 32: Verloop spuitgietyclus variotherm spuitgieten	63
Figuur 33: Verloop spuitgietyclus variotherm spuitgieten	63
Figuur 34: Procesopbouw hybride variotherm spuitgieten	65
Figuur 35: Braamvorming& inval bij conventioneel spuitgieten.....	67
Figuur 36: Procesvenster hybride variotherm spuitgieten.....	68
Figuur 37: Verloop spuitgietyclus hybride variotherm spuitgieten.....	71
Figuur 38: Verloop spuitgietyclus hybride variotherm spuitgieten.....	71
Figuur 39: Verschil in vloeilijn tussen variotherm (links) – en hybride variotherm spuitgieten (rechts).....	72
Figuur 40: Vergelijking cyclustijd conventioneel	73

Figuur 41: Vergelijking cyclustijd variotherm.....	73
Figuur 42: Vergelijking cyclustijd hybride variotherm.....	74
Figuur 43: Thermische cyclus variotherm spuitgieten.....	76
Figuur 44: Thermische cyclus variotherm spuitgieten.....	77
Figuur 45: Vergelijking vloeilijn conventioneel spuitgieten.....	79
Figuur 46: Vergelijking vloeilijn variotherm spuitgieten	80
Figuur 47: Vergelijking vloeilijn hybride variotherm spuitgieten	80
Figuur 48: Vergelijking proces opbouw conventioneel spuitgieten.....	81
Figuur 49: Vergelijking proces opbouw variotherm spuitgieten	81
Figuur 50: Vergelijking proces opbouw variotherm spuitgieten	82
Figuur 51: Bovenste en onderste temperatuurgrens bepaald	100
Figuur 52: Bepalen wachttijd spuitgietmachine.....	101
Figuur 53: Dode tijd en tijdsvertraging bij signaal	102

Abstract

Cel Kunststoffen, een onderzoeksgroep van KU Leuven Technologicampus Diepenbeek, voert onderzoek naar innovatieve spuitgiettechnieken. Eén van deze technieken is variotherm spuitgieten, waarbij de matrijstemperatuur geregeld wordt naargelang de processtap. Aangezien de cyclustijd bij spuitgieten van cruciaal belang is voor de kostprijs van een product, is het nodig deze ook bij variotherm spuitgieten te optimaliseren. De masterproef heeft als doel de cyclustijd van het variotherm proces te verlagen, door implementatie van een hybride variotherm techniek. Deze techniek combineert meerdere matrijsverwarmingsmethodes, met als doel de tijd om de matrijs op te warmen te verlagen.

Ter vergelijking werd eerst de cyclustijd bepaald van conventioneel en variotherm spuitgieten, bij parameterinstellingen voor een minimale vloeilijn. Hieruit kan de cyclustijdverhoging van het variotherm spuitgieten afgeleid worden. Ten tweede werd de matrijsverwarmingsmethode van het variotherm proces, uitgebreid met behulp van een keramisch verwarmingselement. Deze combinatie van waterverwarming met elektrische verwarming stelt het hybride variotherm spuitgieten voor. Tot slot werd de nieuwe cyclustijd van het hybride variotherm proces opgemeten, wederom bij een minimale vloeilijn.

Er werd vastgesteld dat de cyclustijd van het conventioneel spuitgieten gelijk is aan 15,7 seconden, en bij het variotherm spuitgieten gelijk is aan 47,7 seconden. Bij de variotherm techniek is echter de vloeilijn op het product gedeeltelijk verwijderd, in tegenstelling tot de conventionele techniek. Door implementatie van een hybride proces kan de cyclustijd bij variotherm spuitgieten, verlaagd worden tot 25,9 seconden. Bovendien is de vloeilijn op het product volledig verwijderd door deze implementatie.

Summary

Cel Kunststoffen, a research group from KU Leuven Technology Campus Diepenbeek, conducts research into innovative injection molding techniques. One of these techniques is variotherm injection molding, wherein the mold temperature is controlled depending on the process step. Since the cycle time of injection molding is crucial for the cost of a product, it is necessary to optimize the cycle time within the variotherm injection molding technique. This master's thesis aims to reduce the cycle time of the variotherm process by implementing a hybrid variotherm technology. This technique combines several mold heating methods, in order to reduce the time to heat the mold.

For comparison, the cycle time was first determined from conventional and variotherm injection molding, with parameter settings for a minimum weld line. From this, the cycle time increase in the variotherm injection molding can be derived. Secondly, the heating method of the mold was expanded with a ceramic heater. This combination of water heating with electric heating represents the hybrid variotherm technique. Finally the new cycle time of the hybrid variotherm process was measured, with parameter settings for a minimum weld line.

The conclusion is that the cycle time of the conventional injection molding is equal to 15,7 seconds, and at the variotherm injection molding is equal to 47,7 seconds. With the variotherm technique the weld line on the product is partly removed, in contrast to the conventional technique. Through the implementation of a hybrid process, the variotherm cycle time, is reduced to 25,9 seconds. In addition, the weld line on the product is completely removed by this implementation.

1 Inleiding

1.1 Situering

Deze masterproef werd uitgevoerd binnen Cel Kunststoffen, een onderzoeksgroep van KU Leuven op de Technologicampus Diepenbeek.

Cel Kunststoffen voert vooral onderzoek uit naar innovatieve spuitgiettechnieken zoals: water- gasinjectie, 2K-spuitgieten, microspuitgieten en variotherm spuitgieten. Verder ondersteunt de onderzoeksgroep bedrijven bij het uitwerken van nieuwe producten en het verbeteren van bestaande producten. Hiervoor beschikken ze over een ruim machinepark en uitgebreide waaier aan laboapparatuur [1]. Figuur 1 geeft het machinepark van Cel Kunststoffen weer.



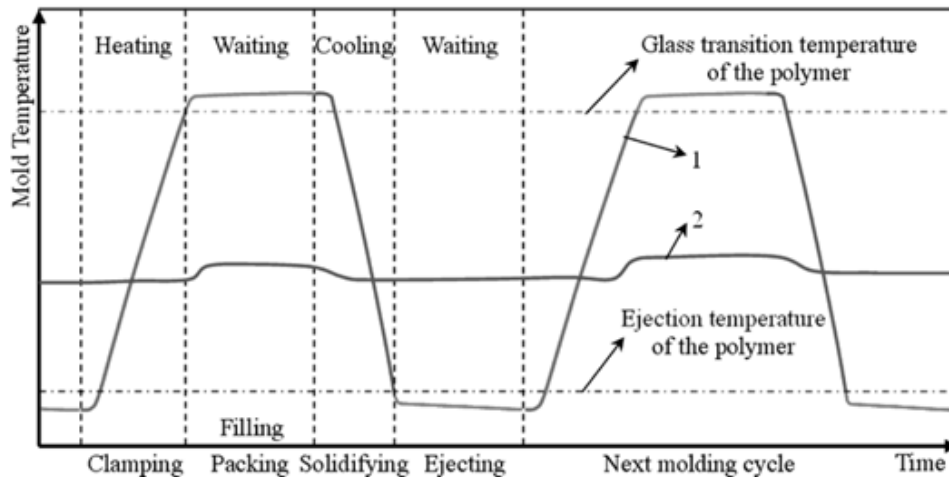
Figuur 1: Machinepark Cel Kunststoffen [1]

De voorbije jaren heeft Cel Kunststoffen heel wat onderzoek verricht rond het variotherm spuitgieten (Variotherm Injection Moulding of kortweg VIM). Bij conventioneel spuitgieten (*Conventional Injection Moulding* of kortweg CIM) wordt de matrijstemperatuur gedurende de hele spuitgietyclus constant gehouden wordt. Bij VIM daarentegen wordt de matrijstemperatuur met behulp van een verwarmingssysteem geregeld in functie van de processtap.

Bij variotherm spuitgieten wordt de matrijs kort voor het inspuiten van de kunststof opgewarmd tot boven zijn glastransitietemperatuur. Nadat het polycarbonaat opgewarmd is tot boven zijn glastransitietemperatuur wordt de matrijs afgekoeld tot een temperatuur waarbij het mogelijk is het product uit te werpen.

Bij conventioneel spuitgieten wordt de temperatuur van de matrijs constant gehouden op een tussenliggende temperatuur (voor PC 100°C-120°C).

Het verschil wordt weergegeven in figuur 2.



Figuur 2: Verschil in matrijstemperatuur bij variotherm (1) t.o.v. conventioneel (2) [2]

Variotherm spuitgieten biedt aantal voordelen ten opzichte van conventioneel spuitgieten [3]:

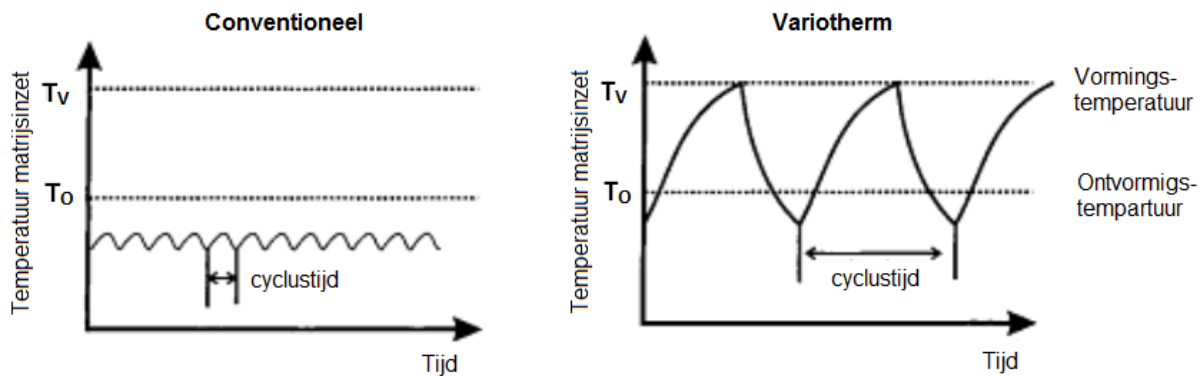
- verminderen van de zichtbaarheid van vloeilijnen;
- verlengen van de vloeiweg bij dunwandige producten;
- verlagen van de cyclustijd bij dikwandige producten;
- verbeteren van de reproductie van de vormholte;
- verminderen van inval;
- verbeteren van de oppervlaktekwaliteit van de eindproducten.

Er zijn verschillende technieken om de matrijs op te warmen met elk hun voor- en nadelen. De meest bekende technieken zijn een warmwater en een elektrisch verwarmingselement. Water kan zowel gebruikt worden om te koelen als om te verwarmen. Het nadeel van water is dat de druk in het circuit toeneemt bij een temperatuur boven 100°C waardoor de temperatuur begrensd is tot maximaal 180°C. Het gevolg hiervan is dat het watercircuit de matrijs trager verwarmd naarmate de matrijs zijn streefwaarde bereikt. Het elektrisch element daarentegen is initieel traag, omdat het eerst moet opwarmen. Het voordeel van het elektrisch element daarentegen is dat het kan verwarmen tot 450°C en hierdoor zeer snel kan verwarmen naarmate de matrijs zijn streefwaarde bereikt. De matrijsopwarming zal dus gecreëerd worden door een combinatie van beide systemen. Het afkoelen zal echter enkel gebeuren door het watercircuit, omdat een elektrisch element enkel kan verwarmen. Om de nadelen van beide technieken op te lossen, worden beide technieken gecombineerd in het hybride variotherm spuitgieten.

1.2 Probleemstelling

Spuitgieten is een techniek voor massaproductie waarbij de cyclustijd een zeer belangrijke rol speelt. Een toename in cyclustijd van slechts enkele seconden kan al snel grote gevolgen hebben op de productiekosten.

Zoals in de situering besproken, wordt de matrijs tijdens het variotherm spuitgieten afwisselend opgewarmd en afgekoeld. Voor de kunststof ingespoten kan worden, moet de matrijs zijn bovenste temperatuur bereiken. Wanneer de matrijs volledig gevuld is, moet hij weer afgekoeld worden tot de laagste temperatuur. Dit cyclisch opwarmen en afkoelen van de matrijs vraagt tijd en zorgt voor een verhoogde cyclustijd ten opzichte van het conventionele spuitgieten. Deze verlenging in cyclustijd heeft een stijging van de productiekosten tot gevolg. Om deze reden wegen in veel gevallen de voordelen van het variotherm spuitgieten niet op tegen de verhoogde productiekost. Figuur 3 geeft het verschil in cyclustijd tussen beide technieken weer.



Figuur 3: Verschil in cyclustijd bij conventioneel en variotherm spuitgieten [4]

1.3 Doelstelling

De hoofddoelstelling van deze masterproef is het vergelijken van drie spuitgiettechnieken, namelijk conventioneel, variotherm en hybride variotherm. Deze vergelijking moet gebeuren op basis van drie criteria. Ten eerste moet de procesopbouw geanalyseerd worden. Ten tweede moet de cyclustijd opgemeten worden, bij een minimale zichtbaarheid van de vloeilijn. Tot slot moet de mate van zichtbaarheid van de vloeilijn bepaald worden.

1.4 Materiaal en methode

In dit onderzoek zullen de drie spuitgiettechniek geanalyseerd worden, op basis van volgende stappen.

Ten eerste wordt het **spuitgietproces opgebouwd**. Hierin wordt de matrijs enerzijds bevestigd op de spuigietmachine, als aangesloten op de matrijsverwarmingseenheid. Vanuit deze opbouw kan het proces geïnitieerd worden, zodat het spuigietmachine synchroon werkt met het verwarmingsysteem.

Ten tweede wordt het **procesvenster opgesteld**. Het doel van dit venster is om een gebied af te bakenen voor uiterste waarden van de procesparameters, waarin visueel goede producten gecreëerd worden. Onder visueel goede producten verstaan we producten zonder inval en producten zonder braam en vervorming.

Ten derde wordt een **DoE-analyse** (*design of experiments*) uitgevoerd. Hiermee kunnen de optimale spuitgietparameters bepaald worden voor een minimale zichtbaarheid van de vloeilijn.

Tot slot wordt de **cyclustijd** opgemeten. Hierbij worden de optimale spuitgietparameters ingesteld, die bepaald zijn uit de DoE-analyse.

De vierde en **laatste stap** in het onderzoek is het opstellen van een **overzicht tussen de opgemeten cyclustijden en de bijhorende procesparameters**. Op deze manier wordt er een duidelijk beeld gevormd van het verschil in procesvensters en cyclustijd voor de drie verschillende technieken.

2 Literatuurstudie

2.1 Spuitgieten

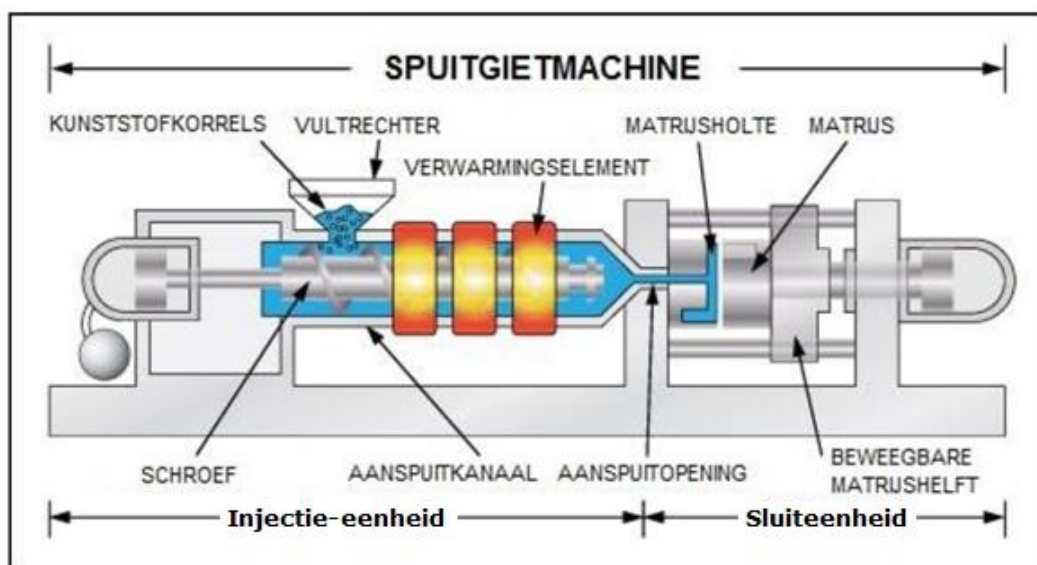
Kunststof spuitgieten is een van de meest gebruikte productietechnieken binnen de kunststofindustrie. Het is een discontinu proces waarbij een ruim aanbod van verschillende kunststoffen gebruikt wordt. Spuitgieten is gebaseerd op een cyclus waarbij gesmolten kunststof in een matrijs geïnjecteerd wordt. Vervolgens koelt men de matrijs, zodat het product stolt en uit de matrijs verwijderd kan worden [5].

Belangrijke voordelen van spuitgieten zijn:

- Economisch produceren van grote hoeveelheden producten;
- Reproduceerbare toleranties op het product mogelijk;
- Nabewerking is meestal overbodig.

2.1.1. Spuitgietmachine

Een spuitgietmachine bestaat uit 2 hoofdonderdelen, namelijk de injectie-eenheid en de sluiteenheid. Figuur 4 geeft de schematische voorstelling van een spuitgietmachine weer.



Figuur 4: Schematische opbouw van een spuitgietmachine [6]

De injectie-eenheid bevat een vultrechter die de kunststof in korrelvorm naar de schroef leidt. De schroef zal op zijn beurt de kunststof door een rotatieve beweging verplaatsen naar de aanspuitopening. Tijdens deze beweging zullen de kunststof korrels geleidelijk smelten, door frictie tussen de korrels en de binnenwand in combinatie met elektrische verwarmingselementen. De sluiteenheid omvat de matrijs en de kleminstallatie. Het doel van deze eenheid is om de vaste – en beweegbare matrijshelft onder voldoende kracht gesloten te houden tijdens het spuitgietproces. Verder zorgt de sluiteenheid voor het uitwerpen van de producten uit de matrijs.

2.1.2. Spuitgietscyclus

De spuitgietscyclus kan opgedeeld worden in 4 grote stappen: doseren, injecteren, nadrukken/koelen en uitwerpen.

Stap 1: Doseren

Allereerst moet de vultrechter gevuld worden met kunststofkorrels. De korrels worden met behulp van de trechter naar de schroef geleid. Telkens de schroef een omwenteling maakt zal een hoeveelheid kunststof verplaatsen naar de aanspuitopening. Tijdens deze verplaatsing smelt de kunststof door verwarmingselementen in combinatie met wrijving. Door de verplaatsing verhoogt de hoeveelheid gesmolten kunststof aan de aanspuitopening. Als gevolg van deze verhoging in hoeveelheid wordt er een druk gecreëerd, die er voor zorgt dat de schroef geleidelijk naar achter verplaatst in de axiale richting.

Stap 2: injecteren

Na het doseren van de juiste hoeveelheid kunststof, zal de schroef zorgen voor het injecteren van de kunststof in de matrijs. Dit gebeurt door een voorwaarts axiale verplaatsing van de schroef. Hierdoor ontstaat er een hoge druk waardoor het kunststof zich volledig kan verspreiden in de matrijsholte.

Stap 3: Nadrukken/koelen

Nadat de matrijsholte gevuld is, zal het product op een bepaalde nadruk gehouden worden. Deze druk, genaamd nadruk, zorgt dat de krimp in het product opgevangen wordt. Tijdens de nadruk is het product reeds aan het koelen, doordat de matrijs op een temperatuur gebracht wordt lager dan het gesmolten kunststof.

Stap 4: Uitwerpen

Eens het product gekoeld is tot een temperatuur waarbij het product niet vervormd door de uitstoters, zal de matrijs openen. Hierdoor kan het product verwijderd worden uit de matrijs. Dit kan gebeuren door een set van uitwerpers, perslucht, een afstroopplaat of een robot.

2.1.3. Spuitgietsparameters

Een spuitgietsproces kunnen er verschillende parameters ingesteld worden. Deze parameters kunnen opgedeeld worden in materiaal- en procesafhankelijke parameters. Naar gelang het gewenste resultaat, zullen deze parameters op een bepaalde manier ingesteld worden.

Ten eerste bespreken we de materiaalafhankelijke parameters.

Massatemperatuur:

De massatemperatuur wordt geregeld door de elektrische verwarmingselementen rond de schroef. De massatemperatuur staat in functie van de viscositeit van de kunststof. Hoe hoger de temperatuur hoe lager de viscositeit en hoe lager de injectiedruk van de spuitgietsmachine moet zijn. De meeste producenten van kunststoffen geven een gebied aan waarin de massatemperatuur moet gelegen zijn.

Matrijstemperatuur:

De matrijstemperatuur wordt geregeld door de verwarming van de matrijs. Enkele voorbeelden van verwarmingsmethodes zijn: een elektrisch verwarmingselement of convector met behulp van water of olie. Wanneer de matrijstemperatuur ingesteld wordt op een te lage waarde, zal de kunststof onmiddellijk stollen. Hierdoor ontstaat er een gestolde massa aan het matrijsoppervlak, wat resulteert in een daling van doorstroombare ruimte. Hierdoor moet de injectiedruk hoger worden om de matrijscaviteit te vullen. De meeste producenten van kunststoffen geven een gebied aan waarin de matrijstemperatuur moet gelegen zijn.

Vervolgens bespreken we de machineafhankelijke parameters.

Injectiesnelheid:

De injectiesnelheid is de axiale snelheid waarmee de schroef zich vooruit verplaatst. Als deze injectiesnelheid toeneemt, zal de afschuifsnelheid van de kunststof ook toenemen. Doordat de afschuifsnelheid stijgt, zal er intern warmte worden toegevoegd. Hierdoor zal de viscositeit van de kunststof dalen.

Nadruk:

De nadruk is een zeer belangrijke parameter voor een goede kwaliteit van een product. Deze druk zorgt ervoor dat de krimp die optreedt tijdens het stollen, opgevangen wordt. Praktisch zal de schroef voor een bepaalde tijd (nadruktijd), kunststof onder hoge druk aanhouden. Hierdoor wordt er extra kunststof toegevoegd, wat het krimpen opvangt. Zo zal het product beter voldoen aan de vooropgestelde voorwaarden zoals toleranties op maten.

Nadruktijd:

De nadruktijd geeft de tijd weer hoelang de nadruk aangehouden wordt. De nadruk zal aangehouden worden, totdat de aanspuiting afvriest. Hierdoor kan er geen nieuw materiaal toegevoegd worden.

Koeltijd:

De koeltijd vindt plaats tussen het nadrukken en het effectief uitwerpen van het product. Deze tijd zorgt ervoor dat het product kan afkoelen tot een temperatuur waarbij het product niet vervormd door de uitstoters. Op deze manier kan het product stollen, en uitgeworpen worden zonder beschadiging of vervorming.

2.2 Conventioneel, variotherm en hybride variotherm spuitgieten

Conventioneel spuitgieten

Conventioneel spuitgieten is algemeen de meest gebruikte spuitgietmethode. Hierbij wordt de temperatuur van de matrijs op een constante waarde gehouden gedurende het spuitgietproces. Dit wordt gerealiseerd met behulp van een koelmedium door koelkanalen van de matrijs te laten stomen. De gewenste temperatuur van de matrijs is afhankelijk van het soort kunststof dat men gebruikt tijdens het spuitgieten. Het koelmiddel zal altijd een temperatuur hebben lager dan de glastransitietemperatuur, zodat het kunststof product kan stollen. Doordat de matrijs op een constante temperatuur gehouden wordt zijn er korte cyclustijden mogelijk [7].

Variotherm spuitgieten

Variotherm spuitgieten, in het Engels Rapid Thermal Response Molding of Rapid Heat Cycle Molding genoemd, is een relatief nieuwe techniek binnen het kunststof spuitgieten. Hierbij varieert de temperatuur van de matrijs naargelang de processtap. De temperatuur variatie kan opgedeeld worden in twee delen. Als eerste zal er een periode van matrijsopwarming zijn voor het inspuiten van de kunststof. Hierbij wordt de matrijs opgewarmd tot boven de glastransitietemperatuur van de kunststof. Vervolgens zal er een periode zijn van matrijsafkoeling vlak na de insputing, zodat het kunststof product kan stollen. Omdat men bij variotherm spuitgieten gebruik maakt van temperatuurvariaties, zal het opwarmen en afkoelen van de matrijs enige tijd in beslag nemen. Hierdoor zal de cyclustijd in veel gevallen hoger zijn dan bij conventioneel spuitgieten [2].

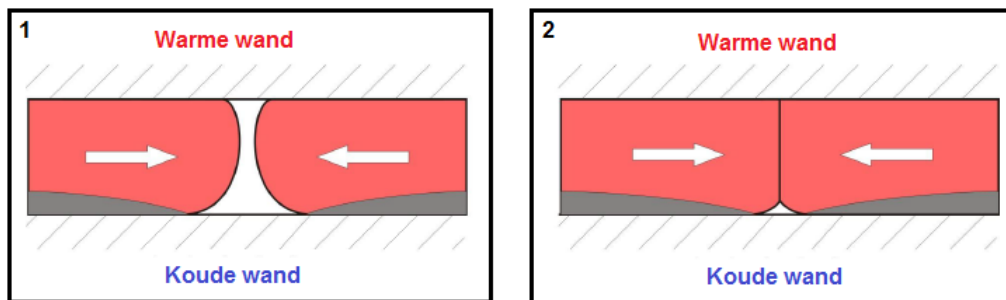
Hybride variotherm spuitgieten

Hybride variotherm spuitgieten is een variant van de variotherm methode waarbij meerdere methodes voor het verwarmen van de matrijs gecombineerd worden. Op deze manier kan men de voordelen van verschillende technieken combineren. De combinatie die in deze masterproef gebruikt zal worden is een elektrisch aangestuurd verwarmingselement in combinatie met een watercircuit. Hierbij is het voordeel van het watercircuit dat het initieel snel verwarmt omdat het water in de koeleenheid reeds circuleert op zijn ingestelde temperatuur. Het nadeel van water is dat de druk in het circuit toeneemt bij een temperatuur boven 100°C waardoor de temperatuur begrensd is tot maximaal 180°C. Het gevolg hiervan is dat het watercircuit de matrijs trager verwarmt naarmate de matrijs zijn streefwaarde bereikt. Het elektrisch element daarentegen is initieel traag, omdat het eerst zelf moet opwarmen. Het voordeel van het elektrisch element daarentegen is dat het kan verwarmen tot 450°C en hierdoor zeer snel kan verwarmen. De matrijsopwarming zal dus gecreëerd worden door een combinatie van beide systemen. Het afkoelen zal echter enkel gebeuren door het watercircuit, omdat een elektrisch element enkel kan verwarmen. Als conclusie zal het verwarmen bij hybride variotherm spuitgieten sneller zijn als bij variotherm spuitgieten. Hierdoor verwacht men een lagere cyclustijd.

2.2.1. Variotherm spuitgieten versus conventioneel spuitgieten

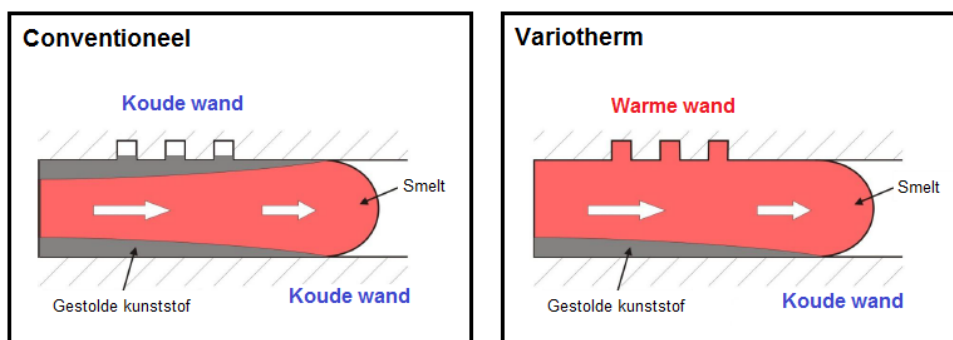
Voordelen [3], [8]

- Indien bij conventioneel spuitgieten meerdere vloeifronten elkaar tegenkomen, ontstaat er vloeilijn. Dit is een fragiele lijn waar de twee fronten niet goed in elkaar overvloeien. Bij variotherm spuitgieten zal de matrijs tijdens het inspuiten nog steeds boven de glastransitietemperatuur van de kunststof zijn, waardoor de fronten wel goed in elkaar kunnen overvloeien. Hierdoor zijn vloeilijnen minder zichtbaar en sterker, zoals figuur 5 weergeeft.



Figuur 5: Verschil in vloeinaad bij conventioneel en variotherm [8]

- Kortere cyclustijden mogelijk bij dikwandige producten door middel van snellere afkoeling.
- Variotherm spuitgieten kan de breuktaaiheid verhogen. Variotherm laat toe een product met lagere nadruk te spuitgieten, zonder inval. Door een lagere nadruk zijn er minder inwendige spanningen in het product.
- Dankzij de hogere temperatuur van de matrijs, kan men bij variotherm een zeer goede reproductie van de vormholte creëren zoals weergegeven op figuur 6. Hierdoor is het ook mogelijk het matrijsoppervlak nagenoeg exact te kopiëren zodat de gewenste textuur of glans wordt bekomen. Nabewerking van het oppervlak is vervolgens overbodig.



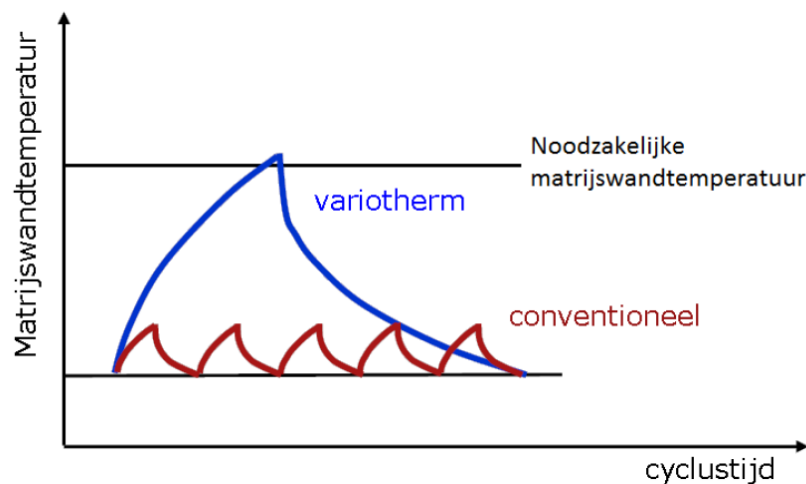
Figuur 6: Reproductie vormholte [8]

- Inval ten gevolge van ribben en schroefnokken in het product, kunnen m.b.v. variotherm spuitgieten verminderd of vermeden worden.

- Produceren van zeer dunwandige producten mogelijk, doordat de temperatuur van de matrijs tijdens het inspuiten hoger zal liggen. Hierdoor zal de vloeiweglengthe van het kunststof toenemen.
- Spuitgietproducten met blaasmiddel, voor het creëren van een schuimstructuur, hebben vaak last van een luipaardhuid (zilveren wolkjes) op hun oppervlak. Dit kan door de variotherm techniek vermeden worden.

Nadelen [3], [8]

- Een kortere cyclustijd ten gevolge van variotherm spuitgieten geldt enkel voor dikwandige producten. Dit wil zeggen dat in de meeste gevallen sprake is van een verlenging van de cyclustijd ten gevolge van de temperatuur variatie. Tijdens elke cyclus is er namelijk een periode van matrijsverwarming en matrijsafkoeling. Dit heeft een lagere productiviteit tot gevolg. Figuur 7 geeft het verschil weer tussen variotherm en conventioneel spuitgieten.



Figuur 7: Verschil in cyclustijd variotherm & conventioneel spuitgieten [8]

- Om een cyclustijdsverhoging bij variotherm spuitgieten te beperken, moet de matrijs ontworpen worden zodat de koelkanalen een optimale ligging hebben. Hierdoor zullen de kosten bij productie en gebruik van de matrijs hoger liggen dan conventioneel spuitgieten.
- De omstandigheden waarin een matrijs voor variotherm spuitgieten moet werken, zijn veel zwaarder dan die van conventionele spuitgietprocessen. De matrijs krijgt immers te maken met grote temperatuurschommelingen. Het gevolg hiervan is dat de levensduur van de matrijs negatief beïnvloed wordt. Xiping et al. stellen dat de matrijskosten voor een variotherm spuitgietproces tot vijf maal groter kunnen zijn dan die van de conventionele spuitgietprocessen. [9]

2.2.2. Matrijsverwarming en -koeling

Zoals eerder vermeld, moet bij variotherm spuitgieten, de matrijs gekoeld en verwarmd worden naargelang de processtap. Hiervoor bestaan reeds een aantal methodes. In dit hoofdstuk worden de verschillende verwarmings- en koelingsmethodes besproken.

Matrijsverwarming

Tabel 1 geeft een overzicht van de verschillende matrijsverwarmingsmethodes die gehanteerd worden bij spuitgieten.

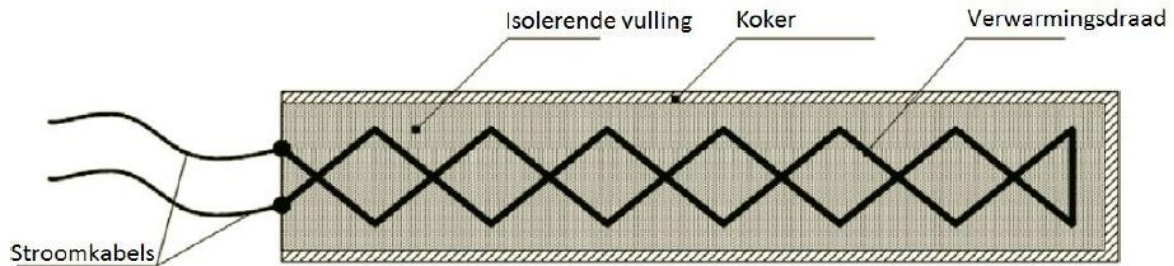
Tabel 1: Verschillende matrijsverwarmingsmethodes [10]

Elektrisch	<i>Lage frequentie</i>	DC
		AC
	<i>Hoge frequentie</i>	Inductie
		Wederzijdse inductie (proximity effect)
Diëlektrisch (microgolf)		
Thermo-elektrisch effect (Peltier effect)		
Convectie	<i>Interne media</i>	Olie
		Stoom
		Gas
		<i>Water onder druk</i>
	<i>Externe media</i>	Gas
		Condenserende damp
Vlam		
Straling	Infrarood	
	Laser	
Contact	Verwarmd voorwerp	
	Passief, door gesmolten polymeer	
Andere	Ultrasoon	

Er zal dieper ingegaan worden op de twee verschillende verwarmingsmethodes die gebruikt worden binnen deze masterproef, namelijk elektrische verwarming met lage frequentie (AC) en convectieverwarming met behulp van water onder druk.

Elektrische verwarming met lage frequentie (AC)

Elektrische verwarming maakt doorgaans gebruik van een keramisch element. Dit element bestaat uit een roestvast stalen koker, met daarin verwarmingsdraden en elektrisch isolerend poeder. Figuur 8 geeft een vereenvoudigde weergave van zo een verwarmingselement.



Figuur 8: Voorbeeld keramisch verwarmingselement [7]

Keramische elementen hebben een aantal voor- en nadelen.

Voordelen [11]:

- er zijn zeer hoge temperaturen haalbaar, tot boven 300 °C;
- het element kan in een paar seconden de ingestelde temperatuur bereiken;
- het element zorgt voor een uniforme verdeling van de warmte;
- er wordt geen gebruik gemaakt van een vloeibaar medium. Er is dus geen kans op lekkages of eventuele verstoppingen van koelkanalen;
- deze methode is veel veiliger voor het personen dicht bij de machine. Doordat er geen heet medium circuleert en eventueel kan lekken;
- thermische geleidbaarheid van keramische elementen (Si_3N_4 : 40 W/m K) is hoger dan die van staal (H13: 28 W/m K).

Nadelen [11]:

- het belangrijkste nadeel is dat het keramisch element enkel kan opwarmen en niet koelen. Er blijft dus een andere koeling nodig om de matrijs af te koelen en op temperatuur te houden;
- er moet een bijkomend element in de matrijs ingebouwd worden, waardoor er minder plaats is voor uitwerpers en eventuele koelkanalen;
- er zijn standaard slechts een beperkt aantal vormen van keramische elementen beschikbaar. Daardoor is de techniek vooral geschikt voor vlakke producten;
- de thermische expansie van keramiek (Si_3N_4 : $3 \times 10^{-6} / \text{K}$) is veel lager dan die van staal (H13: $10,5 \times 10^{-6} / \text{K}$). Dit kan tot spanningen tussen het staal en de keramiek leiden en uiteindelijk tot breuk van de keramiek;
- een temperatuursensor is nodig om de temperatuur van de keramiek van een regeling te voorzien. De temperatuur zou anders gevaarlijk hoog kunnen oplopen;

Convectieverwarming met behulp van water onder druk

Wanneer men convectieverwarming met behulp van water onder druk wil toepassen, moet men koelkanalen aanbrengen in de matrijs. Op deze manier wordt er een watercircuit gevormd, welk verbonden wordt met een koeleenheid. Er zijn 2 soorten technieken voor het aanbrengen van deze koelkanalen, namelijk de koelkanalen boren, frezen of gebruik maken van Selective Laser Melting.

Voordelen [12]:

- men kan zowel koelen als verwarmen met water onder druk;
- complexe koelcircuits mogelijk met behulp van Selective Laser Melting;
- geen temperatuur sensor nodig. De temperatuurregeling gebeurt in de verwarmingseenheid.

Nadelen [12]:

- het belangrijkste nadeel is dat de druk zeer hoog oploopt wanneer men water verwarmd boven 100°C. Hierdoor wordt de maximale temperatuur beperkt tot 180°C;
- ligging van de kanalen is erg belangrijk voor een optimale verwarming;
- water zorgt voor corrosie van staal;
- er kunnen verstoppingen optreden in de koelkanalen van de matrijs;
- lekkages van water onder zeer hoge druk is gevaarlijk voor omstaanders.

Matrijskoeling

Tabel 2 geeft een overzicht van de verschillende matrijskoelingsmethodes die gehanteerd worden bij spuitgieten. Binnen deze masterproef zal enkel convectie met behulp van water behandeld worden.

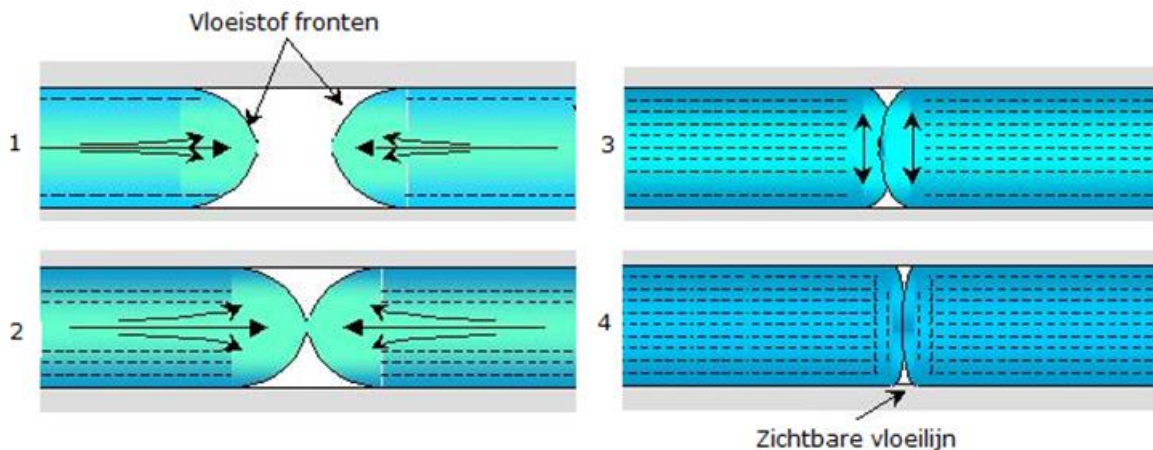
Tabel 2: Verschillende matrijskoelingsmethodes [10]

<i>Convectie</i>	<i>Interne media</i>	<i>Water</i>
		Gas
Warmtepomp	Peltier effect	
	Vortex tubes	
	Condensoren en verdamper	

2.3 Vloeilijn

2.3.1. Ontstaan van een vloeilijn

Een veel voorkomend ongewenst effect bij spuitgietproducten is de aanwezigheid van een vloeilijn. Het ontstaan van een vloeilijn wordt weergegeven in figuur 9.



Figuur 9: Ontstaan van een vloeilijn bij conventioneel spuitgieten [13]

Indien bij het spuitgieten meerdere vloeifronten elkaar tegenkomen, ontstaat er vloeilijn. Dit is een fragiele lijn waar de twee fronten niet goed in elkaar overvloeien. Omdat de koudere matrijswand het kunststof doet stollen, verloopt de hechting moeilijk. Hierdoor ontstaat er een uitwendig zichtbare vloeilijn met een v-inkeping als typisch kenmerk. Volgens T. Tjäder et al. [14] is de voornaamste oorzaak voor het ontstaan van de v-inkepingen te wijten aan de compressie van lucht tegen de matrijswand, wanneer vloeifronten elkaar ontmoeten.

2.3.2. Sterkte van een vloeilijn

Volgens Bozzelli [15] wordt de sterkte van de vloeilijn bepaald door zowel het **matrijsontwerp**, de **materiaalkeuze** als de **procesparameters** van de spuitgietinstallatie.

Matrijsontwerp [15]

Het matrijsontwerp bepaalt de ligging en grootte van de vloeilijn. Belangrijk is een correcte ontluchting te voorzien in de matrijs. Want ingesloten lucht zorgt dat de inkepingen van de vloeilijn vergroot wordt. Om er voor te zorgen dat de lucht steeds kan ontsnappen moet de sluitkracht beperkt worden.

Materiaalkeuze [15]

Materiaaleigenschappen kunnen de sterkte van de vloeilijn beïnvloeden. De vloeilijn is zwakker wanneer polymeerketens slechts gedeeltelijk verstrengeld zijn op de vloeilijn. Over het algemeen hebben amorfe kunststoffen een sterkere vloeilijn dan semi-kristallijne kunststoffen.

Procesparameters

- **Matrijs- en smelttemperatuur** [15] [16]

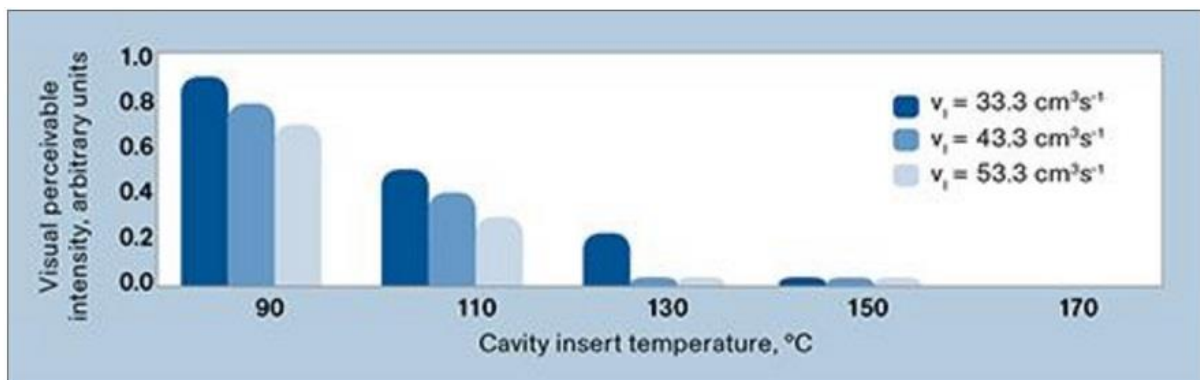
Van alle onderzochte procesparameters is de matrijs- en smelttemperatuur de meest voornamelijk parameter. Een hoge smelttemperatuur en matrijstemperatuur zorgen voor een lagere residuele spanningen als voor een betere diffusie van de moleculaire ketens. Hierdoor zullen de vloeifronten beter hechten, waardoor de vloeilijn sterker en minder zichtbaar wordt. Indien de matrijstemperatuur boven de glastransitietemperatuur is, zal het product nog niet stollen en kan de vloeilijn volledig onzichtbaar gemaakt worden. Wanneer de smelttemperatuur overschreden wordt, verklaart [15] dat er vluchtige stoffen van het polymeer kunnen afscheiden, waardoor de vloeilijnsterkte afneemt.

- **Nadruk**

Een hoge nadruk compenseert krimp en zorgt voor een goede intermoleculaire binding. Hierdoor zal de vloeilijnsterkte in geringe mate positief beïnvloedt worden. Een verhoging van de nadruktijd zal vervolgens ook een positieve invloed op de vloeilijnsterkte, omdat zo alle krimp gecompenseerd wordt [15].

- **Injectiesnelheid**

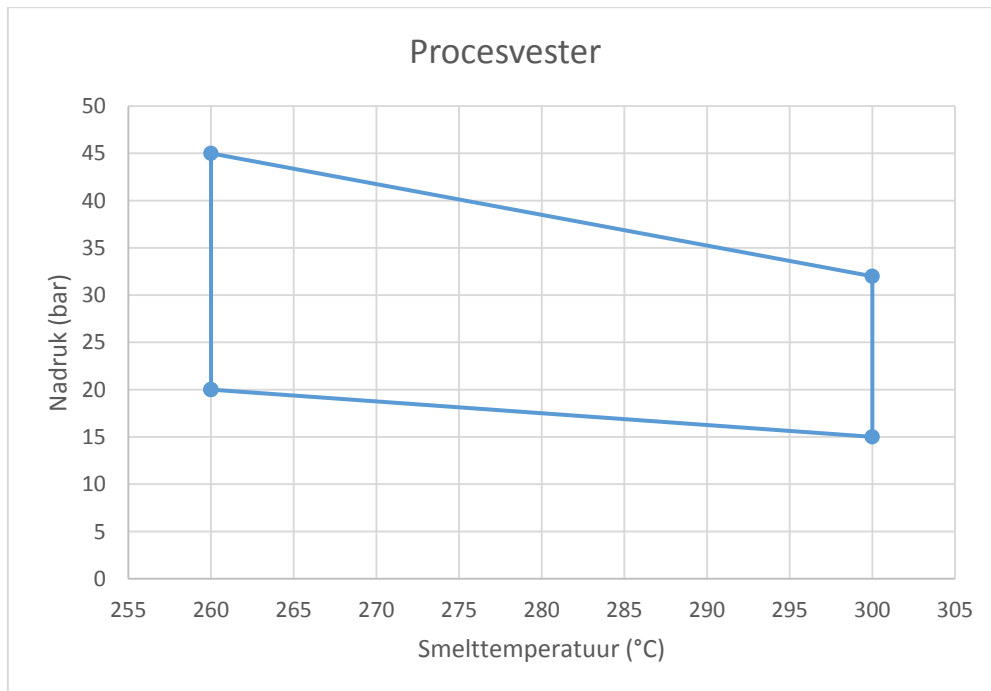
Toename van de injectiesnelheid zorgt voor een lagere viscositeit van de kunststof. Zo zorgt deze toename van injectiesnelheid ervoor dat de injectiedruk stijgt, waardoor de binding van de vloeifronten sterker wordt. Dit resulteert voor de vloeilijn in een verhoging van de sterkte en een daling van de zichtbaarheid. Figuur 10 geeft weer hoe de visuele perceptie varieert in functie van de injectiesnelheid en matrijstemperatuur [18].



Figuur 10: Visuele perceptie van de vloeilijn, i.f.v. injectiesnelheid en matrijstemperatuur [18]

2.4 Procesvenster

Een procesvenster bakkend een gebied af voor de procesparameters, waarin visueel goede producten gecreëerd worden. Onder visueel goede producten verstaan we producten zonder inval, braamvorming en vervorming. Het bepalen van het procesvenster is opgedeeld in twee stappen. In de eerste stap wordt de viscositeitscurve opgesteld, om de ideale inspuitingsnelheid te bepalen. De tweede stap bepaalt het procesvenster op basis van nadruk en massatemperatuur. Figuur 11 toont een voorbeeld van een procesvenster.



Figuur 11: Voorbeeld procesvenster

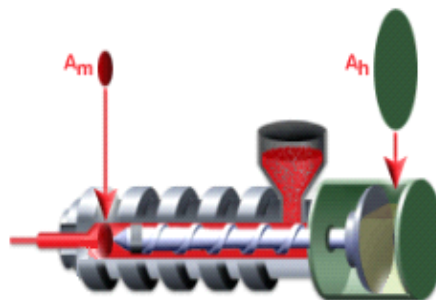
Stap 1: Viscositeitscurve voor bepalen injectiesnelheid

Elke kunststof is niet-Newtoniaans, wat wil zeggen dat de viscositeit verandert in functie van de afschuifsnellheid. De afschuifsnellheid is op zijn beurt afhankelijk van de injectiesnelheid. Door de injectiesnelheid in te stellen op de spuitgietmachine en een maat voor de viscositeit te meten, kan de viscositeitscurve worden opgesteld. De viscositeitscurve die we hieruit bekomen, geldt enkel voor de gebruikte spuitgietmachine, matrijs en kunststof [21].

Binnen deze curve zijn we geïnteresseerd in het gebied waar de waarde van viscositeit relatief constant blijft in functie van de injectiesnelheid. Op deze manier kunnen we een injectiesnelheid kiezen die kan variëren zonder dat de viscositeit van de kunststof sterk wijzigt. Het bepalen van deze viscositeitscurve gebeurt door middel van een stappenplan waarin reeds concrete waarden ingevuld zijn voor het gebruikt kunststof [21].

Stappenplan [5], [21]:

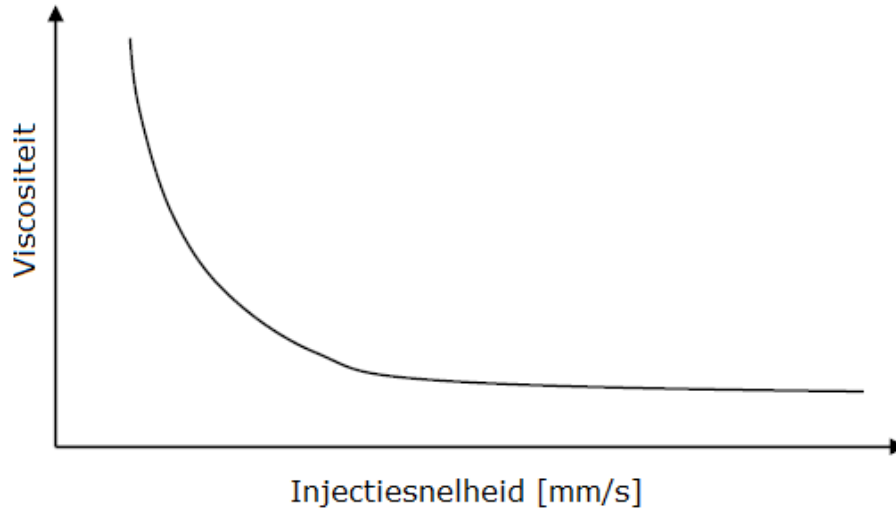
- 1) Aangezien er met polycarbonaat gewerkt wordt, moet de kunststof op voorhand gedroogd worden gedurende **2 á 3 uur** op een temperatuur van $\pm 100^{\circ}\text{C}$. Hierdoor wordt het vocht onttrokken uit de kunststof.
- 2) De matrijstemperatuur wordt ingesteld op een waarde in een range van $80^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}$, welke opgegeven is door de fabrikant van de kunststof.
- 3) De smeltemperatuur wordt ingesteld op een waarde in een range van $290^{\circ}\text{C} - 320^{\circ}\text{C}$, welke opgegeven is door de fabrikant van de kunststof.
- 4) De nadruk en nadruktijd worden ingesteld op **0 bar** en **0 s**.
- 5) De maximale injectiedruk stellen we in op de hoogste waarde van de machine, namelijk **2580 bar**. Indien we de maximale injectiedruk zouden beperken, kan het zijn dat de gevraagde injectiesnelheid niet gehaald wordt.
- 6) De koeltijd wordt ingesteld op een veilige waarde van **20s**. Hierbij is het product zeker lang genoeg gekoeld.
- 7) De injectiesnelheid wordt ingesteld op een lage waarde van **50mm/s**. Vervolgens wordt doseervolume proefondervindelijk geregeld, zodat het product **50%** gevuld is. Op deze manier kan product eenvoudig uit de matrijs verwijderd worden.
- 8) De injectiesnelheid wordt ingesteld op de maximale snelheid van **300mm/s**. Hierbij moet het product voor **95%** gevuld zijn. Indien niet, moet het doseervolume aangepast worden.
- 9) Maak een product bij deze instellingen, en neem hiervan de injectietijd en piek injectiedruk op.
- 10) Vervolgens laten we de injectiesnelheid dalen in stappen van **20mm/s**. Per stap moet de injectietijd en piek injectiedruk opgenomen worden. Deze metingen worden opgenomen in een tabel.
- 11) Voor het berekenen van de viscositeit, moeten we de *screw intensification ratio* van de spuitgietinstallatie bepalen. Dit is de verhouding tussen het zuigeroppervlak (A_h) en het schroefoppervlak (A_m), dit is te zien in Figuur 12. Aangezien de spuitgietmachine volledig elektrisch is, heeft deze geen overbrengingsverhouding. Hierdoor mag er uitgegaan worden van een screw intensification ratio van 1.



Figuur 12: Screw intensification ratio [22]

- 12) Een maat voor de viscositeit wordt voor elke stap bepaald met volgende formule:
$$\text{Viscositeit} = \text{Piek injectiedruk [bar]} \cdot \text{Vultijd [s]} \cdot \text{Screw Intensification Ratio}$$

De viscositeit wordt uitgezet in de y-as en de injectiesnelheid wordt uitgezet in de x-as. Onderstaande grafiek toont een voorbeeld van een viscositeitscurve.



Figuur 13: Voorbeeld viscositeitscurve [21]

Stap 2: Opstellen van het procesvenster

Het procesvenster bestaat uit de smelttemperatuur in functie van de nadruk. Om dit venster op te stellen, gaan we met behulp van een stappenplan opzoek naar de vier uiterste punten waarbinnen het product visueel aanvaardbaar is [23].

Stappenplan [5], [23]:

- 1) De kunststof wordt gedroogd gedurende **2 á 3 uur** op een temperatuur van **$\pm 100^{\circ}\text{C}$** .
- 2) De smelttemperatuur wordt ingesteld op de laagste waarde opgegeven door de producent, namelijk **290°C** .
- 3) De matrijstemperatuur opgegeven door de fabrikant ligt in een range van **80°C – 120°C** . Als instelling is gekozen voor temperatuur kort bij de hoogste waarde, namelijk **115°C** . Dit omdat een hoge waarde een positief effect heeft op de vloeilijn.
- 4) De injectiesnelheid bepaald uit stap 1, is een range van 200 mm/s en 300 mm/s. De injectiesnelheid wordt ingesteld op de gemiddelde waarde van dit gebied, namelijk **250 mm/s**.
- 5) De nadruk en nadruktijd worden ingesteld op **0 bar** en **0 s**.
- 6) De koeltijd wordt ingesteld op een veilige waarde van **20s**. Hierbij is het product zeker lang genoeg gekoeld.
- 7) Het doseervolume wordt proefondervindelijk geregeld, zodat het product voor **98%** gevuld is, dit is bij een **doseerlengte** van **45mm**.
- 8) We laten het proces stabiliseren, door **5 tot 8 shots** te maken met de ingestelde parameters.
- 9) Vervolgens wordt de nadruktijd ingesteld op een waarde, waarbij de gate zeker is afgevroren. Hierdoor kan er geen materiaal meer geïnjecteerd worden, en heeft de nadruk geen invloed meer. De gekozen waarde voor de nadruktijd is **10s**.
- 10) De nadruk wordt stapsgewijs verhoogd, totdat er geen inval meer zichtbaar is. Vervolgens regelen we de nadruk fijn, zodat we net boven de grens zitten van inval. Hierdoor vinden we het punt linksonder in het venster, namelijk lage temperatuur en lage nadruk.
- 11) De nadruk wordt wederom stapsgewijs verhoogd, totdat er braamvorming optreedt. Vervolgens regelen we de nadruk fijn, zodat we net onder de grens zitten van braamvorming. Hierdoor vinden we het punt linksboven in het venster, namelijk lage temperatuur en hoge nadruk.
- 12) Tot slot wordt stap 8 en 9 herhaald, maar nu bij een smelttemperatuur ingesteld op de hoogste waarde, namelijk **320°C** .
- 13) Op deze manier vinden we de punten rechtsonder en rechtsboven in het venster, namelijk hoge temperatuur lage nadruk en hoge temperatuur hoge nadruk.
- 14) We verbinden de vier gevonden punten, zodat we een procesvenster vinden.

2.5 Design of Experiments

Het doel van de DoE-analyses in deze masterproef, is om de invloed van gekozen parameters op de zichtbaarheid van de vloeilijn te kennen. Zo kunnen we bepalen op welke manier de parameters ingesteld moeten worden voor een minimale zichtbaarheid van de vloeilijn.

Aan de basis van een DoE-analyse staat een parametermatrix. Hierin worden een aantal parameters gekozen, welke invloed hebben op het gewenst effect. Hoe meer parameters gekozen worden hoe groter de matrix wordt, en hoe meer experimenten uitgevoerd moeten worden. In deze masterproef is gekozen voor 4 parameters, namelijk:

- **Matrijstemperatuur:**
De meest belangrijke procesparameter om te onderzoeken is matrijstemperatuur, aangezien dit het grote verschil is tussen conventioneel, variotherm en hybride variotherm spuitgieten. De literatuur geeft ook aan dat dit de meest invloedrijke parameter is.
- **Smelttemperatuur:**
De tweede gekozen parameter is de smelttemperatuur. Dit omdat volgens de literatuurstudie een hoge smelttemperatuur zorgt voor een lagere residuele spanningen en een betere diffusie van de moleculaire ketens. Hierdoor zal de vloeilijn sterker en minder zichtbaar worden.
- **Nadruk:**
De derde gekozen parameters is de nadruk. Volgens de literatuur, zal een hoge nadruk zorgen voor een goede intermoleculaire binding. Hierdoor kan de zichtbaarheid van de vloeilijn dalen.
- **Injectiesnelheid**
De laatste gekozen parameters is de injectiesnelheid. Volgens de literatuur zal een toename van injectiesnelheid zorgen voor lagere viscositeit, waardoor de binding van de vloeifronten sterker wordt. Hierdoor zal de zichtbaarheid van de vloeilijn dalen.

De combinatie van deze vier parameters, resulteert in een 2^4 design matrix, welke weergegeven is in tabel 3.

Tabel 3: DoE-matrix

DOE Design Matrix				
Nr.	Matrijstemperatuur	Smelttemperatuur	Nadruk	Injectiesnelheid
1	L	L	L	L
2	H	L	L	L
3	L	H	L	L
4	H	H	L	L
5	L	L	H	L
6	H	L	H	L
7	L	H	H	L
8	H	H	H	L
9	L	L	L	H
10	H	L	L	H
11	L	H	L	H
12	H	H	L	H
13	L	L	H	H
14	H	L	H	H
15	L	H	H	H
16	H	H	H	H

Eens de DoE design matrix compleet is, kan er gestart worden met het experimentopzet. Hierin zullen er samples gemaakt worden voor zestien verschillende instellingen. Om de herhaalbaarheid in te schatten en uitschieters te voorkomen, zullen we bij elke instelling vijf *samples* maken. Op deze manier krijgen we een beter resultaat van elke individuele instelling. Verder moet er rekening gehouden worden met volgende aspecten:

- **Matrijstemperatuur:**
Na het aanpassen van de matrijstemperatuur moet er enkele minuten gewacht worden. Op deze manier zorgen we ervoor dat de matrijs een homogene temperatuur heeft.
- **Smelttemperatuur:**
Bij het verhogen of verlagen van de smelttemperatuur, moet er 20 minuten gewacht worden om ervoor te zorgen dat de cilinder homogeen is verwarmd. De eerstvolgende tien samples bij deze instelling worden verwijderd uit de experimentopzet.
- **Nadruk:**
De nadruk verandert onmiddellijk bij de volgende injectie, hierdoor zijn er geen extra maatregelen nodig.
- **Injectiesnelheid:**
De injectiesnelheid verandert net zoals de nadruk onmiddellijk bij de volgende shot. Hierdoor zijn er geen extra maatregelen nodig.

Na het uitvoeren van de experimenten, gebeurt er een resultaatanalyse, waarin de invloed van de parameters gezocht wordt. Binnen deze masterproef zullen we deze meetresultaten invoeren in een statistisch softwarepakket genaamd Minitab. Deze software toont welk effect de parameters hebben op de zichtbaarheid van de vloeilijn.

3 Materiaal- en installatiekeuzes

3.1 Kunststof

Voor het uitvoeren van deze masterproef moet er een kunststof gekozen worden. De gekozen kunststof zal gedurende de volledige masterproef dezelfde zijn, om een correcte vergelijking te maken tussen de verschillende spuitgietmethodes. Ten eerst moet er een keuze gemaakt worden tussen de amorfe – of semi-kristallijne kunststoffen. Hierbij gaat de voorkeur uit naar de amorfe materialen, omdat variotherm spuitgieten de meest gunstige invloed heeft op amorfe materialen. De reden hiervoor is dat semi-kristallijne materialen in een variotherm proces te traag afkoelen zodat het materiaal meer tijd heeft om te kristalliseren en bijgevolg meer krimpt. Het gevolg van deze krimp is meer inval op het product. Bij amorfe materialen is daarentegen minder krimp en dus minder last van inval. Hierdoor zijn amorfe producten eenvoudiger voor de interpretatie van resultaten.

Vervolgens moet er binnen de amorfe kunststoffen een keuze gemaakt worden. Hierbij gaat de voorkeur uit naar polycarbonaat (PC), omdat deze kunststof gevoelig is voor zowel V-inkepingen als interne spanningen [19]. Het effect van de verschillende spuitgietmethodes op deze twee eigenschappen zal vergeleken worden. Op die manier zullen ze een maatstaf vormen voor het vergelijken van de verschillende spuitgietmethodes. De handelsnaam van het gebruikte kunststof is Makrolon 1260 geproduceerd door Covestro (zie bijlage A).

Polycarbonaat is hygroscopisch en trekt dus vocht aan. Water is een polaire verbinding en wordt aangetrokken door de polaire atomen van PC [20]. Dit leidt tot oppervlaktefouten. Om dit te voorkomen moeten de korrels ongeveer twee tot drie uur gedroogd worden aan 70°C tot 100°C vooraleer ze verwerkt kunnen worden.

Enkele eigenschappen van PC zijn [5]:

- Hoge warmtebestendigheid;
- Grote taaiheid;
- Zeer slagvast van -100°C tot 135°C, maar kerfgevoelig;
- Lage kruip;
- Hoge brandbestendigheidsgraad (brandklasse 2);
- Hard en rigide;
- Gevoelig voor *stress cracks* met specifieke chemicaliën.

Glastransitietemperatuur bepalen

Voor het correct uitvoeren van variotherm spuitgieten, moet de matrijstemperatuur voor injectie boven de glastransitietemperatuur van het kunststof liggen, zodat de ketens flexibel blijven. Deze temperatuur kan enerzijds opgezocht worden in de datasheets van het materiaal, maar kan ook zelf bepaald worden met behulp van een *differential scanning calorimetry* of kortweg DSC toestel. Het toestel zal nagaan op welke temperaturen toestandsveranderingen optreden. Een van deze veranderingen duidt de glastransitietemperatuur aan.

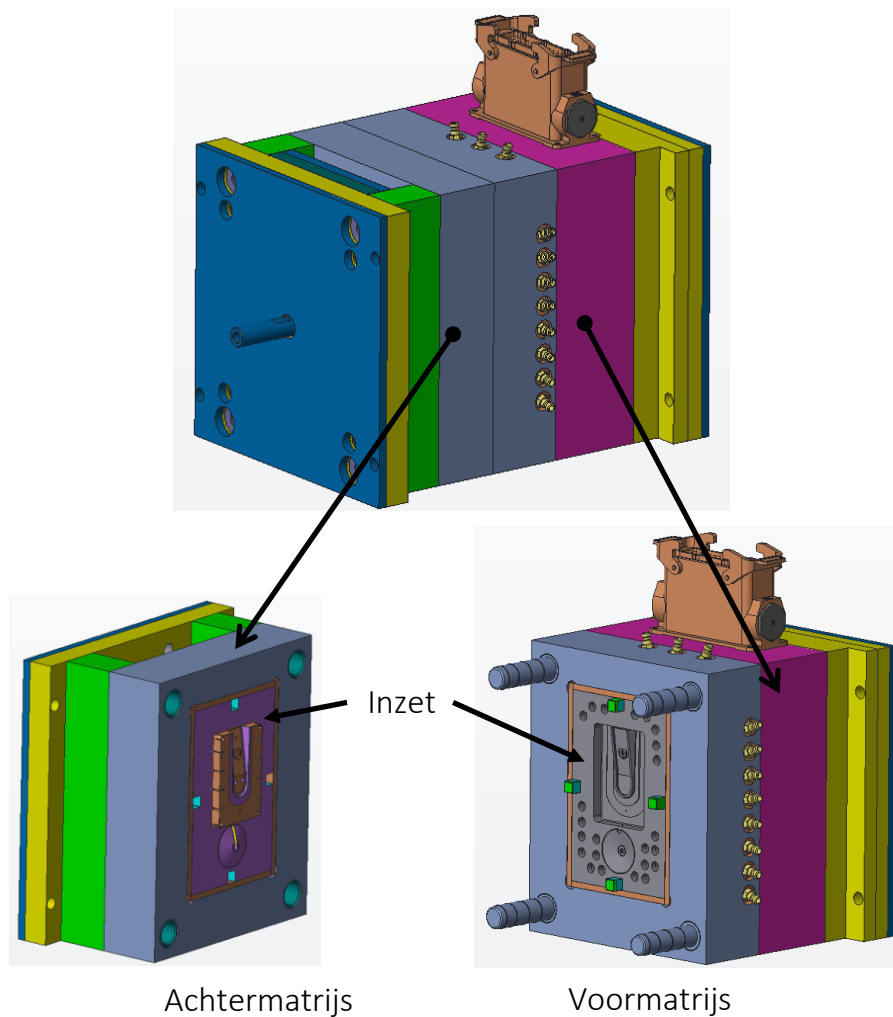
In bijlage A van het kunststof is terug te vinden dat de glastransitietemperatuur 142°C is. Deze waarde gaan we vergelijken met de opgemeten waarde. Bijlage B toont het resultaat van de DSC test. De glastransitietemperatuur gevonden uit de DSC meting bedraagt 141,79°C. Hieruit blijkt dat de gemeten temperatuur goed overeen komt met de waarde uit de datasheet, namelijk 142°C.

3.2 Matrijs

Om een vergelijkende studie uit te voeren, moet er een spuitgietmatrijs gekozen worden. Deze matrijs moet voldoen aan verschillende eisen, namelijk:

- ten eerste moet de matrijs geschikt zijn voor zowel conventionele, variotherm als hybride variotherm spuitgieten;
- ten tweede moet de matrijs een product produceren waarbij een vloeilijn aanwezig is;
- ten derde moet de matrijs voorzien zijn van een temperatuursensor in vormholte.

Cel Kunststoffen beschikt over een matrijs voor visitekaartjeshouders, die voldoet aan deze eisen. Figuur 14 toont de samenstelling van deze matrijs.

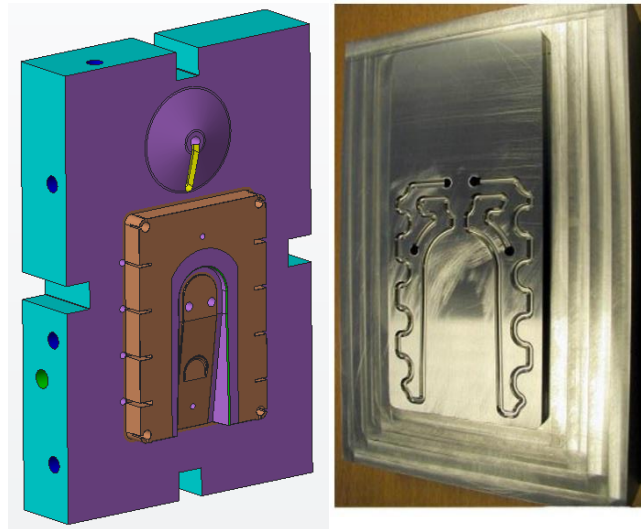


Figuur 14: Samenstelling matrijs

De matrijs bestaat uit 2 grootte delen, namelijk de voor- en achtermatrijs. Zowel voor als achtermatrijs hebben een inzet.

Inzet achtermatrijs

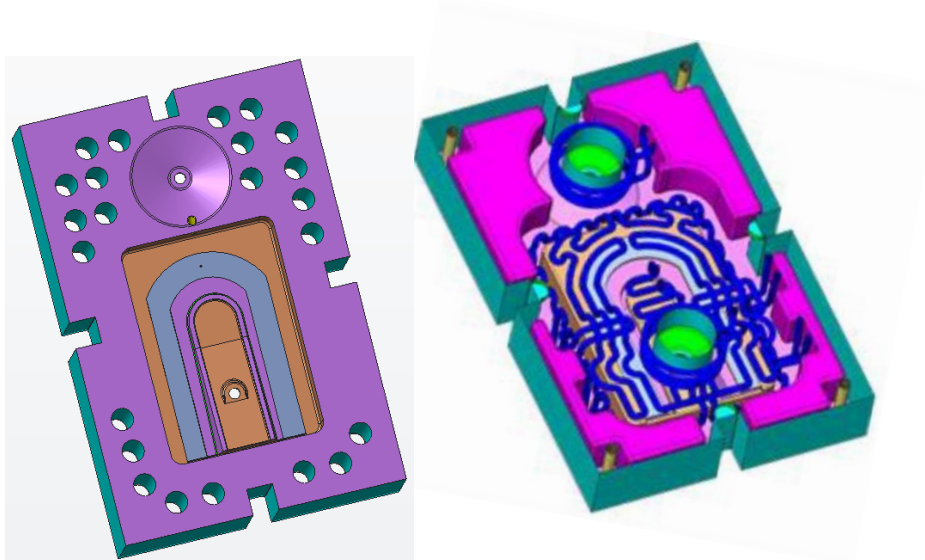
De inzet van de achtermatrijs (zie figuur 15a), is enkel voorzien van waterkoeling. Figuur 15b toont de matrijs tijdens de productie met Selective Laser Melting.



Figuur 15: Inzet achtermatrijs

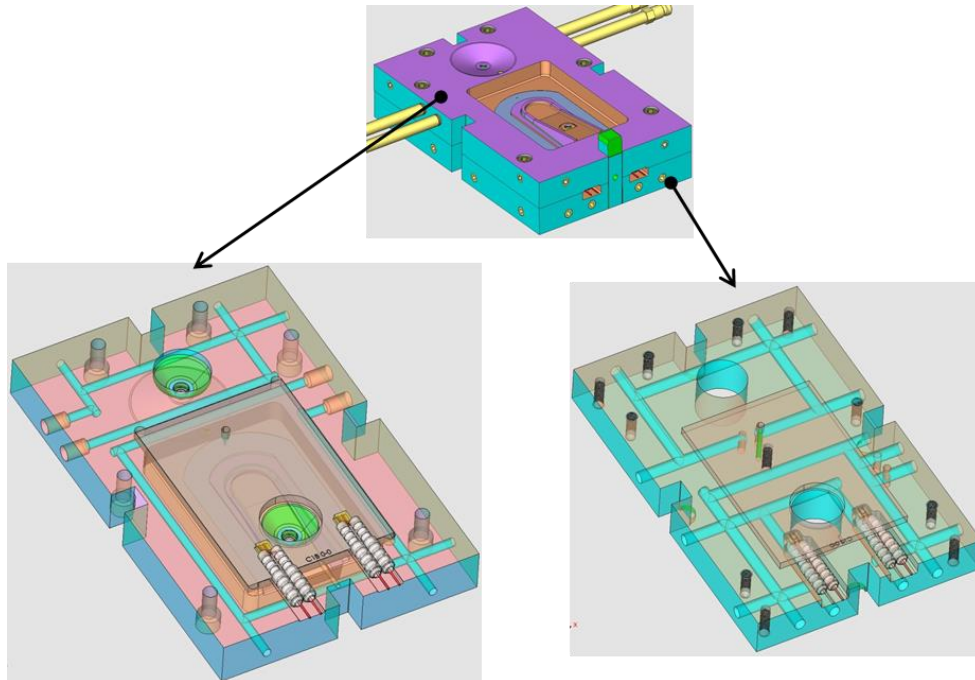
Inzet voormatrijs

Er zijn twee inzetten beschikbaar voor de voormatrijs. De eerste inzet is enkel voorzien van koelkanalen, welke geplaatst werden door middel van Selective Laser Melting. Hierdoor kan de matrijs verwarmd en gekoeld worden met behulp van de koelkanalen. Op deze manier is de matrijs geschikt voor zowel conventioneel als variotherm spuitgieten. Figuur 16 toont de opbouw van de koelkanalen in de eerste inzet.



Figuur 16: Inzet voormatrijs, voor conventioneel en variotherm spuitgieten

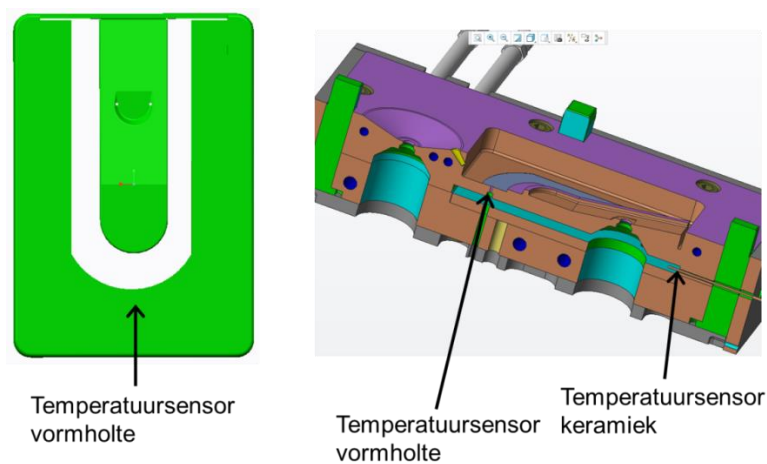
De tweede inzet is voorzien van een elektrisch verwarmingselement in combinatie met koelkanalen. Deze koelkanalen kunnen de matrijs zowel opwarmen als afkoelen. Doordat er een combinatie is van meerdere verwarmingssystemen, kan deze matrijs gebruikt worden voor hybride variotherm spuitgieten.



Figuur 17: Inzet voormatrijs, hybride variotherm spuitgieten [11]

Temperatuursensoren

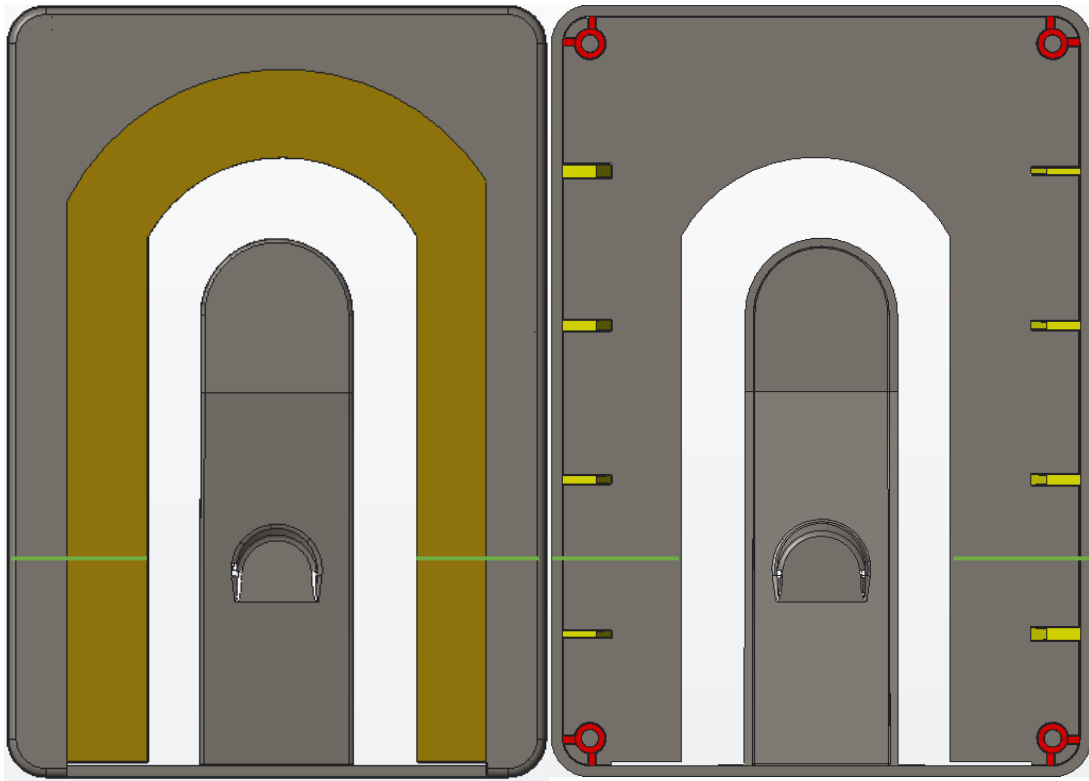
Om het variotherm spuitgietproces af te stellen, moet er een thermokoppel aanwezig zijn, die de temperatuur van de vormholte kan opmeten. Vervolgens moet er ook een temperatuursensor aanwezig zijn, die de temperatuur van de keramiek kan meten. Deze temperatuur is nodig voor de regeling van de keramiek. Figuur 18 toont de positie van de sensoren in de matrijs en op het product.



Figuur 18: Positionering temperatuursensoren in matrijs [11]

Product

Het product dat met behulp van deze matrijs gemaakt wordt is een visitekaartjeshouder. Figuur 19 toont een voor- en achteraanzicht van de visitekaartjeshouder.



Figuur 19: a) Vooraanzicht kaartjeshouder, b) Achteraanzicht kaartjeshouder

De linkerzijde van figuur 19 stelt de voorzijde van de kaartjeshouder voor. Deze zijde bestaat uit twee verschillende oppervlakte structuren, namelijk een mat oppervlak en een glanzend oppervlak. Het oranje oppervlak stelt het glanzend gedeelte voor, het overblijvende grijze oppervlak stelt het matte gedeelte voor.

De rechterzijde van figuur 19 stelt de achterzijde van de kaartjeshouder voor. Deze zijde is voorzien van verstevigingsribben (geel aangeduid op de figuur) en klikverbindingen (rood aangeduid op de figuur).

Tot slot is er een groene lijn zichtbaar op het product. Deze lijn stelt de positie voor waar de kunststof fronten elkaar ontmoeten en de vloeilijn gevormd wordt. De uiteindelijke positie van de vloeilijn is afhankelijk van de hoeveelheid kunststof die geïnjecteerd wordt per aanspuitpunt.

3.3 Spuitgietmachine

Voor het uitvoeren deze masterproef, moet er een spuitgietmachine gekozen worden. Hierbij gaat de voorkeur uit naar de Demag Ergotech, om volgende redenen:

- Volledig elektrische machine, waardoor hij zeer nauwkeurig is.
- Programmeerbare uitgangsrelais waarmee de variotherm-eenheid gestuurd kan worden.

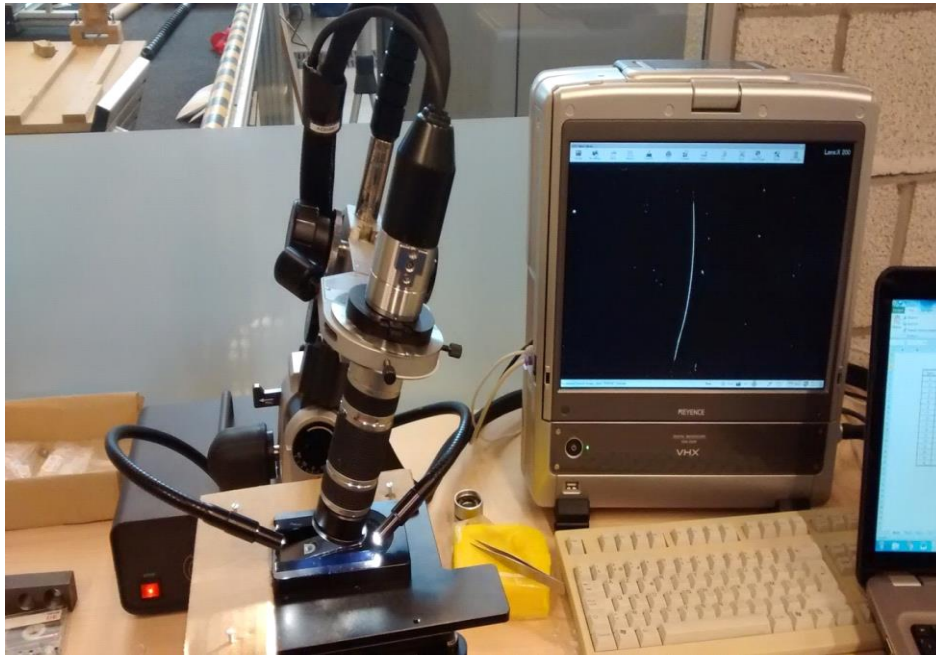
Figuur 20 toont de spuitgietmachine visueel en bijlage B geeft de specificaties ervan weer.



Figuur 20: Demag Ergotech IntElect ET 50/300-100

3.4 Meetopstelling vloeilijnbreedte

Het opmeten van de vloeilijnbreedte gebeurt met een Keyence VHX-500 optische meetmicroscop en een zelfgemaakte vaste aanslag. Deze vaste aanslag maakt het mogelijk eenvoudig samples op te meten onder de zelfde oriëntatie. De visuele opstelling wordt weergegeven in figuur 21.



Figuur 21: Meetopstelling vloeilijnbreedte conventioneel spuitgieten

Zoals in paragraaf 3.2 besproken, bestaat de voorzijde van de kaartjeshouder uit 2 structuren, namelijk een glanzende en matte structuur. De vloeilijn zal voor elk product opgemeten worden aan de voorzijde, op de rechterzijde van de glanzende structuur. Dit omdat het met de microscoop het eenvoudigst is om op de glanzende structuur te meten.

De optische meetmicroscop is verbonden met een computer en een monitor. Deze computer beschikt over software waarmee onder andere afstanden gemeten kunnen worden van het geprojecteerde beeld. Hiervan zal gebruik gemaakt worden voor het opmeten van de verschillende vloeilijnbreedtes. Er wordt in deze opstelling gebruik gemaakt van een parallelle meetmethode. De methode werkt als volgt, ten eerste wordt een punt geselecteerd op het uiterst linkse deel van het object. Vervolgens kiest men een tweede punt wederom op het uiterst linkse punt van het object, maar ditmaal verplaatst over een bepaalde verticale afstand. Op deze manier wordt een lijn gevormd. Tot slot kiest men met een lijn evenwijdig aan de vorige een uiterst recht punt van het object. De software berekend nadien de afstand tussen de lijn en het punt. Figuur 22 toont een voorbeeld van dergelijke meting.



Figuur 22: Meting vloeilijnbreedte met microscoop

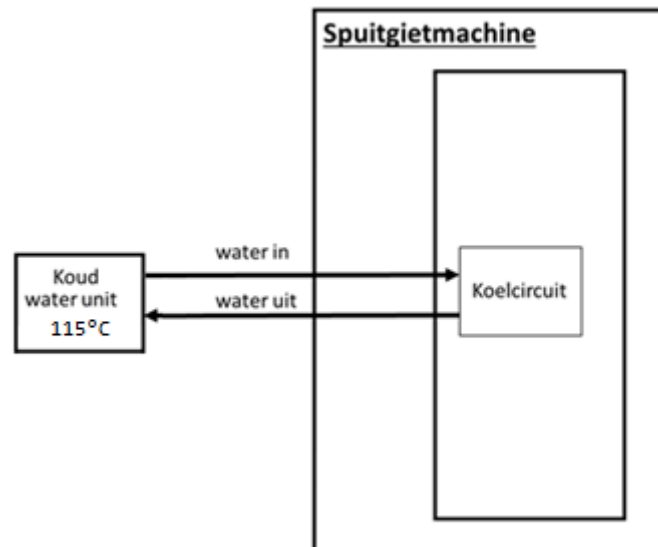
Op figuur 22 is kan men ten eerste de vloeilijn zijn, welke wordt weergegeven door de witte lijn, dit ten gevolge van de lichtinval. Vervolgens kan men links en rechts van de vloeilijn twee blauwe lijnen zien nodig voor het opmeten van de breedte. Rechts bovenaan ziet men de orde van vergroting, in dit geval maal tweehonderd. Verder kan men rechts onderaan in het blauw een liniaal zien, welke gebruikt kan worden als ijkstelsysteem. Links bovenaan kan men het resultaat van de meting aflezen.

4 Experimentele studie, conventioneel spuitgieten

In dit hoofdstuk zal de cyclustijd bepaald worden van conventioneel spuitgieten, bij producten waarbij de vloeilijn minimaal is.

4.1 Procesopbouw

De procesopbouw van het conventioneel spuitgieten wordt in Figuur 23 getoond.



Figuur 23: Procesopbouw conventioneel spuitgieten [11]

Conventioneel spuitgieten is de meest gebruikte en meest eenvoudige spuitgietmethode. Hierbij wordt de matrijs op een constante temperatuur gehouden om zo het product te koelen. Op deze manier kan het kunststof stollen en uitgeworpen worden zonder vervorming. De koeling gebeurt door het koelcircuit van de matrijs aan te sluiten op een koudwater-eenheid. Op deze manier zal er een constant debiet van water door de matrijs stromen.

Voor de koudwater-eenheid wordt beroep gedaan op het temperereapparaat HB-180Z2 van HB-THERM. Deze eenheid heeft een maximale watertemperatuur van 180°C en een maximale debiet van 30l/min. Verdere specificaties zijn gegeven in bijlage C.



Figuur 24: Temperereapparaat HB-THERM

4.2 Procesvenster

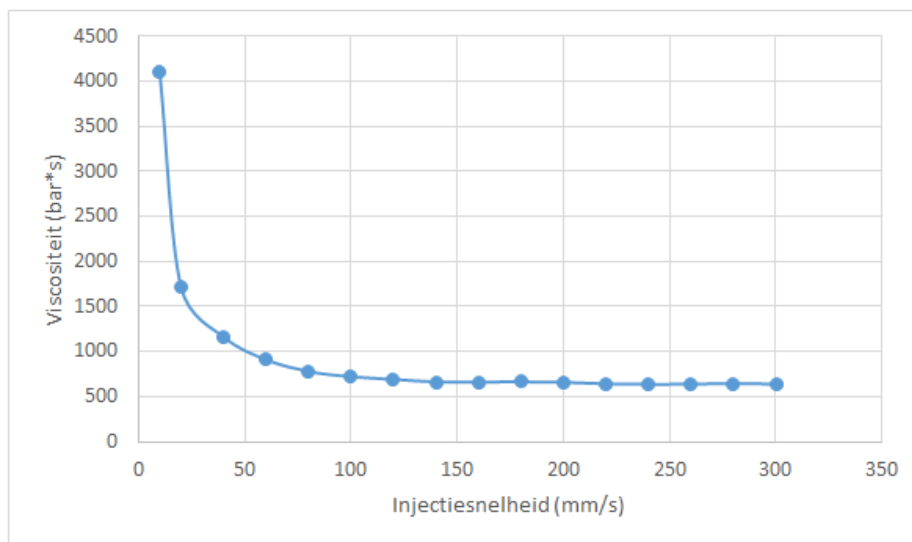
Het opstellen van het procesvenster gebeurt aan de hand van het stappenplan in de literatuurstudie.

Viscositeitscurve:

In de eerste stap wordt de viscositeitscurve opgesteld, om de ideale inspuitnelheid te bepalen. Tabel 4 toont de opgemeten waarden, na uitvoering van het stappenplan. Uit deze waarden wordt de viscositeitscurve van het conventioneel spuitgieten geplot zoals weergegeven in figuur 25.

Tabel 4: Metingen voor het bepalen van viscositeitscurve

Meting	Injectiesnelheid (mm/s)	Piekdruk (Bar)	Injectietijd (s)	Drukverhouding	Viscositeit (Bar*s)
1	300	1730	0,37	1	640,1
2	280	1747	0,37	1	646,39
3	260	1728	0,37	1	639,36
4	240	1720	0,37	1	636,4
5	220	1738	0,37	1	643,06
6	200	1782	0,37	1	659,34
7	180	1799	0,37	1	665,63
8	160	1744	0,38	1	662,72
9	140	1661	0,4	1	664,4
10	120	1574	0,44	1	692,56
11	100	1474	0,49	1	722,26
12	80	1370	0,57	1	780,9
13	60	1284	0,71	1	911,64
14	40	1142	1,02	1	1164,84
15	20	900	1,91	1	1719
16	10	1083	3,79	1	4104,57



Figuur 25: Viscositeitscurve

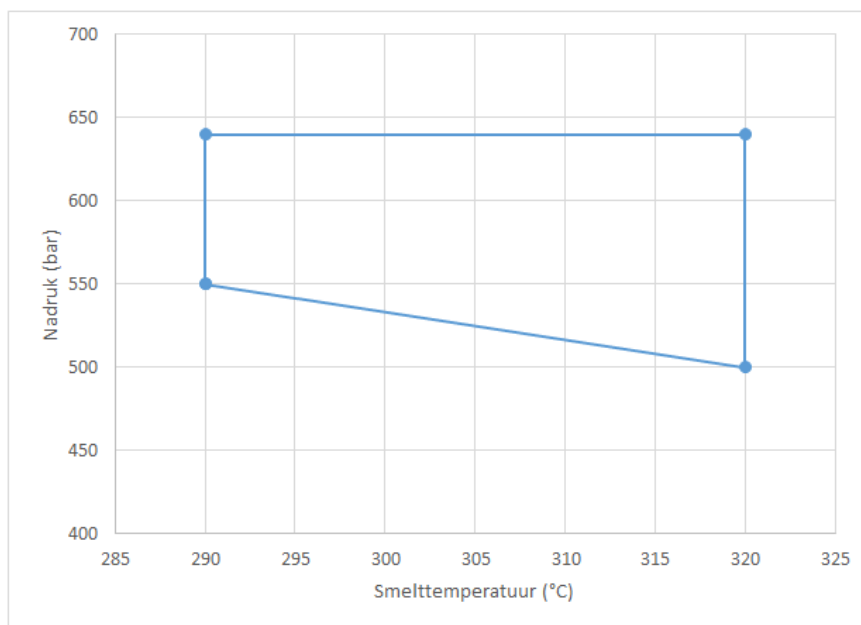
Uit figuur 25 blijkt dat de viscositeit nagenoeg constant blijft boven een injectiesnelheid van ongeveer 200 mm/s. Hierdoor nemen we voor de injectiesnelheid als boven en ondergrens respectievelijk **200 mm/s** en **300 mm/s**.

Procesvenster:

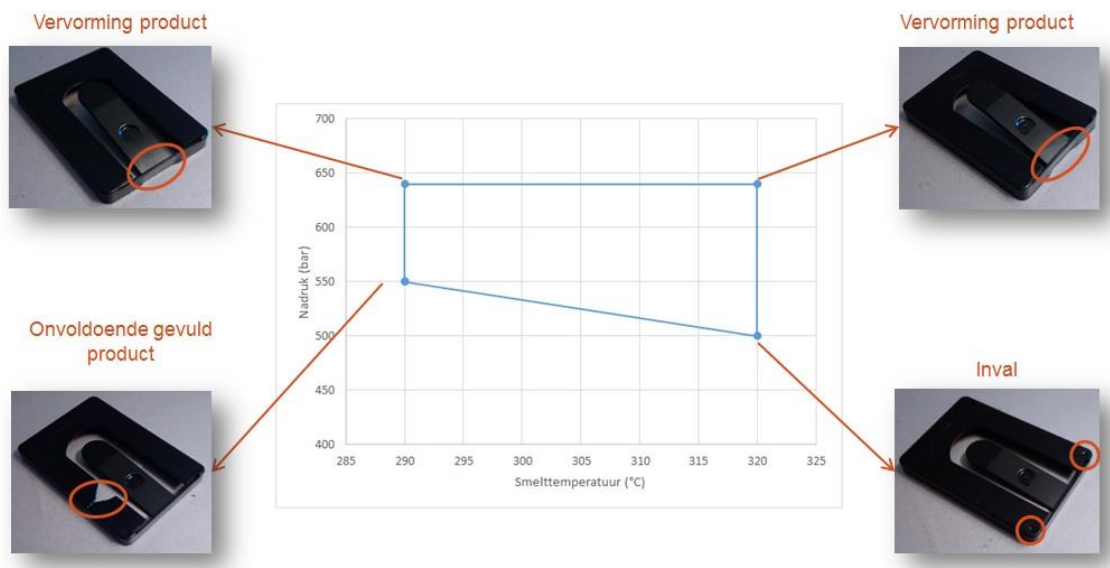
In de tweede stap wordt het procesvenster opgesteld. Tabel 5 toont de opgemeten waarden, na uitvoering van het stappenplan. Uit deze waarden wordt de viscositeitscurve van het conventioneel spuitgieten geplot zoals weergegeven in figuur 26.

Tabel 5: Ingestelde- en bekomen parameters voor het conventioneel procesvenster

Opstellen procesvenster					
Ingestelde parameters			Bekomen parameters		
Matrijstemperatuur	°C	115	Lage druk	Lage temperatuur	Hoge temperatuur
Doseerlengte	mm	45		550 bar	500 bar
Injectiesnelheid	mm/s	250	Hoge druk	640 bar	640 bar
Lage smelttemperatuur	°C	290			
Hoge smelttemperatuur	°C	320			



Figuur 26: Procesvenster conventioneel spuitgieten



Figuur 27: Procesvenster conventioneel spuitgieten

4.3 Design of Experiments

Het doel van deze DoE-analyse is om de invloed van gekozen parameters, op de zichtbaarheid van de vloeilijn te kennen. Zo kunnen we bepalen op welke manier de parameters ingesteld moeten worden voor een minimale zichtbaarheid van de vloeilijn.

4.3.1. DoE parametermatrix

In deze masterproef is gekozen voor 4 parameters, namelijk:

- **Matrijstemperatuur:**
De matrijstemperatuur moet volgens de producent van de kunststof ingesteld worden in een range van 90-115°C. Uit literatuur blijkt dat een hogere matrijstemperatuur de vloeilijn positief beïnvloed, hierdoor kiezen we een temperatuur van **100°C** en **115°C**.
- **Smelttemperatuur:**
Deze smelttemperatuur wordt gekozen a.d.h.v. de datasheet van het kunststof, namelijk **290°C** en **320°C**.
- **Nadruk:**
De derde gekozen parameter is de nadruk, deze is rechtstreeks afhankelijk van het procesvenster. Hierbij vinden we een nadruk van **640 bar** en **550 bar**.
- **Injectiesnelheid**
De laatste gekozen parameters is de injectiesnelheid. Volgens de literatuur zal een toename van injectiesnelheid zorgen voor lagere viscositeit, waardoor de binding van de vloeifronten sterker wordt. Hierdoor zal de zichtbaarheid van de vloeilijn dalen. Hierdoor stellen we de range van injectiesnelheid in op een hoge waarde, namelijk **200 mm/s** en **300mm/s**.

Zo vinden we voor elk de vier parameters een hoge en een lage waarde. Deze zijn terug te vinden in Tabel 6.

Tabel 6: DoE-analyse parameters met waardes bij conventioneel spuitgieten

Parameters DOE-analyse			
Parameter	Eenheid	Lage waarde (L)	Hoge waarde (H)
Matrijstemperatuur	°C	100	115
Smelttemperatuur	°C	290	320
Nadruk	bar	550	640
Injectiesnelheid	mm/s	200	300

We hebben 4 parameters met elk twee mogelijke waardes. Dit resulteert in een 2⁴ design matrix, welk weergegeven is in tabel 7.

Tabel 7: DoE-matrix conventioneel spuitgieten

DOE Design Matrix				
Nr.	Matrijstemperatuur	Smelttemperatuur	Nadruk	Injectiesnelheid
1	100	290	550	200
2	115	290	550	200
3	100	320	550	200
4	115	320	550	200
5	100	320	640	200
6	115	290	640	200
7	100	320	640	200
8	115	320	640	200
9	100	290	550	300
10	115	290	550	300
11	100	320	550	300
12	115	320	550	300
13	100	290	640	300
14	115	290	640	300
15	100	320	640	300
16	115	320	640	300

4.3.2. Resultaatanalyse

Eens voor alle zestien instellingen vijf samples gemaakt zijn, kunnen de resultaten geanalyseerd worden. Voor deze analyse zullen we de vloeilijnbreedte (maat voor de zichtbaarheid van de vloeilijn) van elk sample individueel opmeten. Tabel 8 toont de vloeilijnbreedte van elk individueel sample opgemeten zoals beschreven in paragraaf 3.4.

Tabel 8: Meetresultaten vloeilijnbreedte conventioneel spuitgieten.

Vloeilijn [μm]	Herhaling 1	Herhaling 2	Herhaling 3	Herhaling 4	Herhaling 5	Gemiddelde
Instelling 1	11,85	12,82	10,88	10,86	11,00	11,48
Instelling 2	9,89	10,87	10,93	10,89	10,84	10,68
Instelling 3	7,89	8,88	8,73	9,81	6,71	8,40
Instelling 4	12,96	8,89	11,97	12,86	10,17	11,67
Instelling 5	8,90	8,90	7,90	8,91	8,98	8,72
Instelling 6	12,87	10,60	12,32	10,88	9,97	11,33
Instelling 7	9,02	6,92	8,90	7,92	8,91	8,33
Instelling 8	14,87	11,91	11,88	12,87	9,90	12,29
Instelling 9	9,87	11,84	11,29	11,03	7,90	10,39
Instelling 10	10,83	9,88	10,87	8,90	9,88	10,07
Instelling 11	8,89	8,82	9,98	8,90	9,32	9,18
Instelling 12	11,88	12,89	10,89	8,91	10,21	10,96
Instelling 13	12,81	7,95	8,90	8,96	11,88	10,10
Instelling 14	10,85	7,95	10,89	10,89	10,94	10,30
Instelling 15	6,92	7,18	6,74	6,81	7,92	7,11
Instelling 16	9,89	12,88	9,90	11,86	10,11	10,93

Analyse m.b.v. een statistisch softwarepakket

Het softwarepakket Minitab wordt gebruikt om het effect van de parameters op de vloeilijn te analyseren. We voeren voor elk sample zowel de gebruikte parameterinstellingen in als de breedte van de vloeilijn. Vervolgens verwerkte het softwarepakket deze gegevens tot tabel 9.

Tabel 9: Effect van parameters op vloeilijn bij conventioneel spuitgieten

Parameters	Effect	P
nadruk	-1,8515	0,000
matrijstemperatuur	-0,6380	0,029
massatemperatuur	-0,5035	0,083
injectiesnelheid	-0,5210	0,073
nadruk · matrijstemperatuur	-1,4260	0,000
nadruk · massatemperatuur	-0,9445	0,002
nadruk · injectiesnelheid	0,3310	0,251
matrijstemperatuur · massatemperatuur	0,0400	0,889
matrijstemperatuur · injectiesnelheid	-0,1835	0,523
massatemperatuur · injectiesnelheid	-0,1850	0,520
nadruk · matrijstemperatuur · massatemperatuur	0,0370	0,897
nadruk · matrijstemperatuur · injectiesnelheid	-0,1495	0,603
nadruk · massatemperatuur · injectiesnelheid	0,1540	0,592
matrijstemperatuur · massatemperatuur · injectiesnelheid	-0,7015	0,017
nadruk · matrijstemperatuur · massatemperatuur · injectiesnelheid	-0,5685	0,051

In tabel 9 zien we ten eerste de parameters. Hierin staan alle mogelijke parameters en gecombineerde parameters weergegeven. Ten tweede zien we het effect. Dit geeft aan hoe groot het effect van de parameter is op de vloeilijnbreedte. Tot slot zien we P. Deze P-waarde geeft weer of de nulhypothese, die stelt dat het effect van de betreffende parameter nul is, verworpen of aanvaard moet worden. [24]. Indien deze P waarde kleiner is dan de gekozen significantiegrens van 5%, kunnen we spreken van een significante effect van de parameter.

Er zijn vier termen die een significante uitkomst hebben. Deze termen zijn groen gearceerd in tabel 9. Wanneer we vervolgens kijken naar de effecten van deze termen valt meteen op dat elk effect negatief is. Dit wil zeggen dat wanneer de parameter een hogere waarde heeft, de vloeilijnbreedte negatief beïnvloed wordt of kleiner is.

Besluit

Wanneer we tabel 9 analyseren, zien we ten eerste dat bij conventioneel spuitgieten de nadruk het grootste effect heeft op de vloeilijnbreedte, gevolgd door de matrijstemperatuur. Verder zien we dat een gecombineerd effect van alle parameters behalve de nadruk, een verkleining van de vloeilijnbreedte als gevolg heeft. Hieruit kunnen we besluiten in volgorde van belangrijkheid, dat:

- de nadruk ingesteld moet worden op een zo hoog mogelijke waarde
- de matrijstemperatuur ingesteld moet worden op een zo hoog mogelijke waarde;
- de injectiesnelheid en massatemperatuur ingesteld moet worden op een zo hoog mogelijke waarde;

4.4 Cyclustijd

In de vorige paragraaf hebben we bepaald welke invloed de parameters hebben op de breedte van de vloeilijn. Vanuit deze gegevens gaan we het conventioneel proces afstellen, zodat we de optimale procesparameters vinden voor een minimale vloeilijn. De procesparameters worden ingesteld als volgt:

- Als eerste stellen we de **nadruk** in op de maximale waarde bepaald uit het procesvenster, namelijk **640bar**. Indien we een waarde hoger zouden kiezen, zou er braamvorming ontstaan op het product.
- Ten tweede verhogen we de **matrijstemperatuur** tot net onder zijn bovengrens. Deze grens stelt de temperatuur voor waarbij het product vervormd ten gevolge van de uitstoters. Bij conventioneel spuitgieten ligt deze grens rond de **120°C**, daarom wordt de matrijstemperatuur gekozen op **117°C**.
- Ten derde moet de **smelttemperatuur** ingesteld worden op een zo hoog mogelijk waarde. We stellen de temperatuur in op de maximale smelttemperatuur aangeraden door de fabrikant van het kunststof, namelijk **320°C**.
- Ten vierde moet de **injectiesnelheid** zo hoog mogelijk ingesteld worden. Hierbij kiezen we de maximale snelheid die de machine toelaat, namelijk **300mm/s**.
- Tot slot wordt de doseerlengte ingesteld op **48 mm**.

Eens deze parameterinstellingen bepaald zijn, moet de koeltijd en nadruktijd ingesteld worden. Deze tijden worden als volgt bepaald:

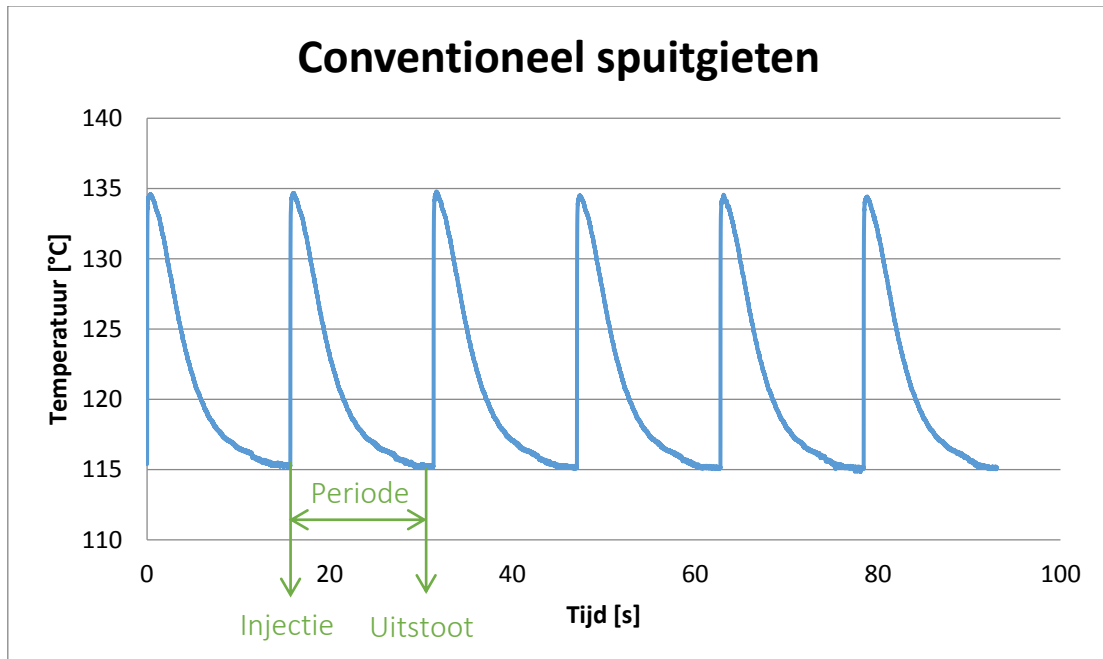
- De **nadruktijd** geeft de tijd weer hoelang de nadruk aangehouden wordt. Deze tijd wordt proefondervindelijk bepaald, door de nadruktijd stapsgewijs te laten dalen en de massa van de overeenkomstige producten te wegen. Eens de massa van het product daalt, weet men dat de nadruktijd te kort is. Bij dit proces begint de massa van het product te dalen rond de 3 seconden. Hierdoor kiezen we een veilige waarde van **4s**.
- De **koeltijd** vindt plaats tussen het nadrukken en het effectief uitwerpen van het product. Deze tijd wordt proefondervindelijk bepaald, door de koeltijd stapsgewijs te laten dalen en het product te evalueren op vervorming. Wanneer het product vervormd, weet men dat de nadruktijd te kort is. De grens bij dit proces ligt rond de 5,5 seconden. Hierdoor kiezen we een veilige waarde van **6,5s**.

Tabel 10 geeft een samenvatting van de optimale parameters.

Tabel 10: Optimale parameters voor minimale vloeilijnbreedte bij conventioneel spuitgieten

Optimale parameters		
Matrijstemperatuur	°C	117
Injectiesnelheid	mm/s	300
Smelttemperatuur	°C	320
Nadruk	bar	640
Doseerlengte	mm	4
Nadruktijd	s	4
Koeltijd	s	6,5

Wanneer we de optimale parameters uit tabel 10 ingeven in de spuitgietmachine, vinden we de cyclustijd van conventioneel spuitgieten, bij een minimale zichtbaarheid van de vloeilijn. Op deze manier is de **cyclustijd** van het conventioneel spuitgieten gelijk aan **15,7** seconden. Onderstaande grafiek toont het verloop van zes spuitgietcycli over een tijd van 95seconden, opgemeten met een thermokoppel in de matrijsholte (zie paragraaf 3.2).



Figuur 28: Verloop spuitgietcyclus conventioneel spuitgieten

Telkens een injectie optreedt kan men een plotse stijgen zien in het temperatuurverloop. Dit doordat de kunststof met een temperatuur van 320°C in de matrijs wordt geïnjecteerd. Vervolgens kan men een dalend verloop zien, doordat de kunststof gekoeld wordt. Deze daling gaat naar de matrijstemperatuur, namelijk 117°C.

Tot slot gaan we de samples gemaakt bij deze instellingen evalueren. Voor elk sample wordt op identieke manier de vloeilijnbreedte opgemeten zoals in paragraaf 4.3.3. Op deze manier kunnen we controleren of de optimale parameters wel degelijk een minimale vloeilijn hebben. Tabel 11 toont tien samples waarbij de vloeilijnbreedte is opgemeten.

Tabel 11: Vloeilijnbreedte bij optimale parameters van conventioneel spuitgieten

Sample nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vloeilijnbreedte [μm]	5,94	6,43	6,19	5,92	6,95	5,94	5,88	6,19	5,93	5,91
Gemiddelde	6,13									

Van deze tien instellingen kunnen we een gemiddelde bepalen van 6,13 μm . Uit tabel 8 vinden we een minimaal gemiddelde van 7,11 μm , welk boven het gemiddelde ligt bij de optimale parameters, namelijk 6,13 μm . Hieruit kunnen we besluiten dat de DoE analyse correct is uitgevoerd, en de optimale parameters een minimale vloeilijn als gevolg hebben.

Besluit

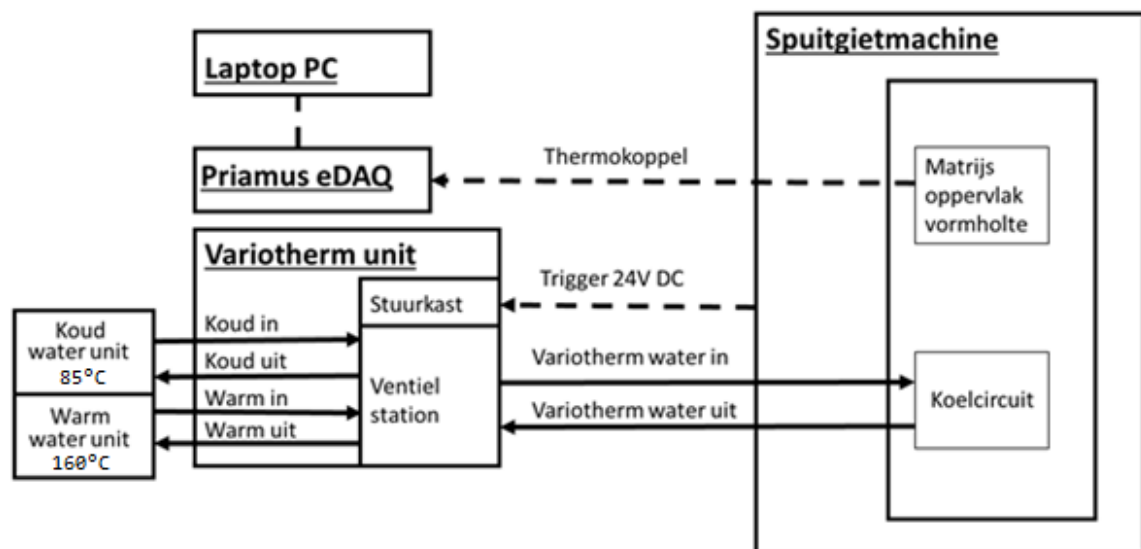
We kunnen besluiten dat conventioneel spuitgieten een vrij eenvoudige spuitgiettechniek is met een compacte procesopbouw. Met behulp van deze techniek, kunnen kunststof kaartjeshouders gemaakt worden met bijhorende een cyclustijd van 15,7 seconden. De vloeilijn in dit product zal bij conventioneel spuitgieten echter steeds aanwezig zijn.

5 Experimentele studie, variotherm

In dit hoofdstuk zal de cyclustijd bepaald worden van variotherm spuitgieten, bij producten waarbij de vloeilijn minimaal is. Binnen variotherm spuitgieten, wordt de conventionele spuitgiettechniek uitgebreid met een variotherm eenheid. Met behulp van deze eenheid, tracht men de vloeilijn op het product te verminderen of verwijderen.

5.1 Procesopbouw

De procesopbouw van het variotherm spuitgieten wordt in Figuur 29 getoond.



Figuur 29: Procesopbouw variotherm spuitgieten [11]

In de visitekaartjeshoudermatrijs, zit een thermokoppel die de temperatuur van het oppervlak van de vormholte meet, zie paragraaf 3.2 voor de ligging van deze sensor. Het signaal van dit thermokoppel zal verstuurd worden naar de Priamus eDAQ 81202. Dit toestel zal het signaal omvormen en doorsturen naar een laptop. Op deze manier kan op de laptop de temperatuur van de vormholte gemonitord worden, om zo het variotherm proces af te stellen.

In een variotherm spuitgietproces, moet de matrijstemperatuur geregeld worden naargelang de processtap. Om deze regeling te verkrijgen hebben we een variotherm eenheid nodig. Deze eenheid bestaat uit een stuurkast met ventielstation dat de stromen van warm en koud water naar de matrijs regelt. Deze stromen zijn afkomstig van een koud en warmwater-eenheid. Voor de koudwater-eenheid wordt beroep gedaan op het temperereerapparaat HB-180Z2 met een maximaal debiet gelijk aan 30 l/min. Voor de warm-watereenheid wordt beroep gedaan op het temperereerapparaat HB-180Z3 met een maximaal debiet gelijk aan 50 l/min. Beide apparaten hebben een maximale temperatuur gelijk aan 180°C (voor meer specificaties zie bijlage C). We kiezen een temperereerapparaat met een hoog debiet voor de warmwater-eenheid. Dit omdat het opwarmen in een variotherm cyclus meer tijd kost dat het koelen. Doordat het debiet hoger is, kan de matrijs sneller opwarmen en wordt op deze manier de totale cyclustijd van het spuitgietproces korter.

De variotherm eenheid moet synchroon werken met de spuitgietmachine. De eenheid moet namelijk op het juiste moment het warm en koud water ventiel aansturen. Deze synchrone koppeling verkrijgen we door de stuurkast van de variotherm eenheid te verbinden met een relais van de spuitgietmachine. Het tijdstip waarop het contact van de relais moet sluiten, kan op de spuitgietmachine zelf gekozen worden. Op deze manier kunnen we een triggersignaal geven aan de stuurkast van de variotherm eenheid zodat het warm- of koud water ventiel aangestuurd wordt. Bij deze opstelling wordt gekozen voor het aansturen van het koud water ventiel.

Bij het opbouwen van de matrijs en aansluiten van de koelleidingen moeten de koelleidingen zo kort mogelijk worden gekozen. Want hoe langer de leidingen, hoe groter de dode tijd.

Proces initialisatie

Vooraleer er een procesvenster bepaald kan worden voor de variotherm techniek, moet het totale proces eerst geïnitieerd worden. Hierbij zal een synchrone connectie voorzien worden tussen de spuitgietmachine en de variotherm eenheid. Op welke manier dit gebeurt, varieert voor elke proces, omdat elk proces steeds een andere opbouw heeft (zie paragraaf 5.1). Om deze reden is er zelf een proces initialisatie opgesteld, welke in de toekomst opnieuw gebruikt kan worden voor dit proces.

De proces initialisatie is opgesteld in de vorm van een stappenplan en is terug te vinden in **bijlage D**. Op deze manier kan men in de toekomst het proces eenvoudig en steeds op dezelfde manier initialiseren.

5.2 Procesvenster

In deze paragraaf gaan we een procesvenster opstellen. Het procesvenster van het conventioneel gedeelte is voor variotherm spuitgieten niet geschikt, omdat het geen rekening houdt met de variotherm eenheid. In tegenstelling tot het conventioneel procesvenster, bestaat dit maar uit één stap in plaats van twee. We gaan hierbij namelijk geen viscositeitscurve opstellen, omdat de injectiesnelheid bij dit deel enkel bepaald zal worden met behulp van de DoE analyse.

Opstellen van het procesvenster

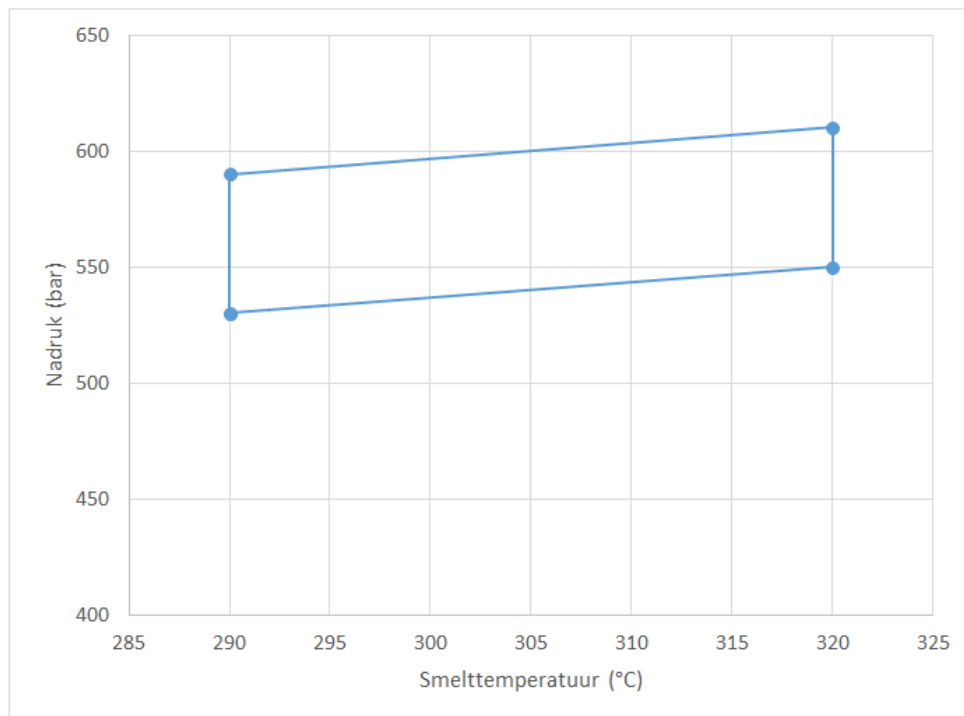
Het opstellen van het procesvenster gebeurt aan de hand van het stappenplan in de literatuurstudie. Hierbij moeten we enkel opletten dat:

- De injectietemperatuur of bovenste temperatuurgrens van de matrijs, moet een temperatuur hebben boven de glastransitietemperatuur, namelijk **145°C**.
- De doseerlengte wordt ingesteld op de waarde bepaald uit de procesinitialisatie, namelijk **53mm**. Bij deze dosering is het product voor 100% gevuld. Dit in tegenstelling tot conventioneel spuitgieten, waarbij de doseerlengte geregeld wordt tot 95%. Het gevolg hiervan is dat de vloeifronten elkaar reeds hebben ontmoet voor de nadruk. Hierdoor vormt de vloeilijn al voordat de nadruk begint [11].

Tabel 12 en figuur 30 geven de gevonden parameters met bijhorend procesvenster.

Tabel 12: Ingestelde- en bekomen parameters voor het variotherm procesvenster

Opstellen procesvenster					
Ingestelde parameters			Bekomen parameters		
Bovengrens matrijstemperatuur	°C	145		Lage temperatuur	Hoge temperatuur
Doseerlengte	mm	53	Lage druk	530 bar	550 bar
Injectiesnelheid	mm/s	150			
Lage smelttemperatuur	°C	290	Hoge druk	590 bar	610 bar
Hoge smelttemperatuur	°C	320			



Figuur 30: Procesvenster variotherm spuitgieten

Tijdens het opstellen van het procesvenster, viel meteen op dat de vloeilijn op het glanzend gedeelte van de producten, nooit volledig verwijderd was. Hieruit is besloten om wederom een DoE matrix opstellen. Op deze manier kunnen de procesparameters bepaald worden waarbij de zichtbaarheid van de vloeilijn op het glanzend gedeelte minimaal is.

5.3 Design of Experiments

Het doel van deze DoE-analyse is om de invloed van gekozen parameters, op de zichtbaarheid van de vloeilijn te kennen. Zo kunnen we bepalen op welke manier de parameters ingesteld moeten worden voor een minimale zichtbaarheid van de vloeilijn.

5.3.1. DoE parametermatrix

Aan de basis van een DoE-analyse staat wederom een parametermatrix. Hierin worden een aantal parameters gekozen, welke invloed hebben op gewenst effect. Deze parameters zijn:

- **Matrijstemperatuur:**
Omdat de matrijstemperatuur bij variotherm spuitgieten varieert, definiëren we hier de matrijstemperatuur als de temperatuur bij injectie. Beide temperaturen moeten boven de glastransitietemperatuur van het kunststof liggen, namelijk 142°C. Dit geeft een matrijstemperatuur bij injectie van **145°C** en **160°C**.
- **Smelttemperatuur:**
Deze smelttemperatuur wordt gekozen a.d.h.v. de datasheet van het kunststof, namelijk **290°C** en **320°C**.
- **Nadruk:**
De derde gekozen parameter is de nadruk, deze is rechtstreeks afhankelijk van het procesvenster. Hierbij vinden we een nadruk van **550 bar** en **590 bar**.
- **Injectiesnelheid**
De laatste gekozen parameters is de injectiesnelheid. Bij het opstellen van het procesvenster viel meteen op dat een lagere injectiesnelheid een lagere zichtbaarheid had dan een hoge injectiesnelheid. Om deze reden is er gekozen voor twee lagere waardes is de parametersmatrix, namelijk **50 mm/s** en **100 mm/s**.

Het procesvenster dat we bepaald hebben, in combinatie met de datasheet van PC zorgen ervoor dat elk van de vier parameters een range hebben, deze zijn terug te vinden in Tabel 13.

Tabel 13: DoE-analyse parameters met waardes bij variotherm spuitgieten

Parameters DOE-analyse			
Parameter	Eenheid	Lage waarde (L)	Hoge waarde (H)
Matrijstemperatuur	°C	145	160
Smelttemperatuur	°C	290	320
Nadruk	bar	550	590
Injectiesnelheid	mm/s	50	100

We hebben 4 parameters met elk twee mogelijke waardes. Dit resulteert in een 2⁴ design matrix, welke ingevuld weergegeven is in tabel 14.

Tabel 14: DoE-matrix ingevuld variotherm spuitgieten

DOE Design Matrix				
	Matrijstemperatuur	Smelttemperatuur	Nadruk	Injectiesnelheid
Instelling 1	145	290	550	50
Instelling 2	160	290	550	50
Instelling 3	145	320	550	50
Instelling 4	160	320	550	50
Instelling 5	145	320	590	50
Instelling 6	160	290	590	50
Instelling 7	145	320	590	50
Instelling 8	160	320	590	50
Instelling 9	145	290	550	100
Instelling 10	160	290	550	100
Instelling 11	145	320	550	100
Instelling 12	160	320	550	100
Instelling 13	145	290	590	100
Instelling 14	160	290	590	100
Instelling 15	145	320	590	100
Instelling 16	160	320	590	100

5.3.2. Resultaatanalyse

Eens voor alle zestien instellingen vijf samples gemaakt zijn, kunnen de resultaten geanalyseerd worden. Voor deze analyse zullen we de vloeilijnbreedte (maat voor de zichtbaarheid van de vloeilijn) van elk sample individueel opmeten.

Meetopstelling

Vooraf was het gedacht om de meetopstelling te gebruiken zoals in paragraaf 3.4 besproken. Maar tijdens het opmeten, bleek echter dat de vloeilijnbreedte te klein was om precies op te meten met de microscoop. Uit visuele controle van de samples bleek echter dat de vloeilijn op het matte gedeelte bij sommige producten volledig verwijderd was. Figuur 31 toont het verschil tussen een product met of zonder vloeilijn op het matte gedeelte.



Figuur 31: Verschil met of zonder vloeilijn op het matte gedeelte

Op de linkse figuur is de vloeilijn nog aanwezig op het matte gedeelte. Op de rechtse figuur is de vloeilijn verwijderd op het matte gedeelte. Door een onderverdeling te maken in samples met en zonder vloeilijn op het matte gedeelte, kunnen we de parameterinstellingen alsnog beoordelen op basis van de vloeilijn zichtbaarheid.

Meetresultaten

Elk sample wordt individueel gecontroleerd op aanwezigheid van vloeilijn op het matte gedeelte. Hieruit blijkt dat de samples binnen éénzelfde instelling, steeds de zelfde aanwezigheid op basis van vloeilijn hebben. Hierdoor kunnen we eenvoudig bepalen wat het effect van de parameter is ten opzichte van de vloeilijn.

Tabel 15 toont de instellingen waarbij de vloeilijn verwijderd is op het matte gedeelte met een groene arcering.

Tabel 15: Instellingen waarbij vloeilijn verwijderd is op mat gedeelte

DOE Design Matrix				
	Matrijstemperatuur	Smelttemperatuur	Nadruk	Injectiesnelheid
Instelling 1	145	290	550	50
Instelling 2	160	290	550	50
Instelling 3	145	320	550	50
Instelling 4	160	320	550	50
Instelling 5	145	320	590	50
Instelling 6	160	290	590	50
Instelling 7	145	320	590	50
Instelling 8	160	320	590	50
Instelling 9	145	290	550	100
Instelling 10	160	290	550	100
Instelling 11	145	320	550	100
Instelling 12	160	320	550	100
Instelling 13	145	290	590	100
Instelling 14	160	290	590	100
Instelling 15	145	320	590	100
Instelling 16	160	320	590	100

Uit tabel 15 kunnen we zien dat bij instelling 2,4,6 en 8 de vloeilijn volledig verwijderd is op het matte gedeelte. Indien we kijken naar de parameters bij deze vier instellingen, kunnen we zien dat beide een lage injectiesnelheid en matrijstemperatuur gemeenschappelijk hebben.

Besluit

Uit de DoE analyse blijkt dat bij variotherm spuitgieten de zichtbaarheid van de vloeilijn afhankelijk is van de matrijstemperatuur en injectiesnelheid. Indien de matrijstemperatuur ingesteld worden op een hoge waarde en de injectiesnelheid ingesteld wordt op een lage waarde, wordt de zichtbaarheid van de vloeilijn positief beïnvloed. Hieruit kunnen we besluiten dat we de injectiesnelheid zo laag mogelijk moeten instellen, en de matrijstemperatuur zo hoog mogelijk moeten instellen. Verder hebben de nadruk en smelttemperatuur weinig tot geen invloed op de zichtbaarheid van de vloeilijn.

5.4 Cyclustijd

In de vorige paragraaf hebben we bepaald welke invloed de parameters hebben op de breedte van de vloeilijn. Vanuit deze gegevens gaan we het variotherm proces afstellen, zodat we de optimale procesparameters vinden voor een minimale vloeilijn. De procesparameters worden als volgt bepaald:

- Als eerste stellen de **smelttemperatuur** in. Deze heeft volgens de DoE analyse geen invloed op de vloeilijn. Hierdoor stellen de temperatuur in op een waarde aangeraden door de fabrikant van het kunststof, namelijk **320°C**.
- Ten tweede moet de **nadruk** ingesteld worden. Ook deze parameter heeft volgens de DoE analyse geen invloed op de vloeilijn. Hierdoor stellen de nadruk in op een waarde waarbij er visueel goede producten gemaakt worden, namelijk **590 bar**.
- Ten derde stellen we de **injectiesnelheid** in. Deze parameter heeft volgens de DoE analyse een positieve invloed op de vloeilijn bij een lage injectiesnelheid. Hierdoor wordt de injectiesnelheid stapsgewijs verlaagd. Dit tot op het punt waarbij het product niet volledig gevuld is of inval vertoont. We kiezen een de injectiesnelheid net boven deze waarde, namelijk **40 mm/s**.
- Tot vierde moet de **matrijstemperatuur** zo hoog mogelijk ingesteld worden. Hiervoor laten we de matrijstemperatuur bij injectie, stapsgewijs verhogen. Hierdoor wordt de kwaliteit van het product hoger, maar verhoogd ook de cyclustijd. Dit doordat de matrijs moet opwarmen tot een hogere waarde en bijgevolg ook langer moet koelen. Een minimale zichtbaarheid van de vloeilijn wordt bereikt bij een matrijstemperatuur van **153°C**. Deze waarde wordt bekomen door de **wachttijd** op de spuitgietmachine in te stellen op **16s**, de **koeltijd** van de **variotherm eenheid** in te stellen op **24s** en de **signaalvertraging** op “einde koeltijd” in te stellen op **16,5s**.
- Tot slot wordt de doseerlengte ingesteld op **48 mm**.

Eens deze parameterinstellingen bepaald zijn, moet de koeltijd en nadruktijd ingesteld worden. Deze tijden worden als volgt bepaald:

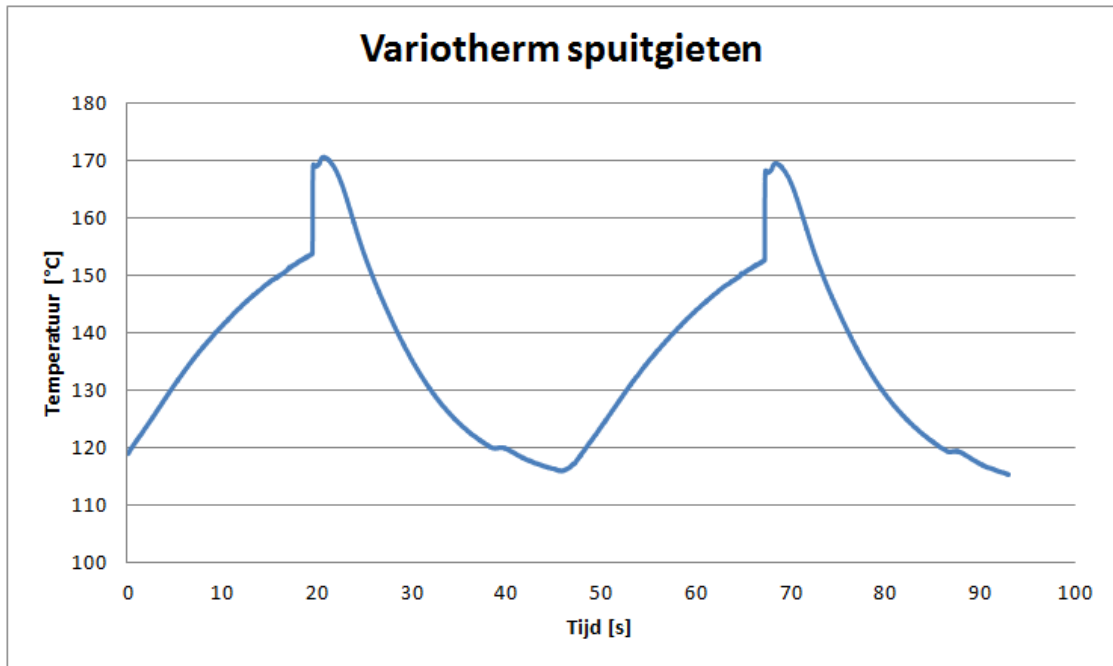
- De **nadruktijd** geeft de tijd weer hoelang de nadruk aangehouden wordt. Deze tijd wordt proefondervindelijk bepaald, door de nadruktijd stapsgewijs te laten dalen en de massa van de overeenkomstige producten te wegen. Eens de massa van het product daalt, weet men dat de nadruktijd te kort is. De grens bij dit proces ligt rond de 4 seconden. Hierdoor kiezen we een veilige waarde van **5s**.
- De **koeltijd** vindt plaats tussen het nadrukken en het effectief uitwerpen van het product. Deze tijd wordt proefondervindelijk bepaald, door de koeltijd stapsgewijs te laten dalen en het product te evalueren op vervorming. Wanneer het product vervormd, weet men dat de nadruktijd te kort is. De grens bij dit proces ligt bij een matrijstemperatuur van 115°C of een koeltijd van 5,5 seconden. Hierdoor kiezen we een veilige waarde van **6,5s**.

Tabel 16 geeft een samenvatting van de optimale parameters.

Optimale parameters		
Smeltemperatuur	°C	320
Nadruk	bar	590
Injectiesnelheid	mm/s	40
Matrijstemperatuur bij injectie	°C	153
Wachttijd	s	16
Koeltijd variotherm eenheid	s	24
Signaalvertraging	s	16,5
Nadruktijd	s	4
Koeltijd	s	6,5
Uitwerptemperatuur	°C	153
Injectietemperatuur	°C	153

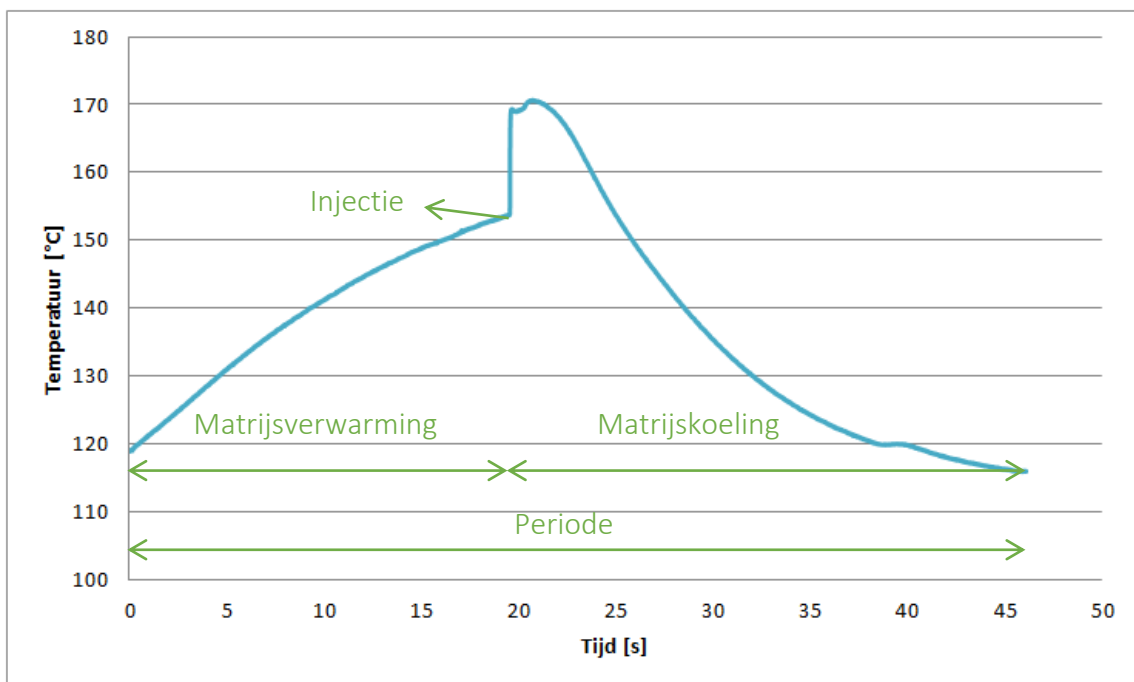
Tabel 16: Optimale parameters voor minimale vloeilijnbreedte bij variotherm spuitgieten

Wanneer we de optimale parameters uit tabel 16 ingeven in de spuitgietmachine, vinden we de cyclustijd van variotherm spuitgieten, bij een minimale zichtbaarheid van de vloeilijn. Op deze manier is de **cyclustijd** van het variotherm spuitgieten gelijk aan **47,7** seconden. Onderstaande grafiek toont het verloop van twee spuitgietycli over een tijd van 95seconden, opgemeten met een thermokoppel in de matrijsholte (zie paragraaf 3.2).



Figuur 32: Verloop spuitgietscyclus variotherm spuitgieten

Uit dit verloop kunnen we één cyclus afzonderlijk analyseren. Dit wordt weergegeven in figuur 33.



Figuur 33: Verloop spuitgietscyclus variotherm spuitgieten

De variotherm cyclus begint met de matrijsverwarming. Hierbij wordt verwarmd tot boven de glastransitietemperatuur zodat de vloeilijn minimaal is. Eens de gewenste temperatuur bereikt is, wordt het kunststof geïnjecteerd. Door de injectie van het warme kunststof, treedt er een korte temperatuurstijging op.

Eens het kunststof volledig geïnjecteerd is, wordt de matrijs afgekoeld zodat het product kan stollen. Tot slot kan het product uitgeworpen worden wanneer het volledig afgekoeld is. Verder kan men uit de cyclus opmaken dat het water, de matrijs initieel snel opwarmt. Maar naarmate de temperatuur de gewenste maximumtemperatuur bereikt, warmt de matrijs trager op. Indien deze matrijsverwarmingstijd ingekort kan worden, zal de cyclustijd bijgevolg ook dalen. Deze mogelijkheid wordt onderzocht in het volgende hoofdstuk, namelijk hybride variotherm spuitgieten.

Besluit

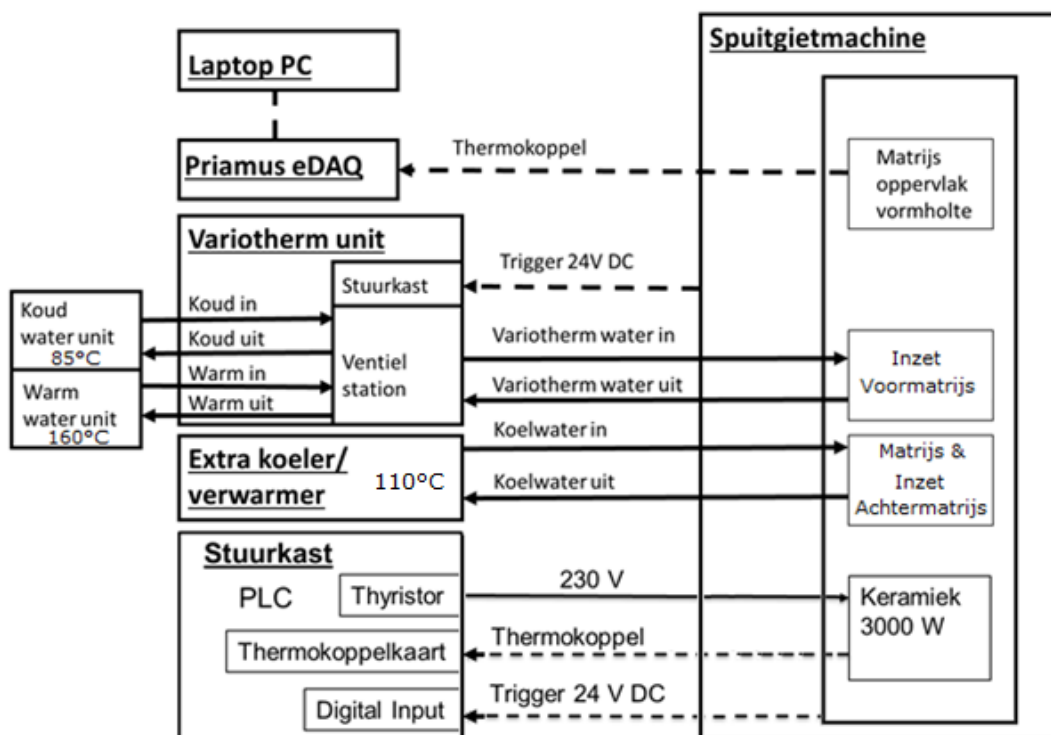
We kunnen besluiten dat conventioneel spuitgieten een spuigiettechniek is met een uitgebreidere procesopbouw. Met behulp van deze techniek, kunnen kunststof kaartjeshouders gemaakt worden waarbij de vloeilijn gedeeltelijk verwijderd is. De cyclustijd zal echter wel hoger zijn als conventioneel spuitgieten, namelijk 47,7 seconden.

6 Experimentele studie, hybride variotherm spuitgieten

In dit hoofdstuk zal de cyclustijd bepaald worden van hybride variotherm spuitgieten, bij producten waarbij de vloeilijn minimaal is. Binnen het hybride variotherm spuitgieten, wordt de bestaande variotherm spuitgiettechniek uitgebreid met een keramisch verwarmingselement. Met behulp van deze uitbreiding, tracht men de verwarmtijd te verkorten en zo ook de cyclustijd van het spuitgieten te verkorten.

6.1 Procesopbouw

De procesopbouw van het hybride variotherm spuitgieten wordt in figuur 34 getoond.



Figuur 34: Procesopbouw hybride variotherm spuitgieten [11]

Bij het hybride variotherm spuitgietproces, wordt het bestaand variotherm proces uitgebreid met een keramisch verwarmingselement. Zoals in paragraaf 3.2 besproken, zijn er twee inzetten van de voormatrijs beschikbaar. De eerste beschikt over SLM geprinte koelkanalen en werd gebruikt in zowel het conventioneel als variotherm spuitgieten. De tweede inzet beschikt zowel over koelkanalen als een keramisch element. Deze inzet wordt gebruikt voor het hybride variotherm spuitgieten.

Het keramisch element (zie bijlage E) beschikt over een vermogen van 3000W en wordt aangestuurd door een thyristor. Deze thyristor wordt geregeld door een PLC, welke als input een thermokoppel van de keramiek en een trigger signaal van de spuitgietmachine heeft. Het trigger signaal van de spuitgietmachine is gekozen op einde van de koeltijd. Op deze manier

kan de inzet reeds beginnen opwarmen tijdens het uitwerpen van het product uit de vorige cyclus. Wederom zit er een thermokoppel in de matrijs die de temperatuur van het oppervlak van de vormholte meet. Op deze manier kan op de laptop de temperatuur van de vormholte gemonitord worden, om zo de trigger signalen te bepalen en het hybride variotherm proces af te stellen.

In deze opstelling zorgt een trigger signaal van het spuitgietmachine voor de opwarming van het keramisch element. Hierdoor is het eenvoudiger om ook bij de variotherm eenheid een trigger van de spuitgietmachine te koppelen aan het warmwater ventiel. Dit in tegenstelling tot het huidige variotherm proces, waar gekozen werd voor te koelen met behulp van een trigger.

Initieel werd in de procesopbouw zowel de matrijs als beide inzetten aangesloten op de variotherm eenheid. Hieruit bleek echter dat de achtermatrijs niet voldoende kon koelen tijdens een variotherm cyclus. Als gevolg hiervan kon de matrijs niet meer sluiten omdat beide matrijshelften een andere temperatuur en dus maat van uitzetting hadden. Als oplossing werd er een extra koeler geïntegreerd, die zowel de volledige matrijs als de inzet van de achtermatrijs op een constante temperatuur van 110°C houdt. Bijkomend viel tijdens de eerste testen meteen op dat de koeltijd beduidend langer was dan bij het variotherm spuitgieten. Dit doordat de kanalen niet optimaal de contour van het product volgen, zoals bij de andere inzet die SLM geprint is. Doordat de matrijs steeds op een lage waarde van 110°C gehouden wordt, zal de afkoeling van de inzet ook sneller verlopen.

Proces initialisatie

Vooraleer er een procesvenster bepaald kan worden voor de hybride variotherm techniek, moet het totale proces eerst geïnitieerd worden. Dit wil zeggen zowel de spuitgietmachine als de variotherm eenheid en het keramisch element afstellen en een synchrone connectie voorzien. Een gelijkaardig stappenplan als bij het variotherm spuitgieten op te stellen is hierbij te complex, omdat er te veel factoren zijn waarmee rekening moet worden gehouden. De uitbreiding van het variotherm proces zal experimenteel gebeuren met behulp van volgende regels:

- 1) Het keramisch element moet starten met verwarmen op het moment dat het product van de vorige cyclus wordt uitgeworpen. Deze verwarming moet aangehouden worden tot het moment van injectie. De tijd tussen het starten van de opwarming en het injecteren, moet experimenteel bepaald worden, naar gelang het gewenst effect op het product. Om een voldoende lange opwarmtijd te bekomen, zal er op de spuitgietmachine een wachttijd worden ingesteld.
- 2) Het opwarmen met behulp van de variotherm eenheid, zal omwille van de dode tijd (tijd tussen het trigger signaal en zichtbaar verwarm effect) gestart worden tijdens de nadruk van de vorige cyclus. De verwarmtijd wordt bepaald, zodat na injectie de matrijs afkoelt door koud water.

- 3) De koeltijd zal bepaald wordt geregeld, zodat het product volledig gekoeld is. Hierdoor zal het product geen vervorming vertonen ten gevolge van de uitstoters.

6.2 Procesvenster

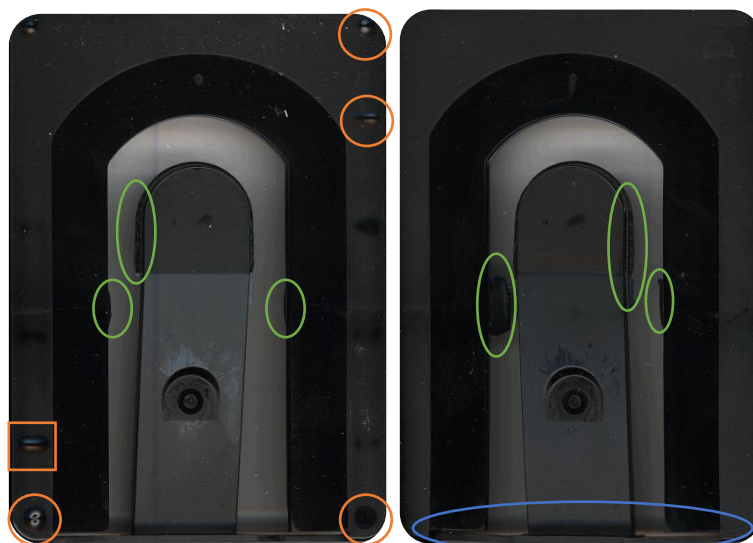
In deze paragraaf gaan we een procesvenster opstellen. Het procesvenster van het conventioneel en variotherm spuitgieten is voor het hybride variotherm spuitgieten niet geschikt. Dit omdat het geen rekening houdt met de bijkomende opwarming van het keramisch element en de wijzigingen in procesopbouw.

Opstellen van het procesvenster

Het opstellen van het procesvenster gebeurt aan de hand van het stappenplan in de literatuurstudie. Hierbij moeten we enkel opletten dat:

- De injectietemperatuur of bovenste temperatuurgrens van de matrijs, een moet temperatuur hebben boven de glastransitietemperatuur, namelijk **145°C**.
- De doseerlengte wordt ingesteld op een waarde afhankelijk van de procesinitialisatie, namelijk **55mm**.

Tijdens het opstellen van het procesvenster, bleek dat het product reeds braamvorming vertoonde wanneer er nog steeds inval zichtbaar was op het product. Om te bepalen of het hybride systeem de oorzaak hiervan was, werden alle koelers op een constante temperatuur van 117°C ingesteld, zodat een conventioneel systeem gecreëerd werd. Vervolgens werd opnieuw opgesteld bij het conventioneel systeem. Hieruit bleek wederom dat zowel inval als braamvorming aanwezig was op het product. We kunnen dus besluiten dat de implementatie van de hybride techniek, niet het probleem is. Een mogelijke oorzaak van dit probleem is dat de inzet onvoldoende vlak is waardoor de twee matrijsdelen niet mooi aansluiten. Figuur 35 toont links zowel de aanwezigheid van inval als braamvorming op een product bij conventioneel spuitgieten.

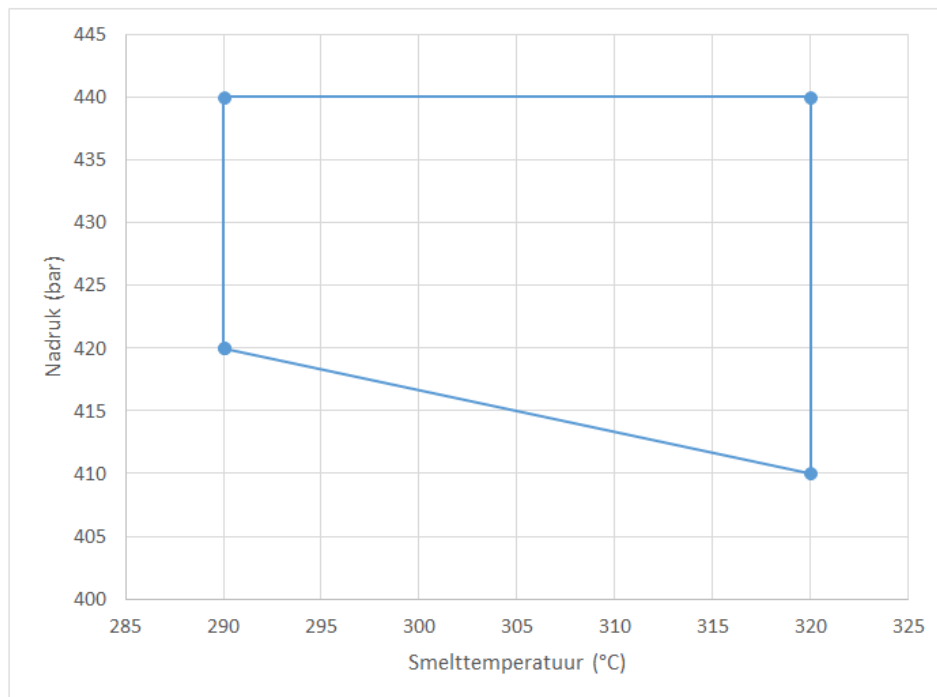


Figuur 35: Braamvorming & inval bij conventioneel spuitgieten

In figuur 35 is links te zien dat er inval (oranje) aanwezig is op het product, in combinatie met braamvorming (groen). De rechtse figuur toont een product gevormd onder hoge nadruk, waarbij er flash (groen) optreedt alsook het verend systeem dat vervormd (blauw) is. Het besluit hieruit is dat we geen product kunnen maken zonder visuele fouten en het geen gevolg is van de hybride techniek. In het verdere verloop van deze techniek zullen er dus producten als “goed” beoordeeld worden wanneer er minimale inval en braamvorming aanwezig is. Tabel 17 en figuur 36 geven de gevonden parameters met bijhorend procesvenster.

Tabel 17: Ingestelde- en bekomen parameters voor het hybride variotherm procesvenster

Opstellen procesventer					
Ingestelde parameters			Bekomen parameters		
Matrijstemperatuur bij injectie	°C	145		Lage temperatuur	Hoge temperatuur
Doseerlengte	mm	55	Lage druk	420 bar	410 bar
Injectiesnelheid	mm/s	150			
Lage smeltemperatuur	°C	290	Hoge druk	440 bar	440 bar
Hoge smeltemperatuur	°C	320			



Figuur 36: Procesvenster hybride variotherm spuitgieten

We vinden een compact procesvenster, waarbij de grenzen dicht bij elkaar liggen. Verder weten we dat we in dit venster geen visueel correcte producten vinden, zoals bepaald in de vorige paragraaf.

6.3 Design of Experiments

Binnen het vorige hoofdstuk, werd reeds bepaald welk effect de spuitgietparameters hebben op de zichtbaarheid van de vloeilijn. Hieruit bleek dat de zichtbaarheid van de vloeilijn afhankelijk was van de matrijstemperatuur en injectiesnelheid. Indien de matrijstemperatuur ingesteld werd op een hoge waarde en de injectiesnelheid ingesteld werd op een lage waarde, werd de zichtbaarheid van de vloeilijn positief beïnvloed. Hieruit besloten we dat de injectiesnelheid zo laag mogelijk moest ingesteld worden en de matrijstemperatuur zo hoog mogelijk moeten ingesteld worden. Verder hadden de nadruk en smelttemperatuur weinig tot geen invloed op de zichtbaarheid van de vloeilijn.

De conclusies van deze DoE analyse zijn ook geldig voor de hybride variotherm techniek, omdat hier er enkel een keramisch element toegevoegd is aan de matrijsverwarming.

6.4 Cyclustijd

In de vorige paragraaf hebben we bepaald welke invloed de parameters hebben op de breedte van de vloeilijn. Vanuit deze gegevens gaan we het hybride variotherm proces afstellen, zodat we de optimale procesparameters vinden voor een minimale vloeilijn. De procesparameters worden als volgt bepaald:

- Als eerste stellen we de **smelttemperatuur** in. Deze heeft volgens de DoE analyse geen invloed op de vloeilijn. Hierdoor stellen we de temperatuur in op een waarde aangeraden door de fabrikant van het kunststof, namelijk **320°C**.
- Ten tweede moet de **nadruk** ingesteld worden. Ook deze parameter heeft volgens de DoE analyse geen invloed op de vloeilijn. Hierdoor stellen de nadruk in op een waarde waarbij er visueel goede producten gemaakt worden, namelijk **440 bar**.
- Ten derde stellen we de **injectiesnelheid** in. Deze parameter heeft volgens de DoE analyse een positieve invloed op de vloeilijn bij een lage injectiesnelheid. Hierdoor wordt de injectiesnelheid stapsgewijs verlaagd. Dit tot op het punt waarbij het product niet volledig gevuld is of inval vertoont. We kiezen een de injectiesnelheid net boven deze waarde, namelijk **40 mm/s**.
- Tot vierde moet de **matrijstemperatuur** zo hoog mogelijk ingesteld worden. Hiervoor laten we de matrijstemperatuur bij injectie, stapsgewijs verhogen. Hierdoor wordt de kwaliteit van het product hoger, maar verhoogd ook de cyclustijd. Dit doordat de matrijs moet opwarmen tot een hogere waarde en bijgevolg ook langer moet koelen. De vloeilijn wordt verwijderd bij een matrijstemperatuur van **147°C**. Deze waarde wordt bekomen door de **wachttijd** op de spuitgietmachine in te stellen op **3,5s**. De **verwarmtijd** van de **variotherm eenheid** in te stellen op **4,5s** en de **signaalvertraging** op “start nadruk” in te stellen op **5s**. De **verwarmtijd** van het **keramisch element** in te stellen op **4,5s** en de **signaalvertraging** op “einde koeltijd” in te stellen op **0s**.
- Tot slot wordt de doseerlengte ingesteld op **55 mm**.

Eens deze parameterinstellingen bepaald zijn, moet de koeltijd en nadruktijd ingesteld worden. Deze tijden worden als volgt bepaald:

- De **nadruktijd** geeft de tijd weer hoelang de nadruk aangehouden wordt. Deze tijd wordt proefondervindelijk bepaald, door de nadruktijd stapsgewijs te laten dalen en de massa van de overeenkomstige producten te wegen. Eens de massa van het product daalt, weet men dat de nadruktijd te kort is. De grens bij dit proces ligt rond de 4 seconden. Hierdoor kiezen we een veilige waarde van **5s**.
- De **koeltijd** wordt proefondervindelijk bepaald, door het stapsgewijs te laten dalen en het product te evalueren op vervorming. Wanneer het product vervormd, weet men dat de nadruktijd te kort is. De grens bij dit proces ligt bij een matrijstemperatuur van 135°C of een koeltijd van 9,5 seconden. Hierdoor kiezen we een veilige waarde van **10s**. Dit in tegenstelling tot het conventioneel en normaal variotherm spuitgieten, waar de matrijstemperatuur een waarde van 115°C moet bereiken bij uitstoot. Dit verschil in temperatuur is te wijten aan het feit dat de inzet van de achter matrijs, constant op een temperatuur van 110°C wordt gehouden zoals besproken in paragraaf 6.1. Doordat de inzet op een constante lage temperatuur wordt gehouden, zal het product aan deze zijde snel stollen en zal er geen vervorming optreden door de uitstoters.

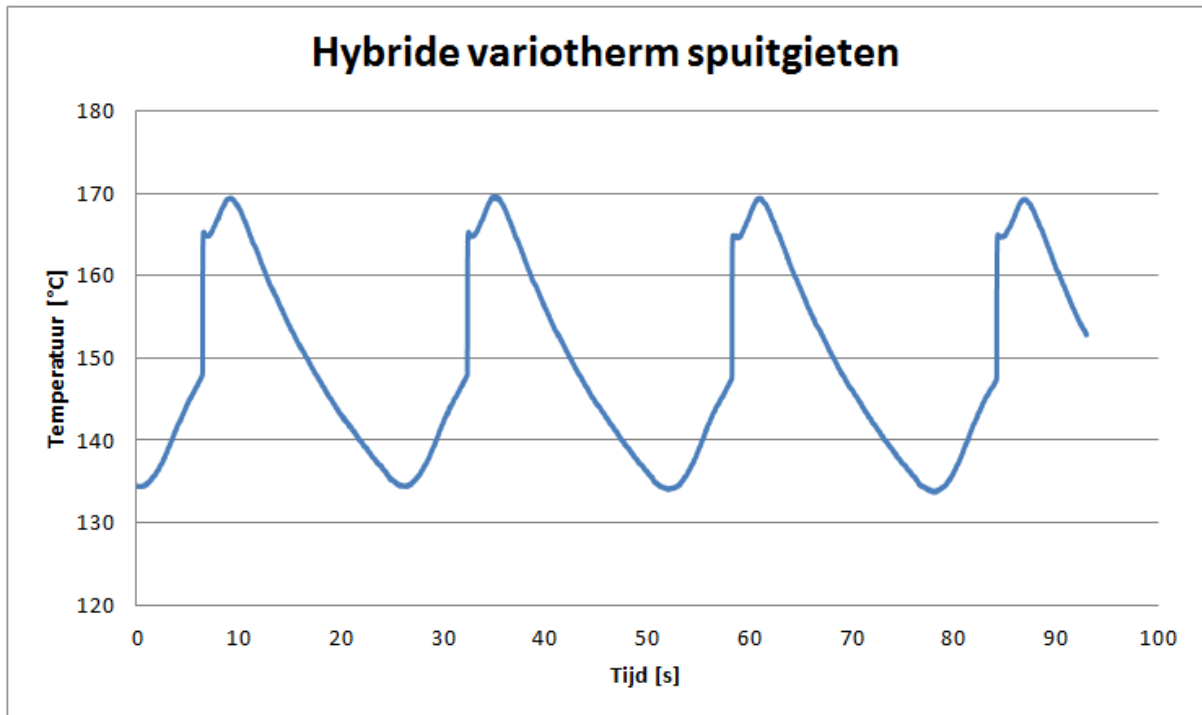
Tabel 18 geeft een samenvatting van de optimale parameters.

Tabel 18: Optimale parameters voor vloeilijnbreedte bij hybride variotherm spuitgieten

Optimale parameters		
Smelttemperatuur	°C	320
Nadruk	bar	440
Injectiesnelheid	mm/s	40
Matrijstemperatuur bij injectie	°C	147
Wachttijd	s	3,5
Verwamtijd variotherm eenheid	s	4,5
Signaalvertraging variotherm	s	5
Verwamtijd keramisch element	s	4,5
Signaalvertraging Kermamiek	s	0
Nadruktijd	s	5
Koeltijd	s	10
Uitwerptemperatuur	°C	135
Injectietemperatuur	°C	147

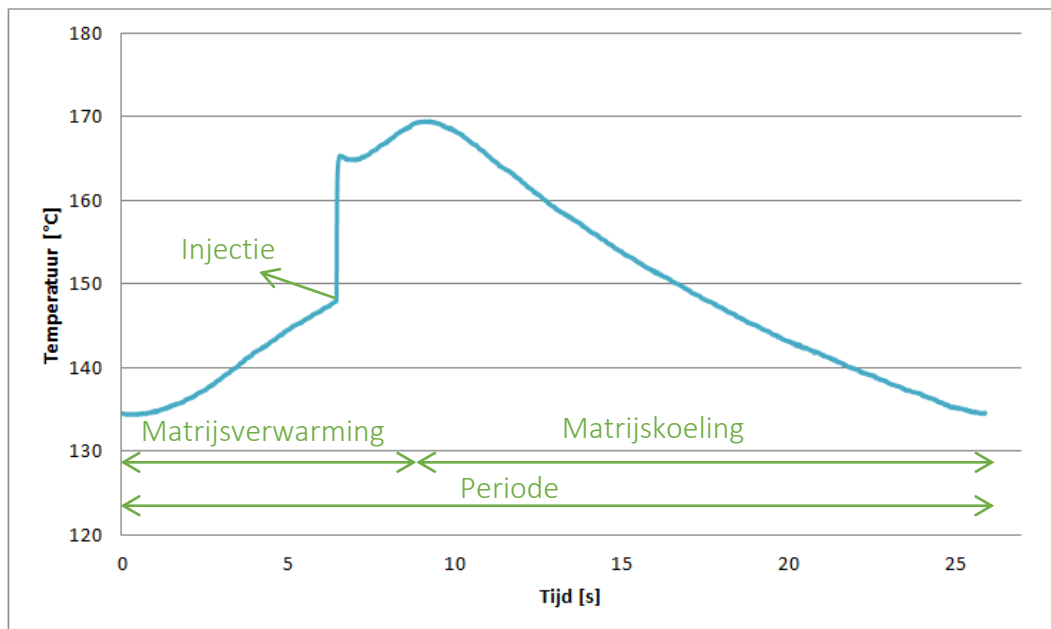
Wanneer we de optimale parameters uit tabel 18 ingeven in de spuitgietsmachine, vinden we de cyclustijd van variotherm spuitgieten, bij een verwijdering van de vloeilijn. Op deze manier is de **cyclustijd** van het variotherm spuitgieten gelijk aan **25,9** seconden.

Onderstaande grafiek toont het verloop van drie spuitgietscycli over een tijd van 95seconden, opgemeten met een thermokoppel in de matrijsholte (zie paragraaf 3.2).



Figuur 37: Verloop spuitgietscyclus hybride variotherm spuitgieten

Uit dit verloop kunnen we één cyclus afzonderlijk analyseren. Dit wordt weergegeven in figuur 38.



Figuur 38: Verloop spuitgietscyclus hybride variotherm spuitgieten

De variotherm cyclus begint met de matrijsverwarming. Hierbij wordt door combinatie van water en een elektrisch verwarmingselement, verwarmd tot boven de glastransitietemperatuur zodat de vloeilijn weg is. Eens de gewenste temperatuur bereikt is, wordt het kunststof geïnjecteerd.

Door de injectie van het warme kunststof, treedt er een korte temperatuurstijging op. Eens het kunststof volledig geïnjecteerd is, wordt de matrix afgekoeld zodat het product kan stollen. Tot slot kan het product uitgeworpen worden wanneer het volledig afgekoeld is.

Verder kan men uit de cyclus opmaken dat de combinatie van waterverwarming met een het keramisch element een snellere verwarmtijd heeft dan enkel waterverwarming. Hierdoor zal de cyclustijd in het totaal korter zijn dan gewoon variotherm spuitgieten.

In tegenstelling tot de gewone variotherm techniek, hebben producten gemaakt bij deze optimale instellingen, geen zichtbare vloeilijn meer. Dit zowel op het glanzende als het matte gedeelte. Dit kan te wijten zijn aan het feit dat het keramisch verwarmingselement de volledige vormholte op een uniforme manier verwarmd. Dit in tegenstelling tot het variotherm spuitgieten, waar warm water door een circuit stroomt. Hierdoor zal het water aan het begin van het circuit een hogere temperatuur hebben dan tegen het einde. Figuur 39 toont het verschil in vloeilijn tussen een product gemaakt met de variotherm en de hybride variotherm techniek.



Figuur 39: Verschil in vloeilijn tussen variotherm (links) – en hybride variotherm spuitgieten (rechts)

De linkse figuur toont de vloeilijn van een product gemaakt met de variotherm techniek. Hierbij is de vloeilijn nog zichtbaar op het glanzende gedeelte. De rechter figuur toont de vloeilijn van een product gemaakt met de hybride variotherm techniek. Hierbij is de vloeilijn volledig verwijderd.

Besluit

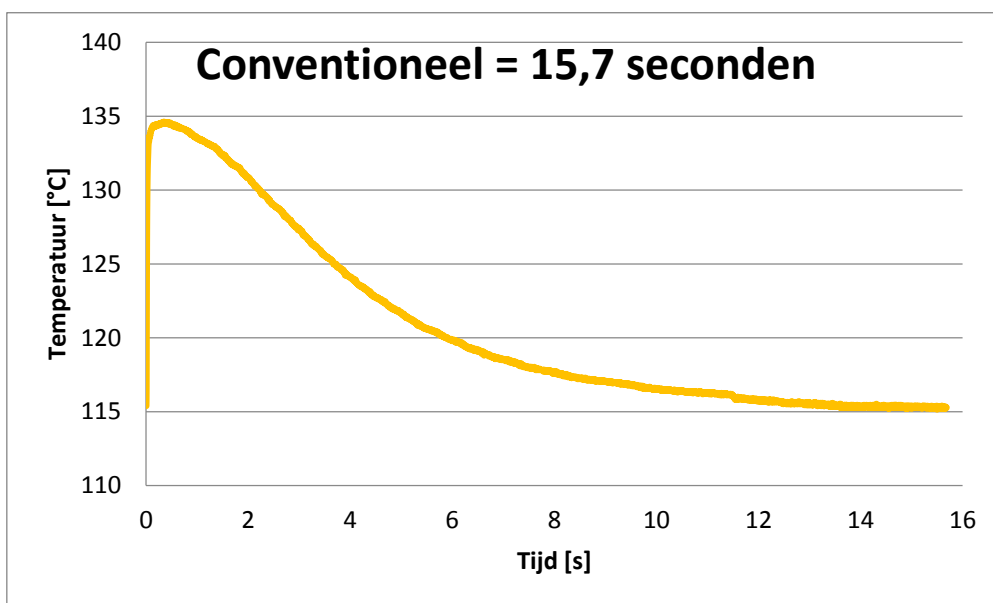
We kunnen besluiten dat hybride variotherm spuitgieten een vrij complexe spuitgiettechniek is met een uitgebreide procesopbouw. Met behulp van deze techniek kunnen we de cyclustijd van variotherm spuitgieten verlagen tot slechts 25,9 seconden. Bovendien is de vloeilijn op het product volledig verwijderd bij deze techniek. Ondanks de complexe techniek met uitgebreid procesopbouw, is deze techniek een zeer goede uitbreiding op de huidige variotherm techniek.

7 Vergelijking resultaten

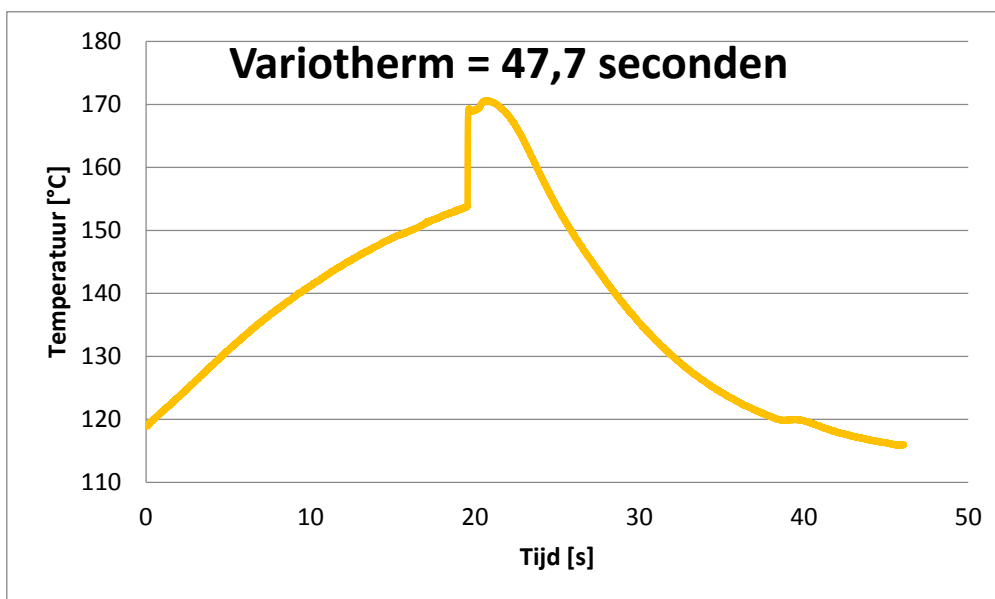
In dit hoofdstuk wordt een vergelijking gemaakt tussen de drie methodes, conventioneel -, variotherm – en hybride variotherm spuitgieten. De vergelijking gebeurt op basis van de cyclustijd, thermische camera beelden en de vloeilijn. Tot slot wordt er een aanbeveling gedaan om naar de toekomst toe de hybride variotherm techniek nog te optimaliseren.

7.1 Cyclustijd

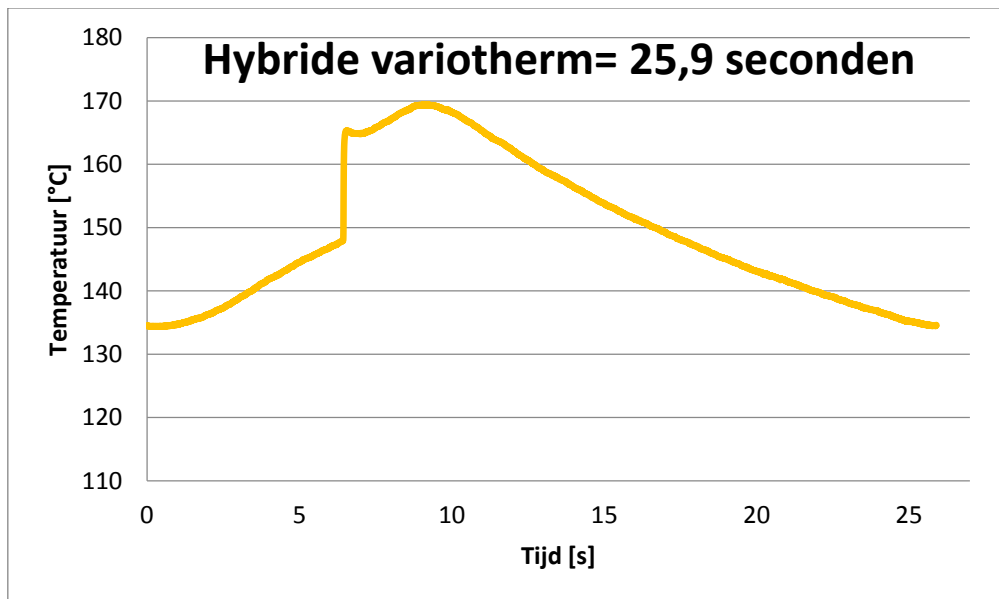
Onderstaande grafieken tonen de spuitgietscycli van de drie spuitgiettechnieken die werden toegepast binnen deze masterproef.



Figuur 40: Vergelijking cyclustijd conventioneel



Figuur 41: Vergelijking cyclustijd variotherm



Figuur 42: Vergelijking cyclustijd hybride variotherm

Wanneer we de 3 technieken evalueren op basis van cyclustijd, zien we dat de conventionele spuitgiettechniek de laagste cyclustijd heeft. Maar hierbij moet rekening gehouden worden dat men met zowel de variotherm als hybride variotherm techniek, producten kan produceren waarbij de vloeilijn gedeeltelijk of volledig verwijderd kan worden. Verder kunnen we besluiten dat de hybride variotherm techniek, door uitbreiding van de opwarmmethode een lagere cyclustijd heeft dan het variotherm spuitgieten. Tabel 19 toont de drie spuitgietmethodes met bijhorende cyclustijd en type verwarming.

Tabel 19: Vergelijking cyclustijd en type verwarming

	Convetioneel spuitgieten	Variotherm spuitgieten	Hybride variothermspuitgieten
Cyclustijd [s]	15,7	47,7	25,9
Type verwarming	Constante matrijsverwarming	Variabele matrijsverwarming	Variabele matrijsverwarming
	waterverwarming	Waterverwarming	Water + elektrische verwarming

Besluit

We kunnen besluiten dat de standaard variotherm techniek een zeer grote cyclustijdvergroting tot gevolg heeft. De cyclustijd is namelijk ± 30 seconden langer als de conventionele techniek. Dit komt overeen met een verdrievoudiging van de cyclustijd. De hybride variotherm techniek heeft slechts een stijging van ± 10 seconden ten opzichte van het conventioneel spuitgieten of een cyclustijd verlaging van 20 seconden ten opzichte van variotherm spuitgieten.

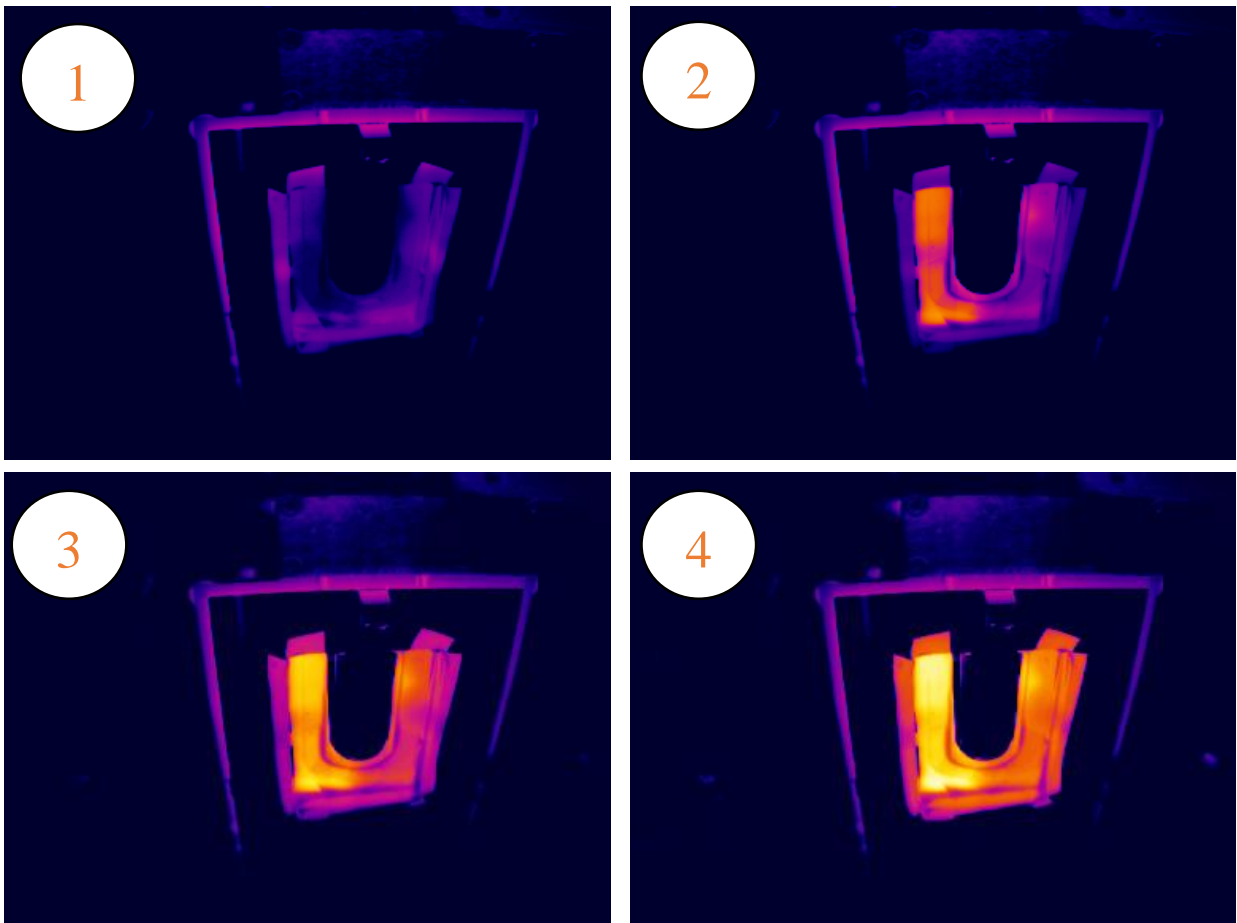
7.2 Thermische camera

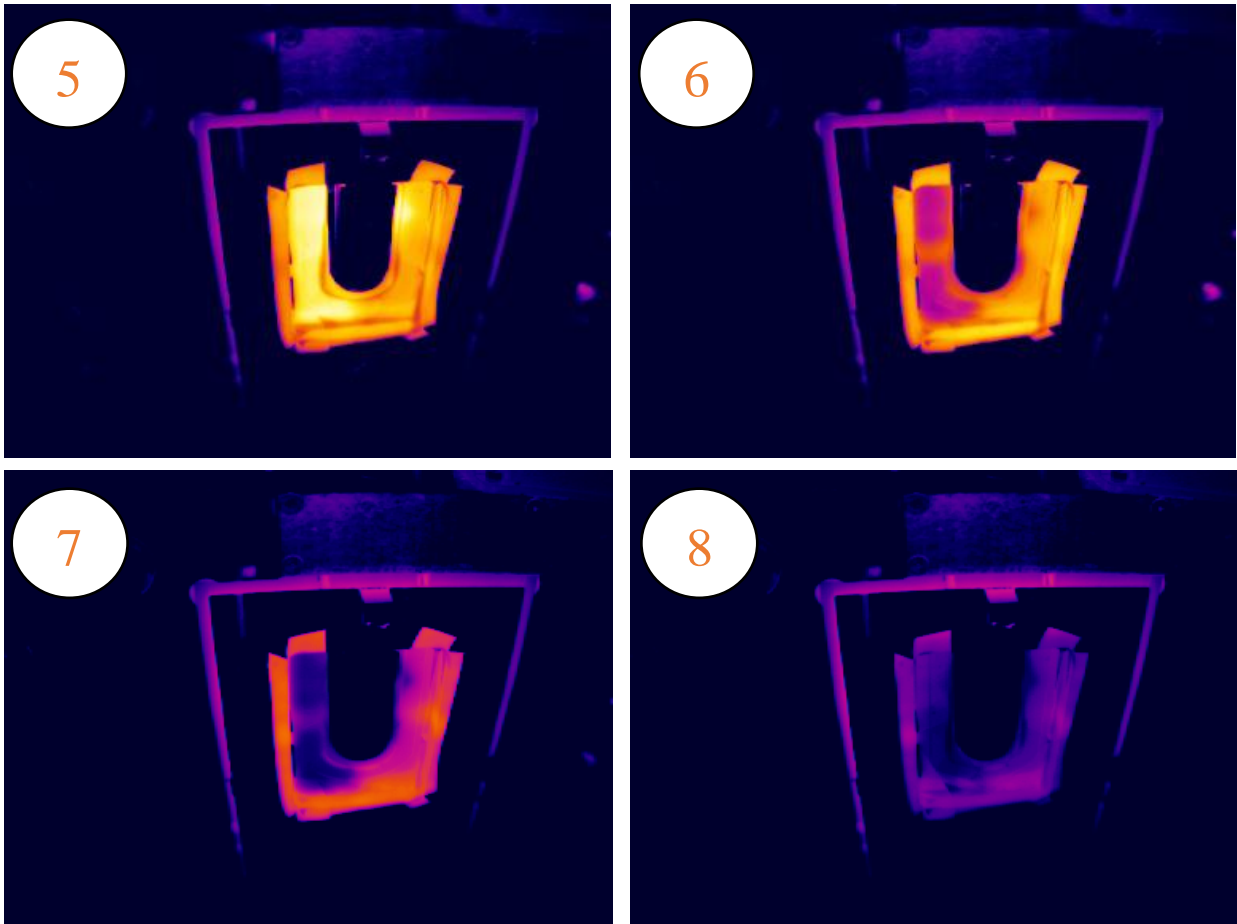
Om een duidelijk beeld te schetsen over het verschil tussen de matrijsverwarming bij variotherm en hybride variotherm, zijn er thermische beelden gemaakt met behulp van een thermische camera. Hiermee kunnen de verwarmmethodes geëvalueerd en vergeleken worden.

De thermische camera zal infraroodstralen opnemen en omzetten in temperatuur. Wanneer men met de thermische camera op het directe oppervlak van de matrijs gaat meten, zullen we veel last hebben van reflexie, waardoor de metingen niet bruikbaar zijn. De oorzaak hiervan is dat de matrijs opgebouwd is uit metaal. Om dit probleem op te lossen, zal de matrijsscaviteit dicht geplakt worden met zwarte tape. Deze tape verhindert de reflexie van de infraroodstralingen, waardoor de metingen bruikbaar zijn.

Variotherm spuitgieten

Onderstaande figuren tonen één thermische cyclus van de voormatrijs bij variotherm spuitgieten.





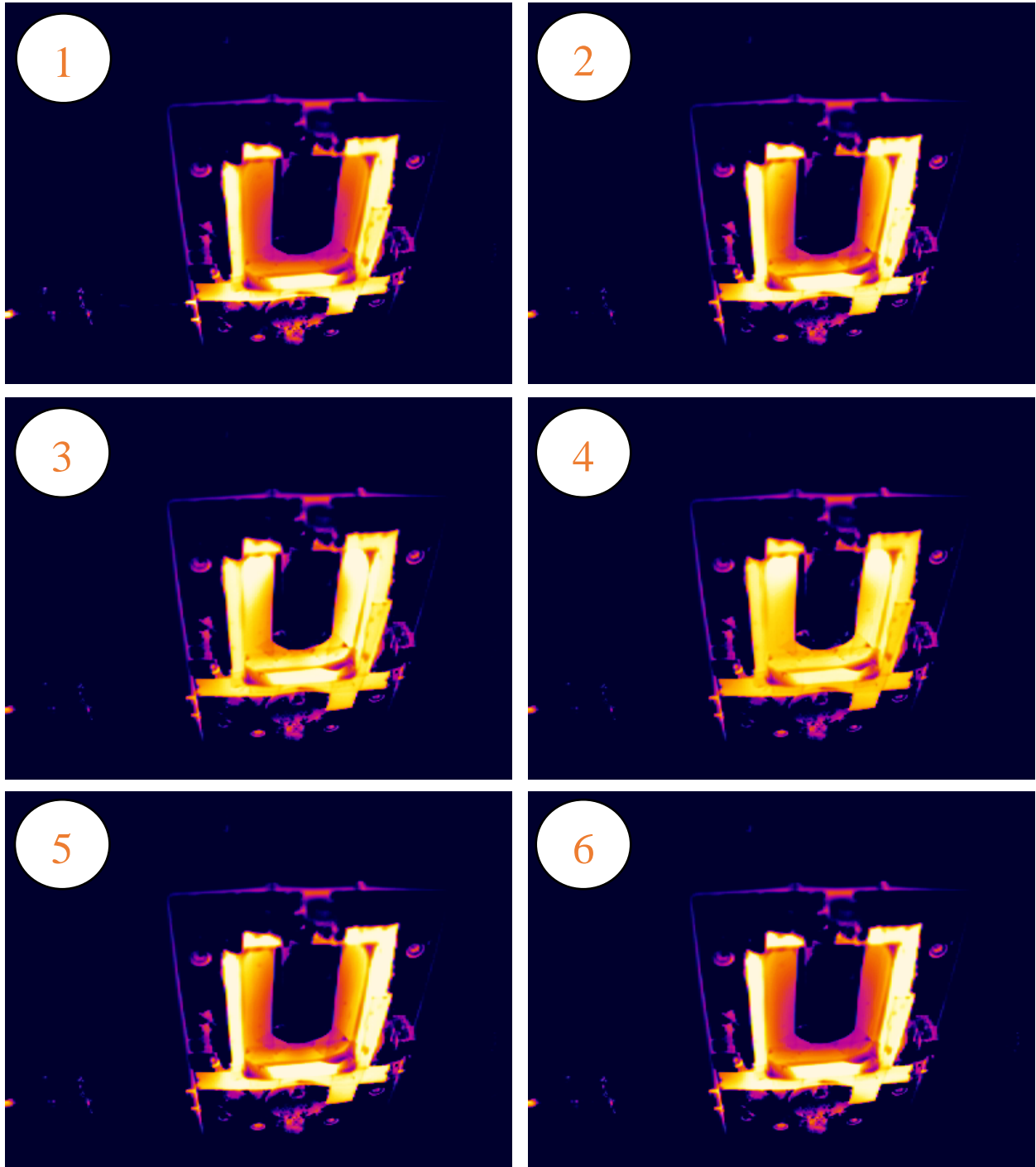
Figuur 43: Thermische cyclus variotherm spuitgieten

Uit deze beelden kunnen we zien dat er geen sprake is van uniforme verwarming. De linkerzijde van de matrijs wordt namelijk eerder verwarmd dan de rechterzijde. Omgekeerd zal de linkerzijde ook sneller terug afkoelen dan de rechterzijde. Deze niet uniforme temperatuursverandering is te verklaren, omdat de ingangen van het koelcircuit allemaal gekozen zijn aan de linkerzijde van de matrijs. Een betere oplossing zou zijn om een aantal ingangen links en een aantal ingangen rechts aan te sluiten.

Verder kunnen we besluiten dat we het kunststof best injecteren op beeld nummer 5, omdat hier de inzet zich hier op een relatief constant en hoge temperatuur bevindt. Vervolgens kunnen we ook zien dat het kunststof product best uitgeworpen wordt op beeld nummer 8, wanneer de matrijs en het kunststof constant is afgekoeld tot een lage temperatuur.

Hybride variotherm spuitgieten

Onderstaande figuren tonen één thermische cyclus van de voormatrijs bij hybride variotherm spuitgieten. Hierbij wordt de inzet van de voormatrijs verwarmd door een combinatie van een elektrisch verwarmingselement en warm water.



Figuur 44: Thermische cyclus variotherm spuitgieten

Uit deze beelden kunnen we zien dat er sprake is van een betere uniforme verwarming. Doordat het keramisch verwarmingselement de contour van de vormholte perfect volgt, zal het keramisch verwarmingselement de caviteit op een snelle en homogene manier opwarmen.

Verder kunnen we besluiten dat we het kunststof best injecteren op beeld nummer 3 of 4, omdat hier de inzet zich hier op een hoge constante temperatuur bevindt. Vervolgens kunnen we ook zien dat het kunststof product best uitgeworpen wordt op beeld nummer 6, wanneer de matrijs en het kunststof constant is afgekoeld tot een lage temperatuur.

Besluit

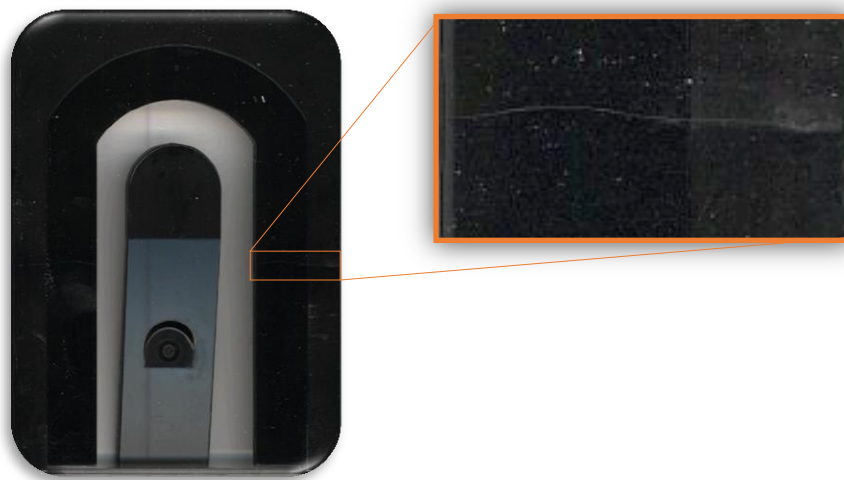
Op de thermische beelden is duidelijk zichtbaar dat de hybride variotherm techniek uniformere verwarming heeft ten opzichte van de huidige variotherm techniek. Bij de huidige variotherm techniek wordt de matrijs verwarmd van links naar rechts.

7.3 Vloeilijn

In deze paragraaf wordt een vergelijking gemaakt tussen de zichtbaarheid van de vloeilijn bij de drie spuitgietmethodes.

Conventioneel spuitgieten

Met behulp van conventioneel spuitgieten is het niet mogelijk de vloeilijn te verwijderen bij het kaartjeshouder product met de gekozen kunststof. Er is altijd een vloeilijn aanwezig, zowel op het matte als op het glanzende gedeelte. Het is wel mogelijk de vloeilijnbreedte te minimaliseren, zodat de zichtbaarheid van de lijn daalt. Figuur 45 toont de vloeilijn van een product gemaakt met conventioneel spuitgieten.

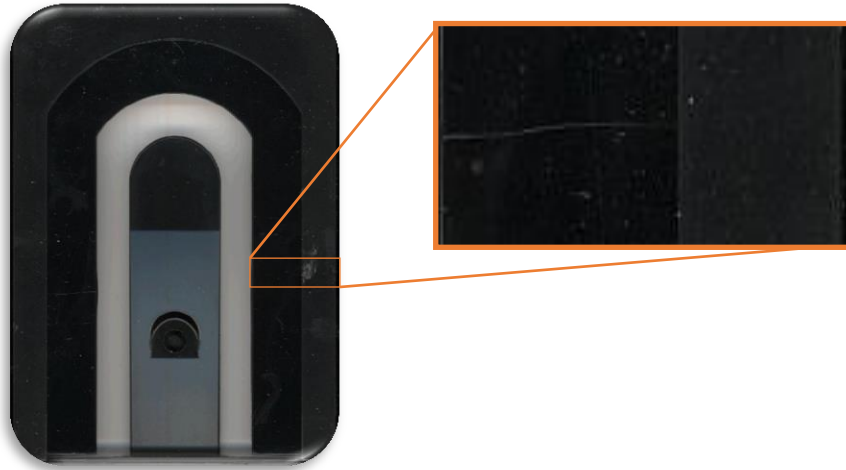


Figuur 45: Vergelijking vloeilijn conventioneel spuitgieten

Op figuur 45 is duidelijk te zien dat de vloeilijn aanwezig is over de volledige breedte van het product.

Variotherm spuitgieten

Met behulp van conventioneel spuitgieten is het in principe mogelijk de vloeilijn volledig te verwijderen bij een product. Nochtans werd in deze masterproef vastgesteld dat de vloeilijn slechts gedeeltelijk kon verwijderd worden op het product. Hierdoor was de vloeilijn verwijderd op het matte gedeelte, maar nog steeds zichtbaar op het glanzend gedeelte. Een mogelijke verklaring voor het niet volledig verwijderen van de matrijs, kan zijn dat de aansluitingen het watercircuit niet optimaal gekozen zijn zoals besproken in vorige paragraaf. Bovendien is de vloeilijn aan beide kanten van het product niet gelijk. Figuur 46 toont de vloeilijn van een product gemaakt met variotherm spuitgieten.

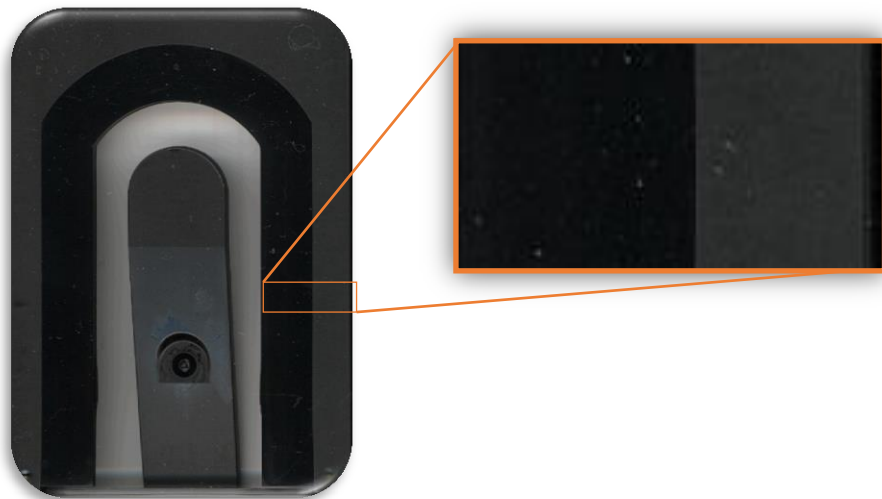


Figuur 46: Vergelijking vloeilijn variotherm spuitgieten

Hybride variotherm spuitgieten

Met behulp van conventioneel spuitgieten is het mogelijk de vloeilijn volledig te verwijderen bij het kaartjeshouder product met de gekozen kunststof. Hierbij zal zowel de vloeilijn op het matte als op het glanzend gedeelte verwijderd zijn. Een mogelijke verklaring voor de volledige verwijdering hier, is dat de matrijsholte op een uniforme manier verwarmend wordt zoals besproken in vorige paragraaf, of omdat er een betere ontluchting in de matrijs.

Hierdoor is op elke plaatst de temperatuur boven de glastransitietemperatuur. Figuur 47 toont de vloeilijn van een product gemaakt met hybride variotherm spuitgieten.



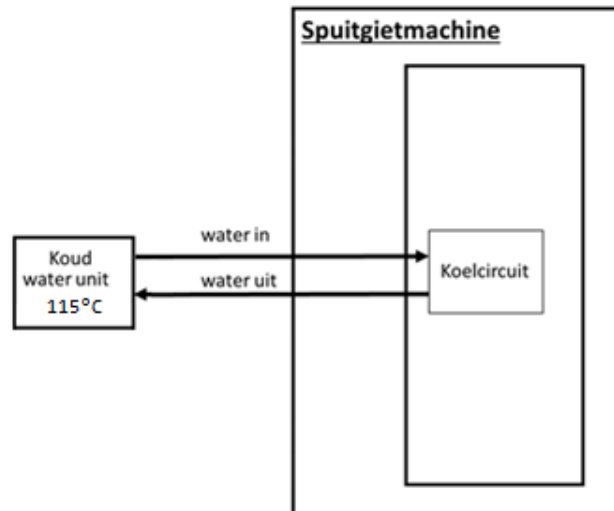
Figuur 47: Vergelijking vloeilijn hybride variotherm spuitgieten

7.4 Proces opbouw

In deze paragraaf wordt een vergelijking gemaakt tussen de verschillende proces opbouwen bij de drie spuitgietmethodes.

Conventioneel spuitgieten

Conventioneel spuitgieten is de meest gebruikte en meest eenvoudige spuitgietmethode. Figuur 48 toont de procesopbouw van conventioneel spuitgieten.

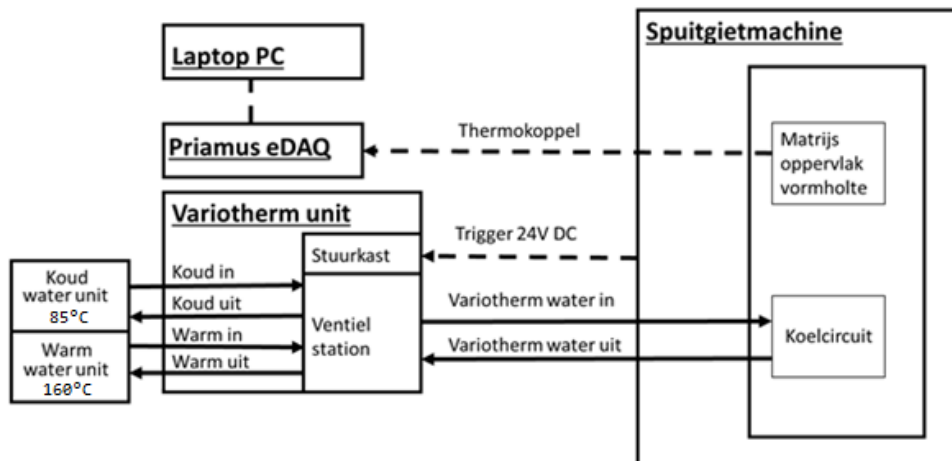


Figuur 48: Vergelijking proces opbouw conventioneel spuitgieten

Hierbij wordt de matrix op een constante temperatuur gehouden door slechts één temperatuurapparaat. Bijgevolg is de kostprijs van de proces opbouw het laagst in vergelijking met de andere 2 technieken. Exclusief de spuitgietmachine zal er enkel een koudwater-eenheid voorzien moeten worden met een kostprijs van \pm €10 000.

Variotherm spuitgieten

Variotherm spuitgieten is een complexere spuitgietmethode. Figuur 49 toont de procesopbouw van variotherm spuitgieten.

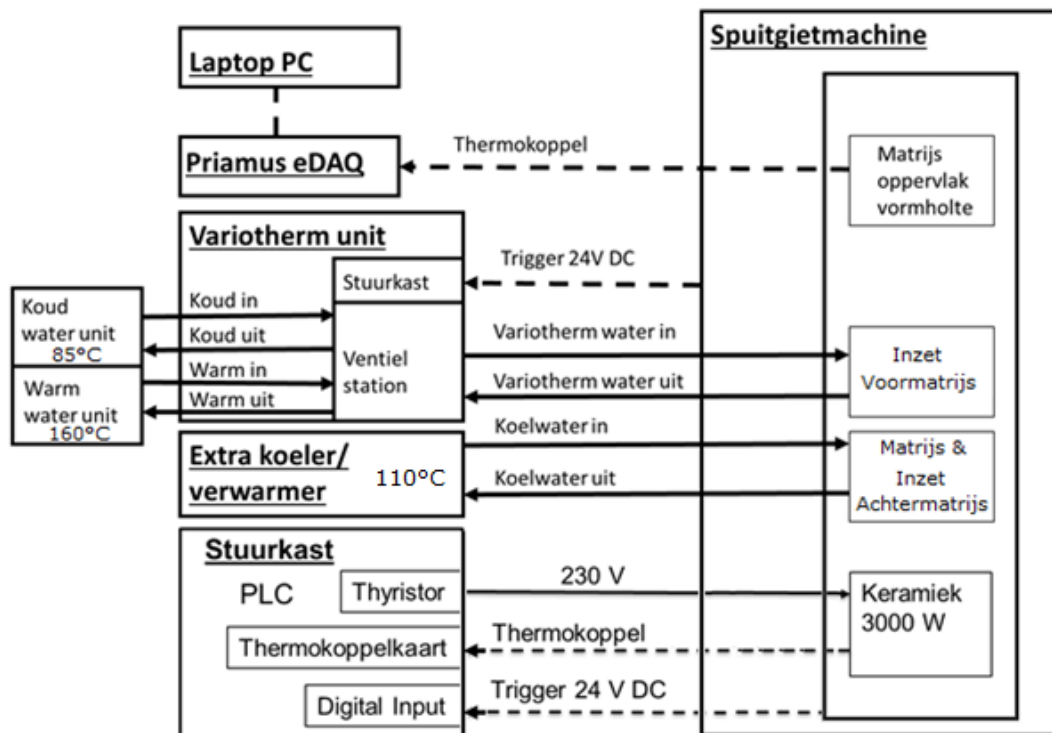


Figuur 49: Vergelijking proces opbouw variotherm spuitgieten

Het valt meteen op dat het verwarmgedeelte bij deze procesopbouw veel uitgebreider is ten opzichte van het conventioneel spuitgieten. Men heeft onder andere twee temperereerapparaten, een variotherm eenheid en een thermokoppel met sturing nodig om een variotherm spuitgietproces te kunnen toepassen. Deze uitbreiding zorgt voor een hogere complexiteit bij het initialiseren van het spuitgietproces en een hogere kostprijs van de proces opbouw. Er moeten namelijk twee extra water-eenheden van elk \pm €10 000 en een variotherm eenheid met thermokoppel van \pm €20 000 aangekocht worden. Hierdoor kost de proces opbouw \pm €40 000 of \pm €30 000 duurder dan conventioneel spuitgieten.

Hybride variotherm spuitgieten

Hybride variotherm spuitgieten is een uitbreiding op het variotherm spuitgieten. Figuur 50 toont de procesopbouw van hybride variotherm spuitgieten.



Figuur 50: Vergelijking proces opbouw variotherm spuitgieten

De proces opbouw van het variotherm spuitgieten wordt uitgebreid door middel van een keramisch element in de spuitgietmatrijs. Bovendien moet er voor het keramisch element aan te sturen een thermokoppel met stuurkast worden geïmplementeerd. Deze uitbreiding zorgt wederom voor een hogere complexiteit bij het initialiseren van het spuitgietproces en een hogere kostprijs van de proces opbouw. Er moet namelijk één extra koeler van \pm €10 000 en een keramisch element met thermokoppel van \pm €5 000 aangekocht worden. Hierdoor is de techniek \pm €15 000 duurder dan variotherm spuitgieten of €45 000 duurder dan variotherm spuigieten.

Besluit

De procesopbouw van conventioneel spuitgieten is de goedkoopste en eenvoudigste spuitgiettechniek met een kostprijs van €10 000 exclusief de spuitgietmachine. Hierna volgt variotherm spuitgieten, waarbij het proces uitgebreid wordt met een variotherm eenheid en thermokoppel waardoor de kostprijs gelijk is aan ± €40 000 exclusief de spuitgietmachine. Tot slot is de hybride variotherm techniek de duurste en meest uitgebreide techniek met een kostprijs van ± €55 000 exclusief de spuitgietmachine.

8 Bespreking eindresultaten

8.1 Conclusie

In deze masterproef werd nagegaan of de cyclustijd van variotherm spuitgieten verlaagd kan worden door implementatie van een hybride variotherm techniek. Deze hybride techniek bestaat erin om verschillende verwarmingsmethodes te combineren om zo het verwarmen te versnellen en hierdoor de cyclustijd te verlagen.

Om het effect te kennen van het variotherm spuitgieten, werd eerst de cyclustijd van conventioneel spuitgieten bepaald, bij instellingen waarbij de vloeilijn minimaal is. Hieruit bleek dat men de vloeilijn bij conventioneel spuitgieten niet kan verwijderen, maar enkel kan minimaliseren. Dit bij een cyclustijd van 15,7 seconden. De procesopbouw en initialisatie is bij deze techniek eenvoudig en goedkoop.

Ten tweede werd de cyclustijd bepaald bij variotherm spuitgieten, dit wederom bij instellingen waarbij de vloeilijn minimaal is. Hierbij bleek dat de vloeilijn gedeeltelijk verwijderd kan worden op het product, bij een cyclustijd van 47,7 seconden. Er is dus een verhoging van de cyclustijd van 30 seconden ten opzichte van conventioneel spuitgieten. Om deze variotherm techniek toe te passen, moet de conventionele procesopbouw uitgebreid worden met een variotherm eenheid en thermokoppel, waardoor de kostprijs van de procesopbouw stijgt.

Ten tweede werd de cyclustijd bepaald bij hybride variotherm spuitgieten, dit wederom bij instellingen waarbij de vloeilijn minimaal is. Hieruit bleek dat de vloeilijn volledig verwijderd kan worden op het product, en dit bij een cyclustijd van 25,9 seconden. Dit betekent een cyclustijd verlaging van ± 22 seconden ten opzichte van het standaard variotherm spuitgieten. Bijkomend kan de vloeilijn bij de hybride techniek volledig verwijderd worden in tegenstelling tot bij variotherm spuitgieten waarbij de vloeilijn slechts gedeeltelijk verwijderd kan worden. Dit doordat het keramisch element zorgt voor een uniforme temperatuurstijging in de matrijs. Om deze techniek te realiseren, moet de procesopbouw uitgebreid worden met een keramisch verwarmingselement, waardoor de kostprijs van de procesopbouw zal stijgen.

Het voornaamste besluit van deze masterproef is dat de cyclustijd van de standaard variotherm spuitgiettechniek verlaagd kan worden door implementatie van een hybride variotherm techniek. Om deze verlaging te realiseren, moet er een keramisch element voorzien worden in de spuitgietmatrijs. Hierdoor wordt de procesinitialisatie complexer en de kostprijs van de procesopbouw duurder. Verder kan de vloeilijn bij het hybride variotherm spuitgieten volledig verwijderd worden op het product, in tegenstelling tot het standaard variotherm spuitgieten. Dit komt doordat de matrijsverwarming uniformer verloopt bij het hybride variotherm spuitgieten.

8.2 Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek

Verder onderzoek is aangewezen om de hybride variotherm techniek verder te valideren en optimaliseren. Hiervoor zijn enkele aanbevelingen:

- Om een volledige vergelijking te kunnen maken over de drie technieken en hun bijhorende vloeilijn, kunnen er mechanische testen uitgevoerd worden op de sterkte van de vloeilijnen. Hieruit kan men vervolgens besluiten of de volledig verwijderde vloeilijn bij hybride variotherm spuitgieten wel degelijk sterker is dan de half verwijderde vloeilijn bij variotherm spuitgieten.
- Het hybride variotherm spuitgieten moet verder gevalideerd worden voor andere amorfe kunststof soorten. Het is interessant om deze methode ook uit te testen voor semi-kristallijne kunststoffen.
- De procesopbouw bij standaard variotherm spuitgieten kan aangepast worden, zodat de matrijsverwarming op een uniformere manier kan gebeuren. Dit zou kunnen door de aansluitingen van koelsslangen op manier aan te sluiten, zodat de linker en rechterzijde van de matrijsinzet op een gelijkmatige manier opwarmen en afkoelen.
- De koelkanalen bij de inzet van de voormatrijs gebruikt bij hybride variotherm spuitgieten, zijn momenteel geboord en niet optimaal gelegen. Deze koelkanalen kunnen geoptimaliseerd worden door de inzet te vervaardigen met Selective Laser Melting, waardoor de koelkanalen de contour van het product perfect volgen.
- Momenteel is het niet mogelijk om de inzet van de achtermatrijs individueel aan te sluiten. Hierdoor wordt zowel de achtermatrijs als de matrijsinzet op gelijke temperatuur verwarmd. Als uitbreiding kan men de aansluitingen van de inzet als de achtermatrijs scheiden, zodat ook de inzet van de achtermatrijs variotherm verwarmd kan worden. Hierdoor kan de kwaliteit van de vloeilijn eventueel nog verbeterd worden of de cyclustijd verlaagd worden.
- De standaard variotherm spuitgiettechniek met behulp van water kan omgebouwd worden tot een proces waarbij het keramisch element de matrijs opwarmt en water de matrijs afkoelt. Hierbij kan wederom een vergelijking gemaakt worden tussen cyclustijd en zichtbaarheid van de vloeilijn.

Literatuurlijst

- [1] Cel Kunststoffen, „Onderzoek kunststoffen,” [Online]. Available: <http://iiw.kuleuven.be/onderzoek/kunststoffen>.
- [2] W. Guilong, Z. Guoqun en G. Yanjin, „Research on a new variotherm injection molding and its application on the molding of a large LCD panel,” *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, nr. 7, pp. 671-681, 2009.
- [3] J. De Keyzer en R. Appermont, „Project: Implementatie en optimalisatie van het variotherm spuitgieten,” Oktober 2012. [Online]. Available: <http://www.innovatienetwerk.be/projects/2222>.
- [4] M. Worgull, „Hot Embossing: Theory and Technology of Microreplication,” *Burlington: Elsevier Inc*, 2009.
- [5] V. Goodship, „Practical Guide to Injection Moulding,” *Arburg*, pp. 1-259, 2004.
- [6] S. Unruh, „Injection Molding an IC into a Connector or Consumable Item,” Augustus 2010. [Online]. Available: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/4717>.
- [7] W. Guilong, Z. Guoqun en G. Yanjin, „Research of thermal response simulation and mold structure optimization for rapid heat cycle molding processes, respectively, with steam heating and electric heating,” *Materials & Design*, nr. 1, pp. 382-395, 2010.
- [8] H. I. Group, „Variotherm Technologie,” September 2010. [Online]. Available: <https://www.hofmann-innovation.com/technologies/variotherm-technologie.html>.
- [9] L. Xiping, Z. Guoqun en L. Huiping, „Research on thermal stress, deformation, and fatigue lifetime of the rapid heating cycle injection mold,” *Int J Adv Manuf Technol*, nr. 45, pp. 261-275, 2009.
- [10] S. Gorissen en B. Driessen, „Masterproef: Vergelijkende studie tussen variothermisch en hybride variothermisch,” *master in de industriële wetenschappen: elektromechanica*, pp. 21-23, 2013.
- [11] J. De Keyzer en R. Appermont, „Richtlijnen voor variotherm spuitgieten,” *tetra-project Variotherm Spuitgieten*, pp. 25-31, 2013.
- [12] K. Petrykowski en J. Fischer, „A study comparing electric, oil and pressurized water heating for composite molding,” *SINGLE Temperature Controls*, 2012.

- [13] Pitfalls In Moulding, „Weld line in moulding,” [Online]. Available: <http://www.pitfallsinmolding.com/weldlinepage.html>.
- [14] T. Tjäder en J. Seppälä, „Effect of material characteristics of polyolefins on weld line morphology and its correlation to mechanical properties,” *Journal Of Materials Science*, nr. 33, p. 923 — 931, 1998.
- [15] J. Bozzelli, „What to Do About Weak Weld Lines,” *Plastics Technology*, pp. 53-55, April 2008.
- [16] C. Chun-Sheng, C. Tsyng-Jang en C. Rean-Der , „Investigation on the weldline strength of thin-wall injection molded ABS parts,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, pp. 448-455, April 2007.
- [17] K. Sang-Gook en S. Nam, „Performance Prediction of Weldline Structure in Amorphous Polymers,” *Polymer Engineering And Science*, pp. 1200-1207, 1986.
- [18] R. Berger, G. Steinbichler, J. Giessauf en D. Gruber, „More Gloss, Fewer Weld Lines With Variothermal Molding,” *Plastics Technology*, Maart 2013.
- [19] L. Jong Cheol en P. Jung-Ki, „Weld-line characteristics of polycarbonate/acrylonitrile–butadiene–styrene blends. I. Effect of the processing temperature,” *Journal Of Applied Polymer Science*, pp. 689-699, 10 December 2004.
- [20] J. Bozzelli, „Injection Molding: You Must Dry Hygroscopic Resins,” Januari 2011. [Online]. Available: <http://www.ptonline.com/columns/you-must-dry-hygroscopic-resins>.
- [21] K. Suhas, „The 6-Step Study: Developing a Viscosity Curve to Optimize Injection Speeds,” *Frontier Injection Molding and Material Technologies*, pp. 1-5.
- [22] Autodesk, „Machine intensification ratio, calculating,” Oktober 2014. [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/search-result/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-09D7459C-9C22-4883-9D1E-62C9B14DF97C-htm.html>.
- [23] K. Suhas, „The 6-Step Study – Step 4 - The Process Window Study,” *Frontier Injection Molding and Material Technologies*, pp. 1-4.
- [24] Wikipedia, „p-waarde,” 30 Maart 2016. [Online]. Available: <https://nl.wikipedia.org/wiki/P-waarde>.

Bijlagen

Bijlage A: Makrolon 1260.....	90
Bijlage B: Resultaat DSC meting.....	93
Bijlage C: Demag Ergotech IntElect ET 50/300-100.....	93
Bijlage D: HB-THERM tempereerapparaten.....	95
Bijlage E: Stappenplan procesinitialisatie variotherm spuitgieten.....	99
Bijlage F: Keramisch verwarmingselement.....	103

Makrolon 1260

Impact modified grades / Low viscosity

MVR (300 °C/1.2 kg) 34 cm³/10 min; impact modified; low viscosity; easy release; injection molding - melt temperature 280 - 320 °C; available in light colors only

ISO Shortname

ISO 7391-PC,MPR,(,)-24-9

Property	Test Condition	Unit	Standard	Value
Rheological properties				
C Melt volume-flow rate	300 °C; 1.2 kg	cm ³ /10 min	ISO 1133	33
C Molding shrinkage, parallel	60x60x2 mm; 500 bar	%	ISO 294-4	0.65
C Molding shrinkage, normal	60x60x2 mm; 500 bar	%	ISO 294-4	0.7
Molding shrinkage, parallel/normal	Value range based on general practical experience	%	b.o. ISO 2577	0.5 - 0.7
Melt mass-flow rate	300 °C; 1.2 kg	g/10 min	ISO 1133	36
Mechanical properties (23 °C/50 % r. h.)				
C Tensile modulus	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	2350
C Yield stress	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	63
C Yield strain	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	5.8
C Nominal strain at break	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	> 50
Stress at break	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	55
Strain at break	50 mm/min	%	b.o. ISO 527-1,-2	100
Flexural modulus	2 mm/min	MPa	ISO 178	2350
Flexural strength	2 mm/min	MPa	ISO 178	93
Flexural strain at flexural strength	2 mm/min	%	ISO 178	6.8
Flexural stress at 3.5 % strain	2 mm/min	MPa	ISO 178	72
C Charpy impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	N
C Charpy impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	N
Charpy impact strength	-60 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	N
Charpy notched impact strength	23 °C; 3 mm	kJ/m ²	ISO 7391/b.o. ISO 179-1eA	55P
Charpy notched impact strength	-30 °C; 3 mm	kJ/m ²	ISO 7391/b.o. ISO 179-1eA	14C
Izod notched impact strength	23 °C; 3.2 mm	kJ/m ²	b.o. ISO 180-A	65P
Izod notched impact strength	-30 °C; 3.2 mm	kJ/m ²	b.o. ISO 180-A	14C
C Puncture maximum force	23 °C	N	ISO 6603-2	4800
C Puncture maximum force	-30 °C	N	ISO 6603-2	5700
C Puncture energy	23 °C	J	ISO 6603-2	50
C Puncture energy	-30 °C	J	ISO 6603-2	55
Ball indentation hardness		N/mm ²	ISO 2039-1	114

Makrolon 1260

Property	Test Condition	Unit	Standard	Value
Thermal properties				
C Glass transition temperature	10 °C/min	°C	ISO 11357-1,-2	142
C Temperature of deflection under load	1.80 MPa	°C	ISO 75-1,-2	122
C Temperature of deflection under load	0.45 MPa	°C	ISO 75-1,-2	135
C Vicat softening temperature	50 N; 50 °C/h	°C	ISO 306	142
Vicat softening temperature	50 N; 120 °C/h	°C	ISO 306	143
C Coefficient of linear thermal expansion, parallel	23 to 55 °C	10 ⁻⁴ /K	ISO 11359-1,-2	0.7
C Coefficient of linear thermal expansion, transverse	23 to 55 °C	10 ⁻⁴ /K	ISO 11359-1,-2	0.7
C Burning behavior UL 94 [UL recognition]	0.75 mm	Class	UL 94	V-2
C Oxygen index	Method A	%	ISO 4589-2	30
Thermal conductivity	23 °C	W/(m·K)	ISO 8302	0.20
Resistance to heat (ball pressure test)		°C	IEC 60695-10-2	134
Relative temperature index (Tensile strength) [UL recognition]	1.5 mm	°C	UL 746B	115
Relative temperature index (Tensile impact strength) [UL recognition]	1.5 mm	°C	UL 746B	105
Relative temperature index (Electric strength) [UL recognition]	1.5 mm	°C	UL 746B	125
Glow wire test (GWFI)	0.75 mm	°C	IEC 60695-2-12	875
Glow wire test (GWFI)	1.5 mm	°C	IEC 60695-2-12	900
Glow wire test (GWFI)	3.0 mm	°C	IEC 60695-2-12	960
Glow wire test (GWT)	0.75 mm	°C	IEC 60695-2-13	875
Glow wire test (GWT)	1.5 mm	°C	IEC 60695-2-13	875
Glow wire test (GWT)	3.0 mm	°C	IEC 60695-2-13	900
Needle flame test	Method K; 1.5 mm	s	IEC 60695-11-5	5
Needle flame test	Method K; 2.0 mm	s	IEC 60695-11-5	5
Needle flame test	Method K; 3.0 mm	s	IEC 60695-11-5	10
Needle flame test	Method F; 1.5 mm	s	IEC 60695-11-5	60
Needle flame test	Method F; 2.0 mm	s	IEC 60695-11-5	120
Needle flame test	Method F; 3.0 mm	s	IEC 60695-11-5	120
Burning rate (US-FMVSS)	>=1.0 mm	mm/min	ISO 3795	passed
Flash ignition temperature		°C	ASTM D1929	460
Self ignition temperature		°C	ASTM D1929	540
Electrical properties (23 °C/50 % r. h.)				
C Relative permittivity	100 Hz	-	IEC 60250	3.1
C Relative permittivity	1 MHz	-	IEC 60250	3.0
C Dissipation factor	100 Hz	10 ⁻⁴	IEC 60250	10
C Dissipation factor	1 MHz	10 ⁻⁴	IEC 60250	100
C Volume resistivity		Ohm·m	IEC 60093	1E14
C Surface resistivity		Ohm	IEC 60093	1E16
C Electrical strength	1 mm	kV/mm	IEC 60243-1	34
C Comparative tracking index CTI	Solution A	Rating	IEC 60112	250
Comparative tracking index CTI M	Solution B	Rating	IEC 60112	125M
Electrolytic corrosion		Rating	IEC 60426	A1
Other properties (23 °C)				
C Water absorption (saturation value)	Water at 23 °C	%	ISO 62	0.30
C Water absorption (equilibrium value)	23 °C; 50 % r. h.	%	ISO 62	0.12
C Density		kg/m ³	ISO 1183-1	1200
Bulk density	Pellets	kg/m ³	ISO 60	640

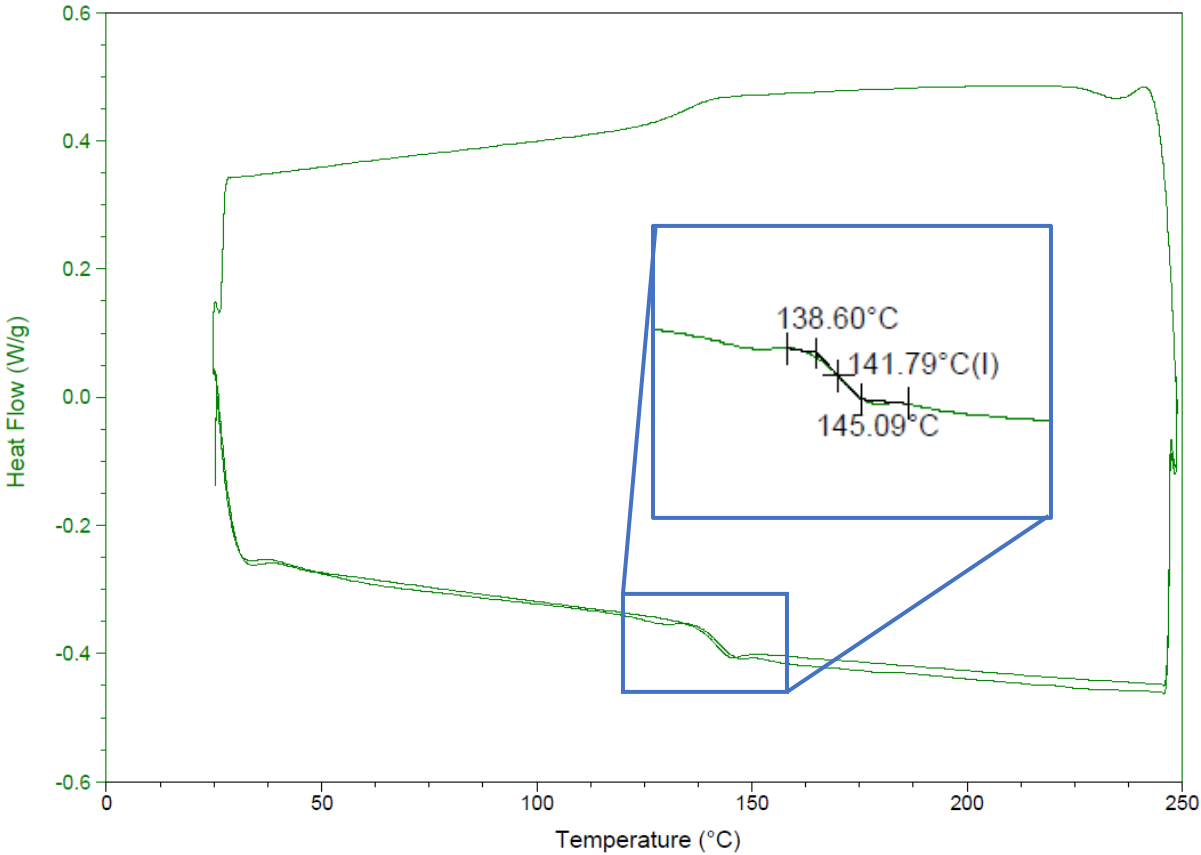
Makrolon 1260

Property	Test Condition	Unit	Standard	Value
Processing conditions for test specimens				
C Injection molding-Melt temperature		°C	ISO 294	280
C Injection molding-Mold temperature		°C	ISO 294	80
C Injection molding-Injection velocity		mm/s	ISO 294	200

C These property characteristics are taken from the CAMPUS plastics data bank and are based on the international catalogue of basic data for plastics according to ISO 10350.

Impact properties: N = non-break, P = partial break, C = complete break

Bijlage B: Resultaat DSC meting



Bijlage C: Demag Ergotech IntElect ET 50/300-100

Spuiteenheid		
Schroefdiameter	mm	22
Schroeflengte standaard	L/D	20
Plastificeeropbrengst standaard	gram/s	6,7
Doseerlengte	mm	105
Schroeftoerental	/min	
Inspuitstroom	cm ³ /s	112
Maximaal slagvolume	cm ³	39
Specifieke spuitdruk	bar	2580
Specifieke spuitdruk verhoogd	bar	
Slag spuitneus	mm	200
Perskracht spuitneus	kN	30
Verwarmingsvermogen	kW	5,1
Aantal verwarmingszones		4
Sluiteenheid		
Sluitkracht	kN	500
Slag bewegende opspanplaat	mm	260
Kracht uitwerper	kN	25
Slag uitwerper	mm	80
Minimale matrijshoogte	mm	150
Maximale afstand tussen platen	mm	610
Vergrootte opspanplaat	mm	490 x 500
Afstand tussen holmen	mm	330 x 330
Droogloop (Euromap 6) ~ slag	sec ~mm	1,35 ~ 231
Aandrijving		
Direct drive motoren		
Gewicht		
Netto (zonder olie)	kg	3300
Afmetingen		
Lengte x breedte x hoogte	m	3,97 x 1,19 x 1,79

Bijlage D: HB-THERM tempereerapparaten

HB-THERM[®] THERMO-5

Temperature Control Units
Product Catalogue 2015-10



Technical Data

Standard Equipment

Hydraulics	Closed system without oxygen contact, with efficient automatic deaeration, automatic filling	
	Temperature measurement in main line and return line with sensor Pt 1000	
	Continuous maintenance-free ultrasonic flow meter	
	Low-scaling and pressure shock-free cooling with cooling water filter and proportional valve	
	Proportionally controlled cooler bypass (on units over 100 °C)	
	Stainless steel pump without mechanical seal; Energy efficiency class IE2	
	Hydraulic circuit made of non-corroding materials	
	No direct contact between heating elements and heat transfer medium	
	Easy to modify for separate supply of system water	
	Booster pump for system filling (on water units over 100 °C)	
	Controlled superimposed system pressure (on water units)	
	Bypass and return line filter	
	Heat transfer circuit with superimposed cold oil (on oil units)	
	Tank with level measuring for expansion and mould evacuation (on oil units)	
	Functions	Mould evacuation with pump reverse (on water units in drain)
Even load distribution at all heating stages with solid-state relays		
Auto-tuning cascade control		
Control on either main line or return line (or external sensor ZE)		
Continuous cooling and automatic switch-off programme		
Change-over to second nominal value		
Nominal value ramp and ramp programme		
Monitoring / Safety	Cyclical system water exchange selectable	
	Automatic limit value setting	
	Monitoring of various process parameters	
	Hose rupture and leakage monitor	
	Sensor failure monitor	
	Pump and heater current monitor	
	Dry-running protection	
	Triple safety cut-out for heating	
	Depressurised at unit OFF	
	Safety relief valve and pressure gauge on rear of unit	
Command / Display	Automatic phase direction adaptation and phase monitor	
	Lockable and abrasion resistant castors (PUR)	
	TFT-Colour display 3,5" with interactive user guidance in 18 languages	
	Help button with context sensitive information	
	Display of flow rate, pump pressure and process power	
	Large choice of display windows and values	
	Temperature display in 0,1 °C	
	Units of measurement for temperature, flow rate and pressure can be set	
	Visual and acoustic alarms; volume adjustable	
	Store function for mould specific parameters	
	Display of date and time	
	Timer	
Interface	USB	Hours run counter and service interval display
	HB	Logbook for alarms
		Data input password protected
	USB	Connection (Host / Device) for software updates, parameter transfer and data recording
	HB	HB-Therm data interface CAN to connect modular units, flow meters Flow-5 and switching units Vario-5 (1 socket Sub-D 15 pin, female)

Note: Modular units do not have a proper command

Additional Equipment

ZL	Leak stopper	With automatic depression optimisation (up to 70 °C)
ZB	Connection for alarm and external control	Alarm using potential-free contact (rating max. 250 VAC, 4 A) Unit ON/OFF, ramp programme ON/OFF and switching nominal value 1 or 2 using potential-free contact 1 socket Harting Han 7D (male)
ZE	Connection for external sensor	Thermocouple type J, K, T or Pt 100 in 3-wire system, with selectable production detector 1 socket Audio 5 pin (female)
ZD	Interface DIGITAL	Serial data interface 20 mA, RS-232 or RS-422/485 Various protocols selectable: Arburg, Bühler, Dr. Boy, Engel, Ferromatik Milacron, KraussMaffei, MODBUS (RTU-Mode), Negri Bossi, SPI, Stork, Sumitomo Demag, Wittmann Battenfeld 2 sockets Sub-D 25 pin (female)
ZC	Interface CAN	Serial data interface CAN-bus (Sumitomo Demag) and CANopen (EUROMAP 66) To remotely control singular units 2 sockets Sub-D 9 pin (1 male / 1 female)
ZP	Interface PROFIBUS-DP	Serial data interface PROFIBUS-DP 1 socket Sub-D 9 pin (female); not possible with ZC
ZU	Pump status monitor	Additional pressure sensor in main line
ZK	Keyboard-protection	Transparent flap over display and controls
ZR	Clean room package	Clean room capable version: 'At Rest' < ISO class 6 (class 1000) 'In Operation' ISO class 7 (class 10 000) Fibre-free insulation Quality test with report

Singular unit



Modular unit



Temperature control units Thermo-5 are available as singular or modular units. Contrary to singular units, modular units do not have a proper command and display. They can only be controlled via a singular unit or a control module Panel-5 but thus enable a common changing of parameters as well as a remote control. The units are linked to the master and among each other always via the interface HB.

Further, modular units have a cost advantage over the singular units and are distinguished from the latter by adding the letter **M** to the unit designation (e. g. HB-140ZM1).

Communication (→P. 11, Fig. 1)

180 °C

Single Units
Water

Technical Specifications

Temperature control unit		Heat transfer medium	Water	
		Cooling	Indirect	
Type	with maximum main line temperature in °C	Housing size (→P. 13, Fig. 5)	HB-180Z	
			2	3
Heating (→P. 12, Fig. 2)	kW	8	●	
		16	○ ¹⁾	●
		32		○
Pump (→P. 12, Fig. 3)	sealless, stainless; 0,5 kW; 30 L/min, 52 m	2M	●	
	sealless, stainless; 1,0 kW; 50 L/min, 70 m	4M	○ ¹⁾	●
	sealless, stainless; 2,8 kW; 110 L/min, 70 m	6M		○ ¹⁾
	sealless, stainless; 3,5 kW; 160 L/min, 70 m	8M		○
Cooling (→P. 12, Fig. 4)	30 kW @ 60 K	A2	●	●
	50 kW @ 60 K	B2		○
	90 kW @ 60 K	C2		○
Additional equipment				
	Connection for alarm and external control	ZB	○	○
	Connection for external sensor	ZE	○	○
	Interface DIGITAL	ZD	○	○
	Interface CAN	ZC	○	○
	Interface PROFIBUS-DP	ZP	○	○
	Pump status monitor	ZU	○	○
	Keyboard-protection	ZK	○	○
	Clean room package	ZR	○	○
Mains voltage	400 V (380–415 V), 50 Hz; 3LPE	405	●	●
	400 V (380–415 V), 60 Hz (50/60 Hz); 3LPE	406	○	○
	210 V (200–220 V), 50 Hz; 3LPE	215	○	○
	210 V (200–220 V), 60 Hz (50/60 Hz); 3LPE	216	○	○
	460 V (440–480 V), 60 Hz; 3LPE	466	○	○

Ordering example: HB-180Z2-16-4M-A2-ZE-ZD, 405, English

Maximum main line temperature	°C	180	180	
Dimensions (→P. 13/14, Fig. 5)	Height	mm	700	850
	Width	mm	240	300
	Depth	mm	661	982
Weight max.	kg	74	158	
Circulating volume in unit	approx.	L	2,1	6,5
Connection, main/return line	Thread		G¾	G1 ¼
	Resistance	bar, °C	25, 200	25, 200
Connection, cooling water	Pressure	bar	2–5	2–5
	Thread		G¾	G¾
	Resistance	bar, °C	10, 100	10, 100
Connection, separate system water	Pressure	bar	2–5	2–5
	Thread		G¾	G½
	Resistance	bar, °C	10, 100	10, 100
Drain	Thread		G¾	G½

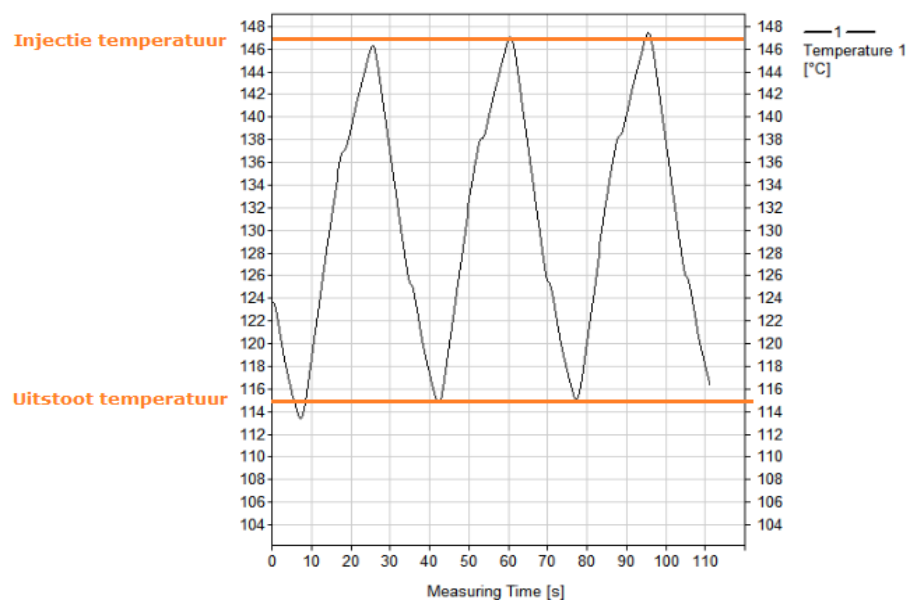
Bijlage E: Stappenplan procesinitialisatie variotherm spuitgieten

- 1) De temperatuur van de warm en koudwater-eenheid moet eerst gekozen worden. Hierbij wordt de **warme eenheid** ingesteld op zijn maximale waarde van **180°C**. Hierdoor wordt de matrijs zo snel mogelijk opgewarmd. Dit is cruciaal, want het opwarmen is de langste stap in een variotherm proces. Vervolgens kiest men de koude eenheid, zodat het afkoelen een steil verloop kent. Zo wordt de **koude eenheid** ingesteld op **85°C**.
- 2) Vervolgens moet de verwarmtijd en koeltijd van de variotherm eenheid ingesteld worden op een voorlopige temperatuur. De **verwarmtijd** wordt zo gekozen, dat de glastransitietemperatuur bereikt wordt, namelijk **±142°C**. De **koeltijd** wordt lang genoeg gekozen, zodat tijdens het afkoelen de temperatuur van de koude koeler bereikt wordt, namelijk **85°C**.
- 3) Het doseervolume wordt vervolgens bepaald. Hiervoor wordt de **doseerlengte** initieel ingesteld op de waarde bij conventioneel spuitgieten, namelijk **45mm**. Vervolgens worden de andere parameters ingesteld:
 - **Massatemperatuur = 320°C** (waarde opgegeven door producent).
 - **Snelheid = 150 mm/s** (middelste waarde in gebied van spuitgietmachine).
 - **Nadruk = 0** (nog geen nadruk opgeven hier).
 - **Spuitdruk = 2580 bar** (maximale druk mogelijk van spuitgietmachine).
 - **Koeltijd spuitgietmachine = 20 seconden** (voldoende lang, zodat het product gekoeld is).

We gaan een eerste maal injecteren bij deze parameterinstellingen. Dit op het punt waarbij de matrijstemperatuur zijn maxima bereikt. In deze stap komt deze temperatuur overeen met de glastransitietemperatuur van het kunststof (**±142°C**). **In het verder verloop van het stappenplan injecteren we steeds op het punt waarbij de matrijstempartuur zijn maxima bereikt, tenzij anders vermeldt.** Nadien verhogen we de doseerlengte stapsgewijs, zodat het product voor 100% gevuld is (doseerlengte = 53mm). Dit in tegenstelling tot conventioneel spuitgieten, waarbij de doseerlengte geregeld wordt tot 95%. De reden hiervoor is dat de vloeifronten elkaar al hebben ontmoet voor de nadruk. Hierdoor vormt de vloeilijn al voordat de nadruk begint [11].

- 4) Nadat de doseerlengte bepaald is, gaan we de **nadruk** regelen zodat er een visueel goed product (geen inval of braamvorming) gevormd wordt, namelijk **590bar**.

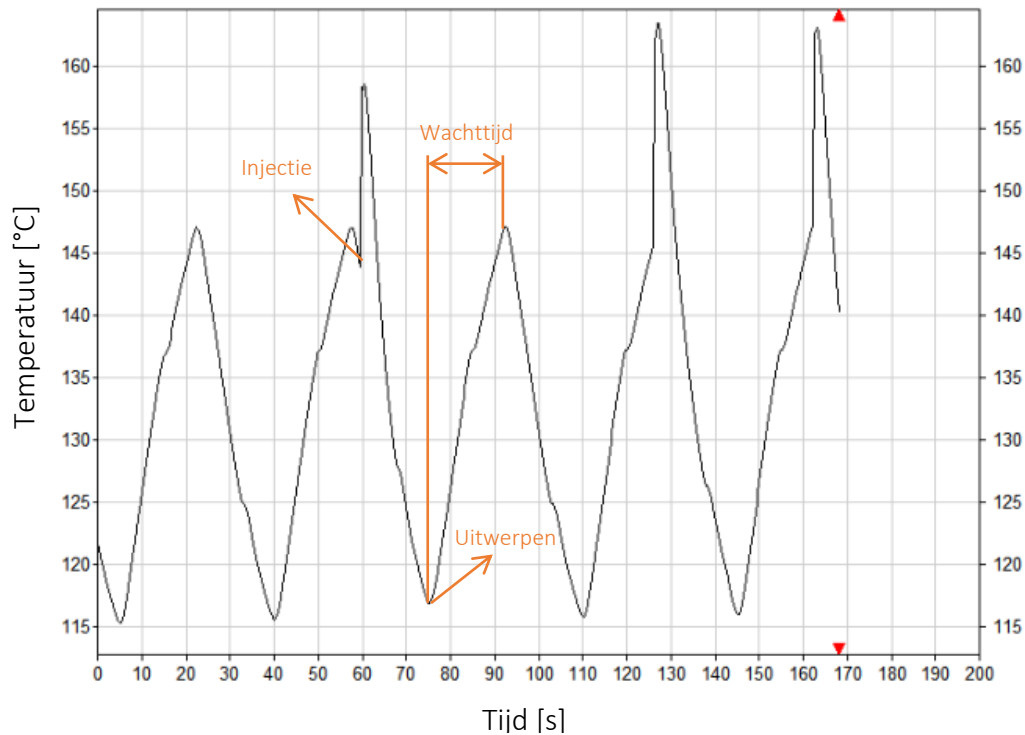
- 5) Vervolgens gaan we de koeltijd van de variotherm eenheid regelen, zodat het product volledig gekoeld is. We injecteren en laten de koeltijd stapsgewijs dalen, totdat het product vervormd ten gevolge van de uitstoters. Vervolgens verhogen we de koeltijd terug zodat het product deze vervorming net niet meer vertoont. De matrijstemperatuur waarbij het product uitgeworpen wordt, onthouden we als **onderste temperatuurgrens** in het variotherm proces, namelijk **115°C**.
- 6) Nadat de koeltijd op de variotherm eenheid bepaald is, gaan we de verwarmtijd van de eenheid bepalen. Hiervoor regelen we de verwarmtijd van de variotherm eenheid, zodat de maximale temperatuur een waarde heeft boven de glastransitietemperatuur van het kunststof. Deze temperatuur onthouden we als **bovenste temperatuurgrens** in het variotherm proces, namelijk **147°C**. Bekend vanaf dit punt zijn bovenste temperatuur of injectietemperatuur en onderste temperatuur of uitwerp temperatuur. Hierdoor ontstaat er een variotherm temperatuursverloop



Figuur 51: Bovenste en onderste temperatuurgrens bepaald

- 7) Injecteer op het ogenblik dat de matrijstemperatuur zijn injectietemperatuur bereikt heeft. Meet vanaf hier die tijd die nodig is om het product volledig te koelen. Stel deze tijd in op de spuitgietmachine als koeltijd. Controleer of deze tijd correct is gekozen door opnieuw in te spuiten op een top, en controleer of de temperatuur terug stijgt na uitwerpen van het product. Indien niet, moet de tijd bijgesteld worden.
- 8) Omdat de matrijs van een lage temperatuur tijdens het uitwerpen naar een hoge temperatuur moet voor het injecteren, moet er een wachttijd ingesteld worden. Deze wachttijd stelt de tijd voor dat de spuitgietmachine wacht, totdat hij aan zijn volgende cyclus begint. Spuitgiet één shot, en meet de tijd die nodig is om van de uitstoottemperatuur tot de injectietemperatuur te verwarmen. Stel deze tijd in als wachttijd in de spuitgietmachine.

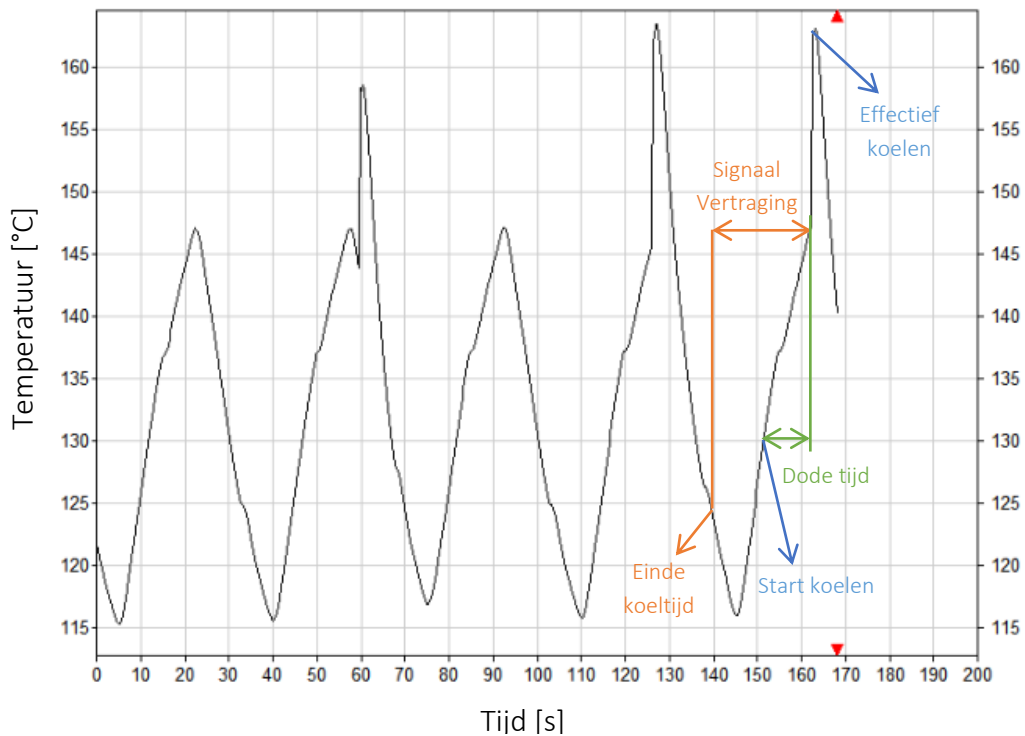
Laat de machine volcontinu spuitgieten, en regel de wachttijd bij totdat het de machine inspuut bij de injectietemperatuur.



Figuur 52: Bepalen wachttijd spuitgietmachine

- 9) Als laatste stap gaan we een connectie leggen tussen het spuitgietmachine en de variotherm eenheid. Met behulp van deze connectie kunnen we een synchrone werking verkrijgen tussen het spuitgietmachine en de variotherm eenheid. Dit zorgt ervoor dat er op het juiste moment geïnjecteerd en uitgeworpen wordt. Deze connectie is gebaseerd op een signaal welk afkomstig is van de spuitgietmachine. Dit signaal zal een trigger geven aan de variotherm eenheid om te koelen. Het meest eenvoudige zou zijn een signaal te kiezen net na het inspuiten. Maar op deze manier wordt er geen rekening gehouden met de dode tijd die aanwezig is. Deze dode tijd, is de tijd tussen het signaal en de verandering van matrijstemperatuur.

Omwille van deze dode tijd, kiezen we een signaal bij einde koeltijd van de vorige cyclus. Maar dit signaal moeten we een tijdsvertraging geven, zodat het signaal pas doorgestuurd wordt op het gewenste moment. Deze vertraging is gelijk aan de tijd tussen einde koeling van vorige cyclus en het effectief gewenst koelen, verminderd met de dode tijd. Figuur 53 toont deze tijden aan.



Figuur 53: Dode tijd en tijdsvertraging bij signaal

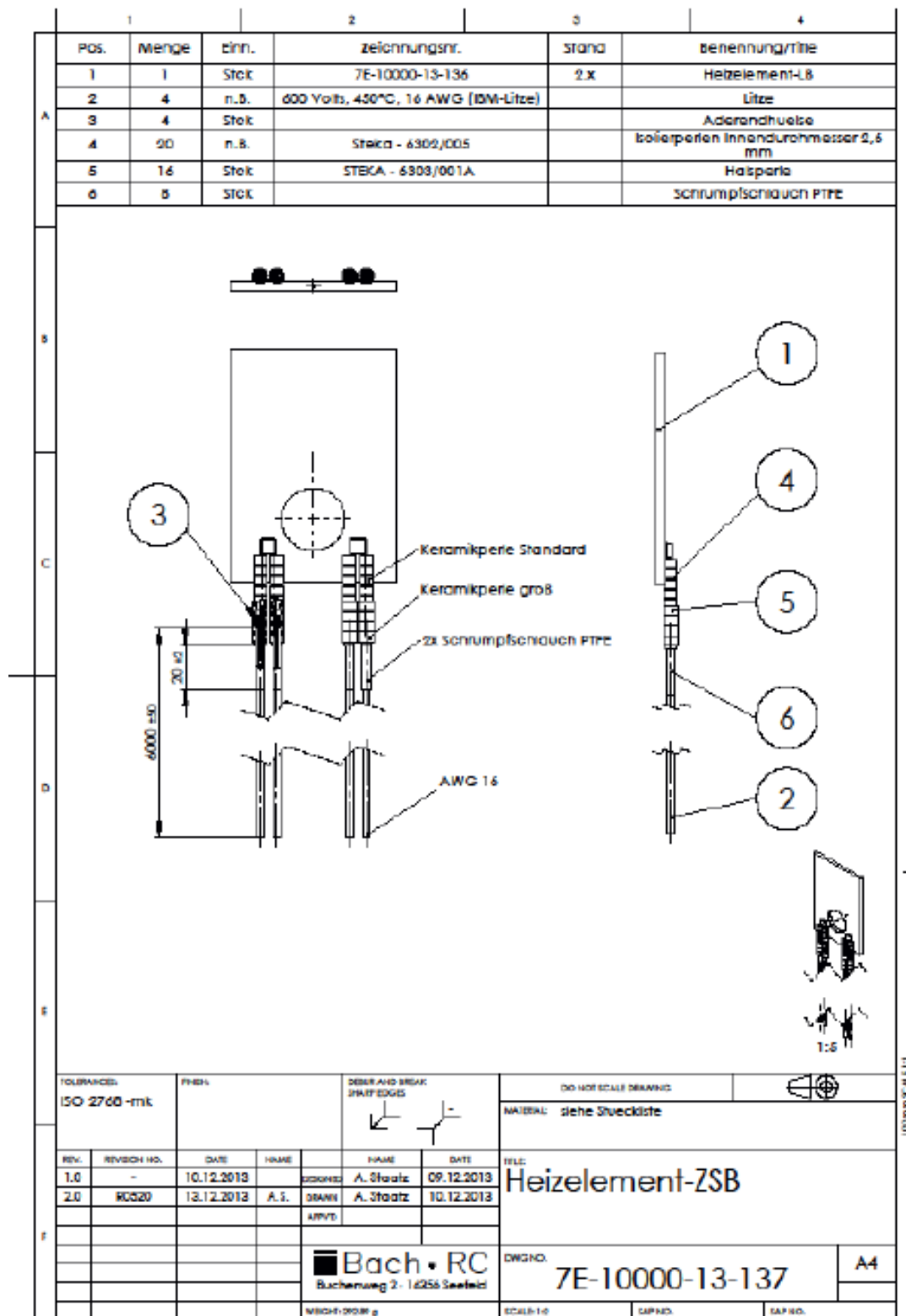
Om het stappenplan af te ronden, verhogen we de verwarmtijd tot een hoge waarde die niet bereikt wordt. Hierdoor zal het systeem zolang verwarmen, totdat het signaal gegeven wordt om te koelen.

Aanpassingen/fijnregelen

Indien het proces aangepast of fijn geregeld moet worden, kan dit met deze drie regels:

- **De bovenste temperatuurgrens verhogen/verlagen:**
Wachttijd en tijdsvertraging van het signaal verhogen/verlagen met gelijke waarden.
- **De onderste temperatuurgrens verhogen/verlagen:**
Koeltijd van spuitgietmachine en variotherm eenheid verhogen/verlagen met gelijke waarden.
- **Het product eerder/later uitwerpen:**
Koeltijd van spuitgietmachine verlagen/verhogen.

Bijlage F: Keramisch verwarmingselement



Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

Vergelijkende studie tussen conventioneel, variotherm en hybride variotherm spuitgieten

Richting: **master in de industriële wetenschappen: elektromechanica**

Jaar: **2016**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Evens, Tim

Datum: **6/06/2016**