

Woord vooraf

Wij hebben de kans gekregen om onze masterproef uit te voeren op Cel Kunststoffen, een onderzoekscentrum van de KU Leuven op de Technologicampus Diepenbeek. Deze spannende, intensieve en vooral leerrijke ervaring maakt deel uit van onze opleiding master industriële wetenschappen Elektromechanica.

Onze interesse in de kunststofsector werd aangewakkerd in de lessen materiaalkunde van de academische bachelor, waarbij een korte inleiding gegeven werd omtrent kunststoffen. De kunststofindustrie is een brede en innovatieve sector, waar veel ruimte is voor onderzoek. Vandaar de keuze om voor onze masterproef onderzoek uit te voeren binnen de kunststofsector.

Graag willen we iedereen bedanken die een bijdrage heeft geleverd aan deze masterproef. In het bijzonder willen we eerst onze promotor prof. dr. ir. Albert Van Bael en onze copromotor prof. dr. ir. Jozefien De Keyzer bedanken voor hun tijd en hun goede begeleiding met de daarbij horende opbouwende kritiek.

Daarnaast willen we onze dagelijkse begeleider ing. Tim Evens, maar ook ing. Gert-Jan Bex, bedanken. Dit niet alleen voor al de hulp en hun advies, maar ook voor de goede sfeer die heeft bijgedragen tot het uitvoeren van deze masterproef.

Eveneens willen we dr. ir. Olivier Malek van Sirris bedanken voor zijn steun en enthousiasme in de uitvoering van onze masterproef. Dankzij zijn goede bijstand bij het textureren van onze matrijsinzet hebben we onze masterproef kunnen verwezenlijken.

Tot slot bedanken we ook graag onze ouders voor hun steun en vertrouwen gedurende onze volledige opleiding en in het bijzonder het laatste jaar bij het uitwerken van de masterproef.

Stef Ceyssens

Tiber Daubies

Diepenbeek, juni 2017

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	14
1.3 Doelstellingen	14
2 Literatuurstudie	15
2.1 Spuitgieten	15
2.1.1 Spuitgietproces	15
2.1.2 Variotherm spuitgieten	17
2.2 Procesvenster	18
2.3 Microtexturen	20
2.3.1 Inleiding tot hydrofobe microtexturen	20
2.3.2 Kegelvormige of cilindervormige microtextuur	21
2.3.3 Overdracht van microtextuur binnen spuitgietproces	23
2.4 Werkingsprincipe van een lasertextureermachine	25
3 Materiaal en methode	27
3.1 Kunststof	27
3.2 Spuitgietmachine	28
3.3 Matrijs	29
3.4 Ontwerp matrijsinzet	30
3.4.1 Bodemblok	31
3.4.2 De bovenplaat	36
3.4.3 Productplaatje	36
3.4.4 Product	37
3.5 Lasertextureermachine	39
3.6 Methode	41
3.6.1 Design of Experiments	41
3.6.2 Variotherm	44
4 Resultaatanalyse	45
4.1 Conventioneel spuitgieten	45
4.1.1 Procesvenster opstellen	45

4.1.2	Beschrijving van de DoE-analyse	48
4.1.3	Resultaten textuuroverdracht.....	49
4.1.4	Resultaten contacthoekmetingen	56
4.1.5	Optimale machine-instellingen.....	62
4.1.6	Relatie tussen contacthoek en textuurhoogte.....	63
4.1.7	Textuurhoogte en contacthoek over de lengte van het product	65
4.1.8	Vergelijking van de contacthoek tussen verschillende texturen.....	67
4.2	Variotherm	68
4.3	Visuele weergave van het waterafstotend karakter	70
5	Bespreking eindresultaten	75
5.1	Conclusie	75
5.2	Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek	76
	Literatuurlijst	79
	Bijlagen.....	83

Lijst van tabellen

Tabel 1: Gebruikte texturen [18]	21
Tabel 2: Resultaten debietsimulatie NX10.....	34
Tabel 3: Afmetingen van de verschillende microtexturen	38
Tabel 4: Satsuma laserbron specificaties (zie bijlage E)	39
Tabel 5: Specificaties XY-geleidingen.....	40
Tabel 6: 16 verschillende instellingsmogelijkheden waarbij spuitgietparameters afwisselend hoog of laag worden gezet.....	42
Tabel 7: Metingen voor het opstellen van de viscositeitscurve van PP.....	45
Tabel 8: Metingen voor het opstellen van de viscositeitscurve van PS.....	46
Tabel 9: Onder- en bovengrenzen van de parameters voor de DoE.....	49
Tabel 10: Optimale parameters en resultaten voor PP	62
Tabel 11: Optimale parameters en resultaten voor PS	62

Lijst van figuren

Figuur 1: Proceshal van Cel Kunststoffen [3]	13
Figuur 2: Voorbeeld van microtextuur [4]	13
Figuur 3: Spuitgietmachine [7].....	15
Figuur 4: Grafiek variotherm spuitgieten [8]	17
Figuur 5: Conventioneel spuitgieten vs variotherm spuitgieten [9]	17
Figuur 6: Voorbeeld viscositeitscurve [10]	18
Figuur 7: Voorbeeld procesvenster	19
Figuur 8: Het lotusblad (links) [14], textuur van lotusblad (rechts) [13]	20
Figuur 9: Gedrag van een druppel op een ruw oppervlak a) Wenzel b) Combinatie van Wenzel en Cassie-Baxter c) Cassie-Baxter [16]	20
Figuur 10: Sinusvormige microtextuur op een microtextuur van afgeknotte kegels [17]	21
Figuur 11: Textuur 1 van gemaakte producten [18].....	21
Figuur 12: Contacthoek van elke textuur [18].....	22
Figuur 13: Bovenaanzicht van het productplaatje met 8 microgroeven [21]	24
Figuur 14: Product uit het onderzoek van Y.Heijligen [5]	25
Figuur 15: Betekenis van de ‘pulse duration’ (links) en van de ‘pulse repetition rate’ (rechts) [24]	26
Figuur 16: Principe belangrijkste deelsysteem bij lasertexturering [25]	26
Figuur 17: De ENGEL ES 200/35 HL gebruikt voor dit onderzoek.	28
Figuur 18: Benchmarkmatrijs.....	29
Figuur 19: Open matrijs met matrijsinzet.....	29
Figuur 20: Oud ontwerp met keramische verwarmingselement.....	30
Figuur 21: Huidige ontwerp matrijsinzet	31
Figuur 22: De bodemblok.....	31
Figuur 23: Voorbeeld scenario.....	32
Figuur 24: Gesimuleerde scenario's met koelkanaalaansluitingen: onder (a), boven-onder (b), links-rechts_v1 (c), links-rechts_v2 (d).....	32
Figuur 25:Stromings simulaties van de snelheid in mm/s	33
Figuur 26: Simulatie bij een totaaldebiet van 5l/min	34
Figuur 27: Doorsnede bodemblok	35
Figuur 28: Testen van warmteverdeling in koelkanalen met een thermische camera.....	35
Figuur 29: Bevestiging tussenplaat (links) en de onderkant van de tussenplaat (rechts)	36
Figuur 30: Vlak productplaatje (links), kunststofproduct (rechts)	36
Figuur 31: Kunststofproduct met 3 stroken van verschillende microtexturen	37
Figuur 32: 2D in het xy-vlak van de textuur op de matrijs gemeten met de microscoop van de lasermachine en 3D textuur matrijs gemeten met de MikroCAD 3D microscoop.....	37
Figuur 33: 2D van textuurdiepte in matrijs gemeten met de MikroCAD 3D microscoop	37
Figuur 34: Texturen van het kunststofproduct met de afmetingen tussen de textuurkegels gegeven. ...	38
Figuur 35: Afmetingen van de microtextuur van een deeltje van het sample; a) 3D-tekening van de microtextuur, b) zijaanzicht, c) bovenaanzicht.....	38
Figuur 36: De Lasea LS5 lasertextureermachine [33].....	39
Figuur 37: MikroCAD 3D microscoop [35].....	42
Figuur 38: Posities voor de metingen van de textuurhoogte	43
Figuur 39: Meetopstelling contacthoekmeter	43
Figuur 40: Mogelijke druppelvormen op vast oppervlak [36]	44
Figuur 41: Posities van de contacthoekmetingen bij textuur1 en textuur 3.....	44
Figuur 42: Viscositeitscurve PP	46
Figuur 43: Viscositeitscurve PS	47

Figuur 44: Procesvenster PP.....	47
Figuur 45: Procesvenster PS.....	48
Figuur 46: 3D van textuur op kunststofproduct	49
Figuur 47: Resultaten van textuurhoogte bij PP uit Minitab.....	50
Figuur 48: hoofdeffecten op textuurhoogte bij PP vanuit Minitab.....	51
Figuur 49: De hoofdeffecten van de verschillende parameters op de textuurhoogte bij PS.....	51
Figuur 50: Effecten van de interacties tussen de parameters bij de textuurhoogte van PP	52
Figuur 51: Effecten van de interacties tussen de parameters bij de textuurhoogte van PS	53
Figuur 52: Pareto analyse bij de textuurhoogte van PP	54
Figuur 53: Pareto-analyse bij de textuurhoogte van PS	55
Figuur 54: Contacthoekmetingen	56
Figuur 55: Resultaten van contacthoek bij PP uit Minitab.....	57
Figuur 56: De hoofdeffecten van de verschillende parameters op de contacthoek bij PP	58
Figuur 57: De hoofdeffecten van de verschillende parameters op de contacthoek bij PS	58
Figuur 58: Interacties van de parameters op de contacthoek van PP	59
Figuur 59: Interacties van de parameters op de contacthoek van PS	60
Figuur 60: Pareto-analyse bij de contacthoek van PP	60
Figuur 61: Pareto-analyse bij de contacthoek van PS	61
Figuur 62: Contacthoek in functie van de textuurhoogte voor PP	63
Figuur 63: Contacthoek in functie van de textuurhoogte voor PS	64
Figuur 64: Textuurhoogte op verschillende posities op het product van PP.....	65
Figuur 65: Contacthoek op verschillende posities op het product van PP	66
Figuur 66: Contacthoek bij verschillende texturen van PP	67
Figuur 67: Kegelvorm bij conventioneel met lage instellingen, conventioneel met hoge instellingen en variotherm	68
Figuur 68: Druppel op ongetextureerd oppervlak bij helling van 0°.....	70
Figuur 69: Druppel op ongetextureerd oppervlak bij helling van 15°.....	70
Figuur 70: Druppel op ongetextureerd oppervlak bij helling van helling van 75°	71
Figuur 71: Druppel op ongetextureerd oppervlak bij helling van 90°.....	71
Figuur 72: Druppel op getextureerd oppervlak bij helling van 0°	72
Figuur 73: Druppel op getextureerd oppervlak bij helling van 15°.....	72
Figuur 74: Rollende druppel op getextureerd oppervlak bij helling van 16°	73
Figuur 75: Druppel op getextureerd oppervlak bij helling van 16°.....	73

Abstract

Op de Technologicampus Diepenbeek (KU Leuven) voert de onderzoeksgroep Cel Kunststoffen, in samenwerking met het Precision Manufacturing Lab van Sirris, onderzoek uit naar toepassingen van lasergetextureerde matrijzen in een spuitgietproces. Deze masterproef focust op de overdracht van microgetextureerde oppervlakken op kunststofproducten. In aansluiting hierbij wordt de invloed van de oppervlaktetextuur op de contacthoek van het kunststofproduct met water onderzocht vermits het doel erin bestaat om het product waterafstotend te maken.

Door uitvoering van een *full factorial design of experiments* werd de invloed van spuitgietparameters op de overgenomen textuurhoogte en contacthoek bepaald. De gebruikte kunststoffen voor dit onderzoek zijn een amorf thermoplast (polystyreen, PS) en een semi-kristallijne thermoplast (polypropyleen, PP). Via lasertexturering is er een $\pm 60\mu\text{m}$ diepe kegelvormige textuur op de matrijs aangebracht.

Uit de resultaten blijkt dat een hoge injectiesnelheid, matrijs- en injectietemperatuur de belangrijkste machine-instellingen zijn voor een verhoging in textuurhoogte en contacthoek. Voor PP en PS is een maximale textuurhoogte van respectievelijk $\pm 55\mu\text{m}$ en $\pm 25\mu\text{m}$ bereikt. Door de matrijstemperatuur tijdens het inspuiten m.b.v. variotherm technologie te verhogen, kan de textuurhoogte van PS ($\pm 15\mu\text{m}$), bij een lage instelling, verhoogd worden tot $\pm 30\mu\text{m}$. De contacthoekmetingen voor PP tonen dat er superhydrofobe oppervlakken ($\pm 155^\circ$) verkregen kunnen worden. Voor PS worden hydrofobe oppervlakken bekomen ($\pm 135^\circ$).

Summary

At Technologicampus Diepenbeek (KU Leuven) the research group Cel Kunststoffen conducts research, in collaboration with the Precision Manufacturing Lab of Sirris, into the applications of laser textured mold surfaces in an injection molding process. Within this master's thesis, the transfer of microtextured surfaces on polymer products is being investigated. Simultaneously, research is being executed on the influence of the contact angle with water by addition of a texture, which has the goal to make the polymer product water-repellent.

The influence of the injection molding parameters on the transferred texture height and contact angle has been determined by implementing a full factorial design of experiments. The plastics used in this research are an amorphous thermoplastic polymer (PS, polystyrene) and a semi-crystalline thermoplastic polymer (PP, polypropylene). By using laser texturing a $\pm 60\text{ }\mu\text{m}$ deep conical texture was applied on the mold surface.

The results show that a high injection speed, mold and injection temperature are the most important machine parameters to obtain an increase in texture height and contact angle. For PP and PS, a maximum texture height of $\pm 55\text{ }\mu\text{m}$ and $\pm 25\text{ }\mu\text{m}$ respectively is measured. By increasing the mold temperature, using variothermal injection moulding, the texture height of PS ($\pm 15\text{ }\mu\text{m}$) at a low setting, can be increased to $\pm 30\text{ }\mu\text{m}$. From the contact angle measurements of PP, it appears that super hydrophobic surfaces ($\pm 155^\circ$) can be obtained. Meanwhile hydrophobic surfaces, with a contact angle of $\pm 135^\circ$, are obtained for PS.

1 Inleiding

1.1 Situering

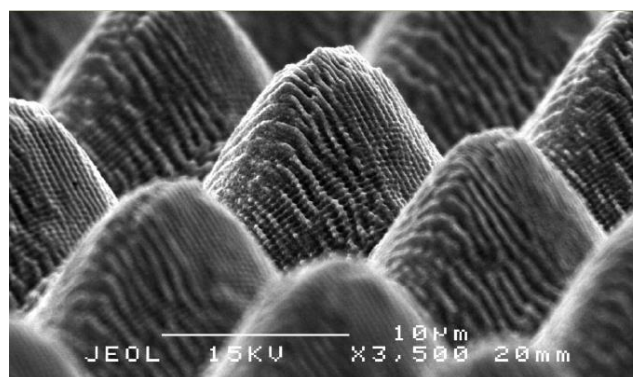
Deze masterproef wordt uitgevoerd bij Cel Kunststoffen in samenwerking met Sirris. Cel Kunststoffen is een onderzoeksgroep van de KU Leuven, Technologicampus Diepenbeek. Voor projecten en dienstverleningsopdrachten beschikt Cel Kunststoffen over een uitgebreide proceshal met meerdere spuitgietmachines en een thermoformeermachine (zie Figuur 1). Eén van de onderzoeksdomeinen richt zich op innovatieve spuitgiettechnieken, zoals water- en gasinjectie, 2K-spuitgieten en variotherm spuitgieten.

Sirris is een organisatie die andere bedrijven ondersteuning biedt om technologische innovaties uit te werken, te testen en effectief door te voeren [1]. De vestiging van Sirris in Diepenbeek beschikt over een 'Precision manufacturing lab', met daarin een klimaatkamer [2].



Figuur 1: Proceshal van Cel Kunststoffen [3]

In deze masterproef wordt onderzoek uitgevoerd naar mogelijke toepassingen van microtexturen op spuitgietmatrijzen. Een microtextuur is een verzameling van oppervlaktestructuren van enkele μm ($< 500 \mu\text{m}$) groot op het oppervlak van het materiaal. Deze kunnen verschillende vormen hebben, zoals bijvoorbeeld een 'kegelvorm' (Figuur 2).



Figuur 2: Voorbeeld van microtextuur [4]

Binnen deze masterproef wordt de overdracht van de microtexturen naar het kunststofproduct onderzocht. Op deze manier kan op het product een bepaalde functionaliteit, zoals het hydrofoob maken van het oppervlak, gerealiseerd worden. In Cel Kunststoffen is eerder al een masterproef gemaakt die zich focuste op het overnemen van een textuur op kunststofproducten. In dat onderzoek werd gebruik gemaakt van een kegelvormige textuur met een grootte van 500µm [5]. Uit de resultaten van dat onderzoek is geconcludeerd dat een variotherm spuitgietproces een positieve invloed heeft op de variatie in de hoogte van de microtextuurkegels. Deze positieve invloed wilt zeggen dat de textuurhoogte op het kunststof oppervlak gelijkmatiger is bij variotherm spuitgieten t.o.v. conventioneel spuitgieten. Deze techniek zal dus ook in dit onderzoek gebruikt worden.

Bij het variotherm spuitgietproces wordt de matrijs vóór het inspuiten van de kunststof opgewarmd. Voor amorphe kunststoffen is dit tot net boven de glastransitietemperatuur, terwijl dit voor semi-kristallijne kunststoffen rond de smelttemperatuur is. Vervolgens wordt de kunststof in de vormholte geïnjecteerd. Doordat de matrijs zich op een hogere temperatuur bevindt zal de kunststof beter in de vormholte vloeien, waardoor de textuur beter overgenomen wordt. Nadien wordt de matrijs samen met de kunststof afgekoeld.

1.2 Probleemstelling

Binnen een spuitgietproces kan de overdracht van microtexturen ($\pm 50 \mu\text{m}$) naar kunststofproducten een brede waaier van mogelijkheden geven. Momenteel is er weinig gekend over de optimale spuitgietparameters van de spuitgietmachine die nodig zijn voor optimale overname van texturen.

Rond het overdragen van een microstructuur werd een verkennende masterproef uitgevoerd in Cel Kunststoffen, waarbij variotherm en conventioneel spuitgieten vergeleken werden. Zoals in de situering vermeld, had het variotherm spuitgieten een positief effect op de overname van details op het oppervlak. Deze proef werd echter gedaan met een textuurgrootte van $\pm 500 \mu\text{m}$ en zonder temperatuursensoren in de matrijsinsert [5]. Door het niet implementeren van temperatuursensoren werd onvoldoende inzicht gekregen in het proces. Hierbij werd dan ook een zeer hoge textuurgrootte gebruikt, waardoor men de vraag stelt wat er gebeurt bij kleinere microtexturen. De centrale onderzoeksvraag in deze masterproef is dan welke procesparameters voor een optimale overdracht van kleine microtexturen zorgen. Dit geeft aanleiding om testen uit te voeren op een textuurgrootte van $\pm 60 \mu\text{m}$, en dit met integratie van een temperatuursensor. Hierdoor kan het temperatuurverloop van de matrijs nauwkeurig bepaald worden, waardoor het proces beter afgesteld kan worden.

Daarbij wordt ook de vraag gesteld of de overgedragen microtextuur op het kunststofproduct waterafstotende eigenschappen tot gevolg heeft.

1.3 Doelstellingen

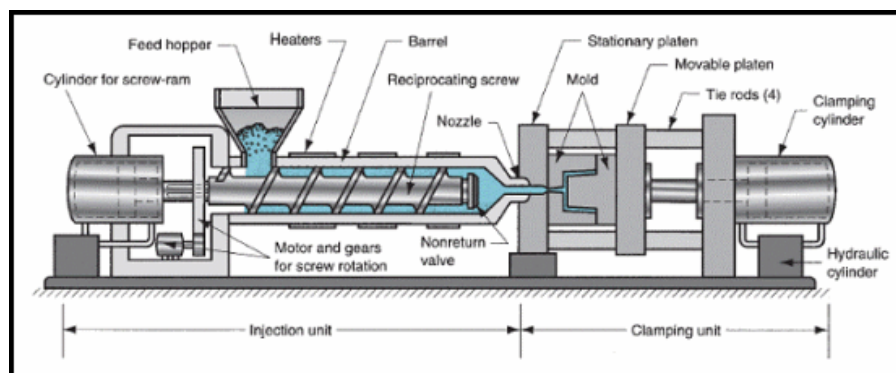
De doelstelling bestaat erin om de optimale procesparameters te vinden, zodat de kunststofproducten de microtextuur van het matrijsoppervlak overnemen. Op deze manier kan het oppervlak van het kunststofproduct extra functionaliteiten krijgen, waardoor de producten bijvoorbeeld een vuil- en/of waterafstotend gedrag zullen vertonen.

2 Literatuurstudie

2.1 Spuitgieten

Spuitgieten wordt gedefinieerd als een cyclisch proces waarbij identieke producten met behulp van een matrijs geproduceerd worden. Gesmolten kunststof wordt in de matrijs gespoten, waarin deze kunststof zal afkoelen en nadien uitgeworpen wordt. Dit is binnen de kunststofverwerking de meest gebruikte vormgevingstechniek. Het grote voordeel van dit proces is de hoge productiesnelheid. Dit proces wordt dan ook typisch toegepast bij seriegroottes van meer dan 5000 producten. Nog een voordeel is de mogelijkheid om met spuitgieten producten met een complexe geometrie te vervaardigen [6].

2.1.1 Spuitgietproces



Figuur 3: Spuitgietmachine [7]

Aan het begin van het proces wordt de hopper gevuld met kunststofgranulaat. Dit granulaat wordt dan via de draaiende schroef naar voren geleid en geleidelijk opgewarmd door verwarmingscilinders en door wrijving. De gesmolten kunststof wordt vervolgens in de matrijs gespoten. Hierna zal de kunststof in de matrijs afkoelen, zodat deze in vaste toestand komt. Wanneer deze voldoende afgekoeld is wordt het kunststofproduct uitgestoten.

De spuitgietcyclus bestaat uit 4 grote stappen: doseren, injecteren, nadrukken/koelen, uitwerpen.

Doseren

Aan het begin van de cyclus gaan de kunststofkorrels vanuit de hopper in de schroef. De schroef zal ronddraaien, waardoor de kunststofkorrels naar voor bewegen. Tijdens deze beweging neemt de kanaaldiepte van de schroef af waardoor de korrels tegen de verwarmde cilinderwand worden gewreven. De combinatie van verwarming en wrijving zorgen voor het smelten van de kunststof. Tijdens de ronddraaiende beweging, beweegt de schroef naar achter waardoor er een hoeveelheid kunststof voor aan de schroef wordt opgebouwd. Deze hoeveelheid kunststof wordt de dosering genoemd.

De belangrijkste spuitgietparameters binnen dit proces zijn de inspuitemperatuur van de kunststof, de dosering, de doseersnelheid en de stuwdruk. De inspuitemperatuur van de kunststof in een spuitgietmachine kan geregeld worden door elektrisch verwarmde cilinders die bevestigd zijn rond de schroef. De producent van de gebruikte kunststof duidt de grenzen aan voor de inspuitemperatuur. De dosering en doseersnelheid zijn instelbare waarden op de machine. De dosering is de hoeveelheid

gesmolten kunststof die voor de schroef klaargemaakt wordt om te injecteren. De doseersnelheid is de snelheid waarmee deze kunststof voor de schroef klaargemaakt wordt. De stuwdruk is de tegendruk die tegen de schroef wordt gezet, zodat de schroef niet naar achter wordt geduwd tijdens het doseren.

Injecteren

Na dosering komt de volgende stap, namelijk injectie van de kunststof in de matrijs. Deze injectie gebeurt doordat de niet-roterende schroef naar voren geduwd wordt, waardoor de kunststof onder hoge druk de matrijs in gespoten wordt.

De belangrijkste spuitgietsparameter voor het injecteren is de injectiesnelheid. Deze injectie wordt uitgevoerd door de voorwaartse axiale verplaatsing van de schroef onder een bepaalde snelheid. Deze injectiesnelheid is een procesparameter waarvan de maximale waarde afhankelijk is van de grootte van de machine.

Nadrukken/koelen

Door het doorstromend koelmedium binnen de koelkanalen van de matrijs, bezit de matrijs een lagere temperatuur dan het kunststof zelf. Dit zorgt ervoor dat het kunststof in de matrijs gekoeld zal worden na injectie. Tijdens het koelen wordt een nadruk aangelegd. Deze nadruk zorgt ervoor dat er nog extra kunststof in de matrijs geduwd wordt om de krimp, die tijdens het afkoelen en stollen ontstaat, te compenseren.

De belangrijkste parameters bij het nadrukken zijn dus de nadruk en de nadruktijd. De nadruk is een belangrijke parameter voor de kwaliteit van het product, door het compenseren van de krimp. De nadruktijd is de tijd dat de kunststof in de matrijs onder deze hoge druk wordt gehouden. Na het nadrukken zal het kunststofproduct enkel nog koelen in de matrijs. De tijd dat men het kunststofproduct laat koelen in de matrijs noemt men de koeltijd.

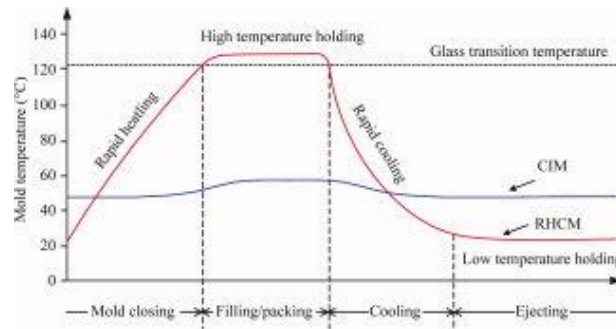
De matrijstemperatuur is nog een zeer belangrijke spuitgietsparameter. Dit is een parameter die in functie van materiaal gekozen wordt. Deze temperatuur kan geregeld worden door een elektrisch verwarmingselement of met behulp van warmteconvectie vanuit het koelmedium dat door de koelkanalen stroomt. Hoe hoger de matrijstemperatuur, hoe minder snel de kunststof zal stollen en dus hoe makkelijker de caviteit gevuld kan worden. Het is wel belangrijk dat de kunststof gestold is nadat de ingestelde koeltijd bereikt is, dus deze temperatuur mag ook niet te hoog zijn.

Uitwerpen

Eens de kunststof volledig gestold is, gaat de matrijs open. Het uitstootmechanisme zorgt ervoor dat het kunststofproduct uit de matrijs geworpen wordt. Dit mechanisme kan gebruik maken van perslucht, uitstoters, een afstroopplaat, enzovoort.

2.1.2 Variotherm spuitgieten

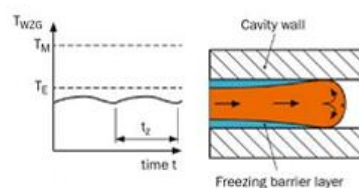
Variotherm spuitgieten is een bepaalde matrijsverwarmingstechniek, die meer en meer gebruikt wordt binnen de kunststofindustrie omwille van zijn voordelen, zoals een betere oppervlaktekwaliteit, minder residuele spanningen in het product, het verlengen van de vloeiweg bij producten met dunne wanddikten, enzovoort [8].



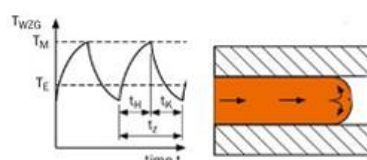
Figuur 4: Grafiek variotherm spuitgieten [8]

Indien men kijkt naar bovenstaande grafiek (Figuur 4), dan ziet men de spuitgietscyclus bij variotherm spuitgieten. CIM staat voor 'conventional injection moulding' (oftewel conventioneel spuitgieten) en RHCM staat voor 'rapid heat cycle moulding' (oftewel variotherm spuitgieten). Aan het begin van het variotherm proces wordt de matrijs opgewarmd tot boven de glastransitietemperatuur van de kunststof dat geïnjecteerd wordt. Na injectie wordt de matrijs gekoeld door koelkanalen, waardoor ook het kunststof gekoeld zal worden. Na het koelen wordt de matrijs geopend en het kunststofproduct uitgeworpen. Door de matrijs temperatuur op te warmen, zal de kunststof niet onmiddellijk stollen aan de wand wanneer deze in de caviteit komt. Figuur 5 toont het verschil tussen conventioneel spuitgieten en variotherm spuitgieten. Hierbij kan men zien dat bij conventioneel spuitgieten de kunststof onmiddellijk begint te stollen aan de wand, terwijl de kern nog warm blijft. Bij variotherm spuitgieten blijft de kunststof nog warm aan de wand van de caviteit, waardoor een betere vloeiweg t.o.v. het conventioneel spuitgieten bekomen kan worden.

Conventional temperature control



Highly dynamic cavity temperature control



t_z Cycle time T_{WZG} Cavity wall temperature
 t_H Heating time T_M Melt temperature
 t_K Cooling time T_E Demolding temperature

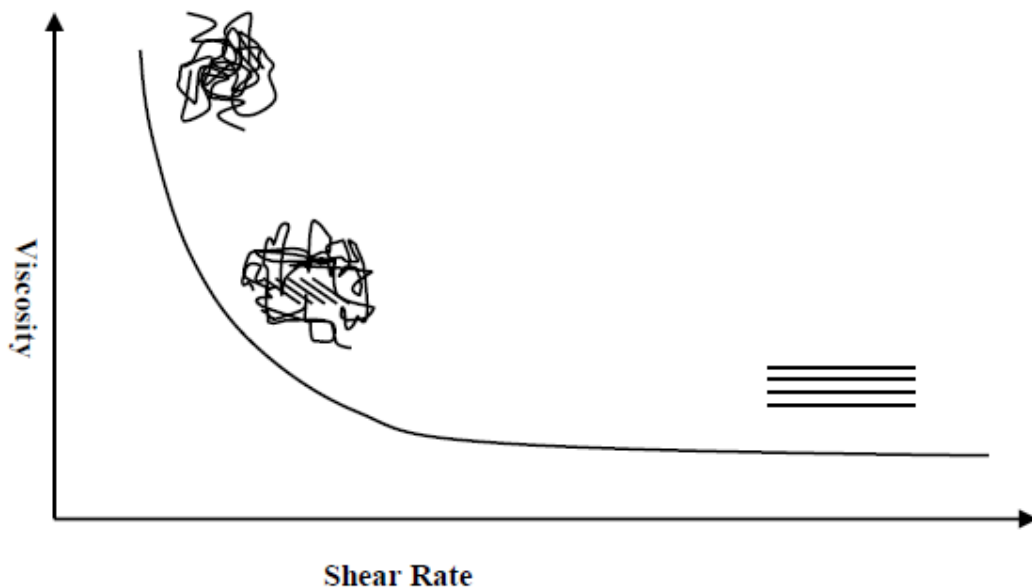
Figuur 5: Conventioneel spuitgieten vs variotherm spuitgieten [9]

2.2 Procesvenster

Het bepalen van het procesvenster is een belangrijke stap in het opstarten van een spuitgietproces. Dit venster geeft weer binnen welke grenzen van de procesparameters er visueel goede producten gemaakt worden. De visuele defecten die voorkomen zijn: inval, flash, kromtrekken, onvolledige vulling, Het opstellen van het procesvenster gebeurt in een aantal stappen. Eerst wordt een viscositeitscurve opgesteld voor het bepalen van de minimale inspuitingsnelheid waarbij de viscositeit van de kunststof constant blijft. Daarna wordt het procesvenster zelf opgesteld voor het bepalen van de grenzen waarbinnen een goed product gemaakt wordt. Deze stappen worden hieronder besproken.

Viscositeitscurve

Het bepalen van de viscositeitscurve [10] is de eerste stap voor het opstellen van het procesvenster. Kunststoffen zijn niet-newtoniaanse vloeistoffen. Dit wilt zeggen dat de viscositeit van het fluïdum verandert bij verschillende afschuifsnelheden. Bij lage afschuifsnelheden is de viscositeit van de kunststof zeer hoog terwijl bij hoge snelheden deze lager zijn en zo goed als constant blijven. Dit komt doordat bij lage afschuifsnelheden de polymeerketens volledig willekeurig georiënteerd zijn, terwijl bij hoge afschuifsnelheden de ketens zich gaan richten volgens de stroming (zie Figuur 6). [10]



Figuur 6: Voorbeeld viscositeitscurve [10]

Bij spuitgieten is de afschuifsnelheid op de kunststof afhankelijk van de injectiesnelheid. Hoe hoger de injectiesnelheid, hoe hoger de afschuifsnelheid op de kunststof. Het interessante gebied voor het spuitgieten van producten is de regio waar de viscositeit zo goed als constant blijft. Als de temperatuur of de injectiesnelheid variëren door onregelmatigheden dan zal de viscositeit toch constant blijven. Als er daarentegen een snelheid in het exponentieel deel gekozen wordt dan is dit niet zo.

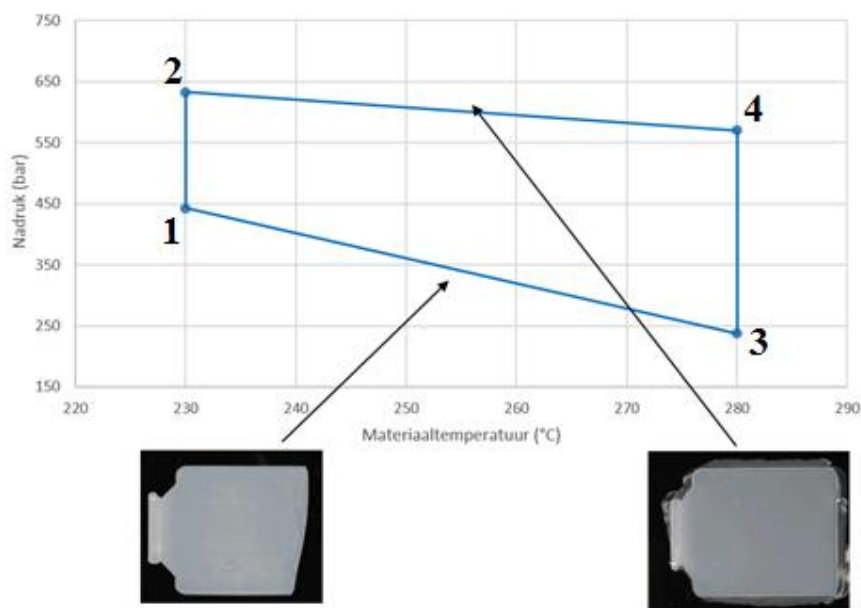
Voor het opstellen van dergelijke curve wordt er eerst gestart met de injectietemperaturen van de gebruikte kunststof op te zoeken. De viscositeitscurven zijn opgesteld bij de laagste temperaturen van deze ranges, om het slechtste scenario met de hoogste viscositeit te verkrijgen. Bij de hoge temperaturen zal de viscositeit lager zijn en dus de exponentieel curve op Figuur 6 ook verder opschuiven naar links. Vervolgens wordt er bij de hoogste injectiesnelheid van de machine (68 cm³/s) kunststofproducten gemaakt. Hierbij moet ervoor gezorgd worden dat de producten voor 95% gevuld worden zonder dat hierbij nadruk gezet wordt tijdens het inspuiten. Als het product toch volledig gevuld zou worden dan

bouwt de druk op doordat de kunststof tegen de achterkant van de vormholte komt. Deze drukopbouw is dan niet alleen meer de druk die nodig is om de kunststof in de caviteit te injecteren.

Daarna wordt de injectiesnelheid telkens in stappen van $4,88 \text{ cm}^3/\text{s}$ verlaagd. Bij elke verlaging wordt de inspuitdruk (in Pa) en inspuittijd (in s) genoteerd. Het product van deze twee parameters geeft vervolgens een maat voor de viscositeit weer. Op deze manier wordt per stap de viscositeit genoteerd en een grafiek opgesteld van de viscositeit i.f.v. de injectiesnelheid. Hieruit kan de ondergrens van de injectiesnelheid bepaald worden, waarbij de viscositeit constant blijft.

Procesvenster opstellen

Het procesvenster is de basis om goede producten te maken. Om dit op te stellen wordt de bekomen injectiesnelheid uit de viscositeitscurve gebruikt. Ook wordt de onder- en bovengrens van de injectietemperatuur van de gebruikte kunststof gebruikt. Vervolgens wordt de dosering van de spuitgietmachine zodanig ingesteld dat de caviteit voor 98% gevuld is op lage injectietemperatuur. De controle over deze vulling wordt puur op het zicht gedaan. Daarna wordt de nadruk verhoogd totdat het kunststofproduct geen inval meer vertoont. Dit geeft het eerste punt van het procesvenster. Vanaf dit punt wordt de nadruk nogmaals verhoogd totdat het product bramen of barsten vertoont. Dit geeft het tweede punt van het procesvenster. De onder- en bovengrens van de nadruk zijn nu bepaald voor de lage temperatuur. Dit wordt opnieuw uitgevoerd maar dan voor de hoge injectietemperatuur. Als de uiterste punten van de nadrukken uitgezet worden in functie van de injectietemperatuur wordt onderstaande grafiek verkregen. [11]



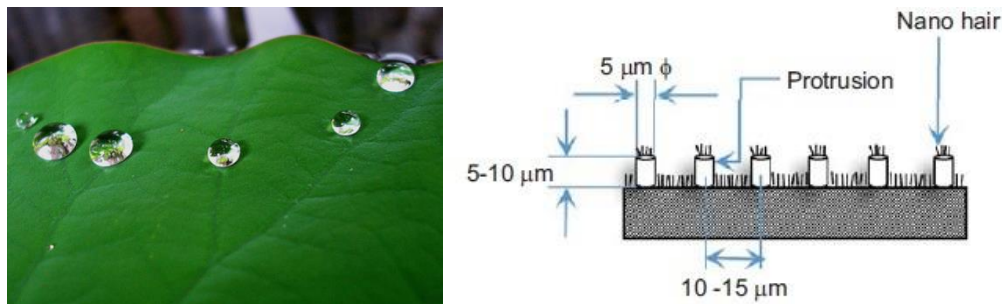
Figuur 7: Voorbeeld procesvenster

Wanneer de nadruk van de spuitgietmachine lager wordt ingesteld dan de ondergrens van het procesvenster, dan worden er onvolledig gevulde producten bekomen. Bij te hoge nadruk wordt er teveel kunststof gedrukt in de caviteit, waardoor er flash ontstaat.

2.3 Microtexturen

2.3.1 Inleiding tot hydrofobe microtexturen

In de natuur bestaan er verschillende soorten texturen waarvan de afmetingen op micro-en nanoschaal liggen. Hieruit wordt dan ook het idee gehaald van waterafstotende microtexturen. Figuur 8 toont een voorbeeld van een lotusblad (links) [12] met zijn waterafstotende textuur (rechts) [13].



Figuur 8: Het lotusblad (links) [14], textuur van lotusblad (rechts) [13]

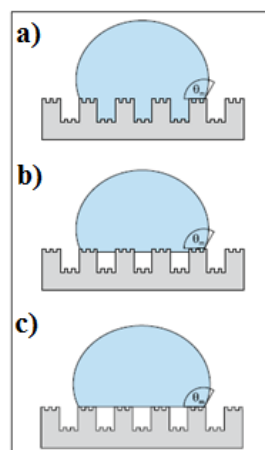
Dit hydrofoob gedrag wordt verkregen door de microtextuur met daarop een haarvormige nano-textuur. De microtextuur zijn opstaande cilinders met een diameter van $5\text{ }\mu\text{m}$ met een hoogte tussen de 5 en $10\text{ }\mu\text{m}$. De onderlinge afstand tussen de kegels bedraagt $10-15\text{ }\mu\text{m}$.

Een waterdruppel kan zich op drie mogelijke manieren op een ruw oppervlak gedragen [15]. Het eerste model is dat van Wenzel (zie figuur 9.a) waarbij wordt aangenomen dat de druppel doorheen de textuur van het oppervlak valt. De contacthoek wordt hier bepaald aan de hand van de ruwheidsfactor. Deze ruwheidsfactor is de verhouding tussen het oppervlak op de toppen en het volledig vlak oppervlak.

Het tweede model is Cassie-Baxter waarbij de druppel bovenop de textuur blijft liggen. Bij dit model wordt de contacthoek berekend aan de hand van de lucht-vast oppervlak verhouding. Dit is de verhouding tussen het vast oppervlak en het oppervlak waar lucht is ingesloten.

Het derde model is een combinatie van Wenzel en Cassie-Baxter. De druppel valt hier gedeeltelijk door de textuur. De grootte van de contacthoek ligt hier tussen beide modellen in.

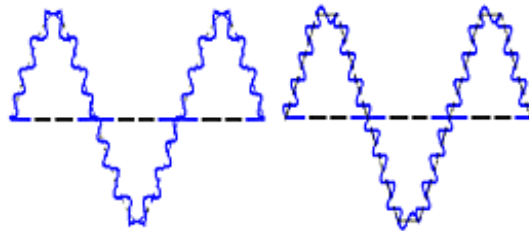
De drie mogelijke modellen worden weergegeven in Figuur 9. Door de microtextuur van Figuur 8 toe te passen verkrijgt men het waterstotend effect, omdat de druppel in Cassie-Baxter-toestand komt. De bedoeling is nu om deze microtexturen te kopiëren op andere materialen zoals bv. metalen, kunststoffen, enzovoort.



Figuur 9: Gedrag van een druppel op een ruw oppervlak a) Wenzel b) Combinatie van Wenzel en Cassie-Baxter c) Cassie-Baxter [16]

2.3.2 Kegelvormige of cilindervormige microtextuur

In de literatuur is een studie gevonden over verschillende soorten microtexturen die mogelijk voor een waterafstotend oppervlak zorgen [17]. Deze studie onderzoekt 2 microtexturen op elkaar, d.w.z. dat een grotere microtextuur wordt gemaakt en in een 2^{de} stap een kleinere microtextuur hierop geplaatst is. Uit de conclusie is gebleken dat een sinusvormige microtextuur op een microtextuur van afgeknotte kegels de meest geschikte textuur is voor het maken van super hydrofobe oppervlakken. Dit kan men ook zien op Figuur 10.



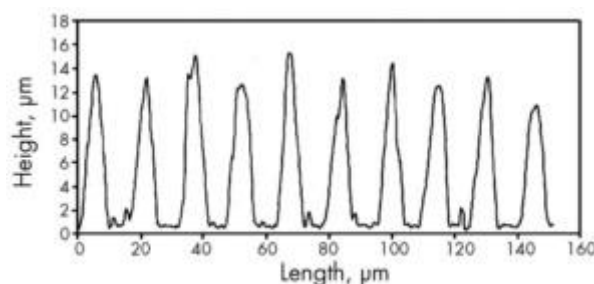
Figuur 10: Sinusvormige microtextuur op een microtextuur van afgeknotte kegels [17]

Nog een andere studie toont ook aan dat er met een kegelvormige textuur hydrofobe oppervlakken gecreëerd kunnen worden. Binnen dat onderzoek zijn er zes verschillende texturen getest [18]. Er worden twee diameters (10 en 20 μm) als grondvlak van de kegels bekeken. Bij elke diameter wordt de hoogte van de textuur vervolgens ook nog gevarieerd. Binnen deze testen wordt gebruik gemaakt van een thermoplastisch elastomeer (LSR: liquid silicone rubber). Onderstaande tabel geeft de geteste texturen uit dat onderzoek.

Tabel 1: Gebruikte texturen [18]

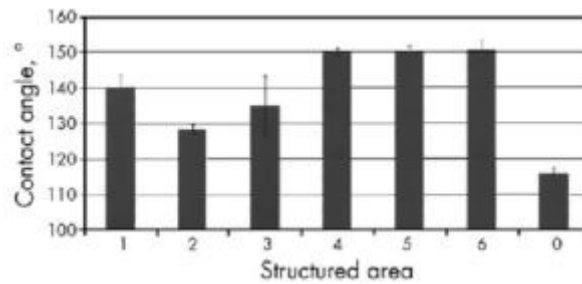
Structuring	Diameter / μm	Height / μm	Aspect ratio
1	20	15	0.75
2	20	10	0.5
3	20	5	0.25
4	10	15	1.5
5	10	10	1
6	10	5	0.5

Door het variëren in de diameter van de basis van de kegels is het ook mogelijk om de afstand tussen de kegels te verkleinen. De onderlinge afstand van de kegels bij textuur 1 t.e.m. textuur 3 bedraagt 12,9 μm omdat dit, vanwege de capaciteiten van de laser, de kleinste mogelijke afstand is bij deze basisdiameter. Door de basisdiameter te verkleinen naar 10 μm is het mogelijk om voor textuur 4 t.e.m. textuur 6 de onderlinge afstand tussen de kegels te verkleinen. Deze onderlinge afstand bedraagt 7,6 μm bij textuur 4 t.e.m. textuur 6. Figuur 11 geeft de overgenomen textuurhoogte in functie van de lengte bij een gebruikte textuur.



Figuur 11: Textuur 1 van gemaakte producten [18]

De resultaten van dat onderzoek hebben aangetoond dat bij de smalle textuur, met een grondoppervlakdiameter van $10\mu\text{m}$, de grootste contacthoeken haalbaar zijn. Dit komt doordat bij deze diameter de onderlinge kegelaafstand kleiner is, waardoor de druppel enkel zal rusten op de toppen van de kegels. Indien de onderlinge afstand tussen de kegels groter is, zal de druppel door zijn gewicht langzaam tussen de kegels zakken. Hierdoor wordt een lagere contacthoek bekomen [18]. De contacthoeken van de verschillende texturen staan weergegeven op Figuur 12. Textuur 0 is de contacthoek van het gebruikte LSR zonder textuur.



Figuur 12: Contacthoek van elke textuur [18]

Uit de resultaten van dit onderzoek wordt niet met zekerheid gezegd of de aspect ratio (breedte-hoogte-verhouding van de kegel) invloed heeft op de contacthoek, maar er wordt wel verondersteld dat dit zo is [18]. Hierin wordt dus verondersteld dat door de onderlinge afstand tussen de kegels, bij een lagere aspect ratio (textuur 4 t.e.m. textuur 6), de contacthoek zal verhogen.

2.3.3 Overdracht van microtextuur binnen spuitgietproces

In de literatuur worden de 4 belangrijkste parameters besproken voor het overnemen van een microtextuur binnen het spuitgietproces. Dit zijn de nadruk, injectiesnelheid, matrijstemperatuur en injectietemperatuur. De studie van Michaeli en Klaiber [19] onderzoekt de overname van microtexturen binnen een spuitgietproces op 3 soorten kunststoffen, nl. PMMA, PC en POM. Hierin wordt een microtextuur onderzocht dat bestaat uit piramides, waarvan de zijden van de basis $\pm 10 \mu\text{m}$ lang is. Dit onderzoek toont aan dat de matrijstemperatuur en de nadruk de belangrijkste parameters zijn voor de overname van de microtextuur. Een studie van Hopmann, Recht en Behmenburg [18] voert een DoE uit, waarbij 3 parameters gevarieerd worden, nl. de injectiesnelheid, matrijstemperatuur en injectietemperatuur. Dit onderzoek werkt met een siliconen elastomeer en gebruikt verschillende kegeltexturen waarvan de afmetingen ($\pm 10 \mu\text{m}$) telkens verschillen. Nog een ander onderzoek, nl. van Packianather, Griffiths en Kadir [20], focust zich op het afstellen van procesparameters binnen het microspuitgieten. De procesparameters die hierin besproken worden zijn de nadruk, injectiesnelheid, matrijstemperatuur en injectietemperatuur. Binnen deze studie wordt gebruik gemaakt van COC (Cyclic Olefin Polymer). Het product dat gebruikt wordt voor deze testen is een platform waar een fluïdum doorstroomt op microschaal. De pinnen binnen dit platform hebben een diameter van $\pm 500 \mu\text{m}$ en een hoogte van $\pm 600 \mu\text{m}$. De verbindingen tussen deze pinnen hebben een doorsnede van 50 tot $200 \mu\text{m}$. De invloed van deze procesparameters op de overdracht van de microtextuur wordt hieronder besproken.

- **Nadruk**

Het onderzoek van Michaeli en Klaiber [19] toont aan dat de nadruk een belangrijke parameter is voor de kwaliteit van de overname van de microtextuur. De nadruk zorgt ervoor dat het product volledig gevuld is. Door na het inspuiten nadruk te zetten, kan de nadruk ervoor zorgen dat de kunststof in de textuur wordt gedrukt.

De studie van Packianather, Griffiths en Kadir [20] geeft aan dat de nadruk de meest significante procesparameter is voor het vullen van de microcaviteiten. Dit is een gevolg van het feit dat de smelt die geïnjecteerd nog eens extra in de textuurholtes wordt gedrukt voordat deze volledig gaat stollen.

- **Injectiesnelheid**

Het onderzoek van Hopmann, Recht en Behmenburg [18] dat hierboven aangehaald werd, toont aan dat de injectiesnelheid een significant effect heeft op de contacthoek met water. Voor het verkrijgen van een goede kwaliteit van overname, moeten de microtexturen gevuld worden vooraleer het product volledig is afgekoeld. Bij een hoge injectiesnelheid wordt een betere kwaliteit van overname gerealiseerd.

Uit het onderzoek van Packianather, Griffiths en Kadir [20] blijkt dat de injectiesnelheid het minst significant is voor het vullen van de microcaviteit. Dit is in tegenspraak met ref. [18], waarbij vermeld wordt dat de injectiesnelheid wel een significant effect heeft. De mogelijke reden hiervoor is dat bij het onderzoek van Packianather, Griffiths en Kadir een veel grotere microcaviteit gebruikt wordt. Hierbij wordt wel vermeld dat indien men de aanpassing van de injectiesnelheid en injectietemperatuur combineert, dat er wel een significant effect is in het vullen van de microcaviteit.

- **Matrijstemperatuur**

Het onderzoek van Michaeli en Klaiber [19] geeft ook aan dat de matrijstemperatuur de belangrijkste parameter is voor het spuitgieten van microgetextureerde producten. Als de kunststof wordt ingespoten in een matrijs op een hogere temperatuur zal de kunststof minder snel stollen. Hierdoor blijft de kunststof

langer vloeibaar en zal deze beter in de textuur vloeien. Een hoge matrijsoppervlaktetemperatuur is dus een vereiste voor het verkrijgen van een goede kwaliteit voor de overname van de microtextuur.

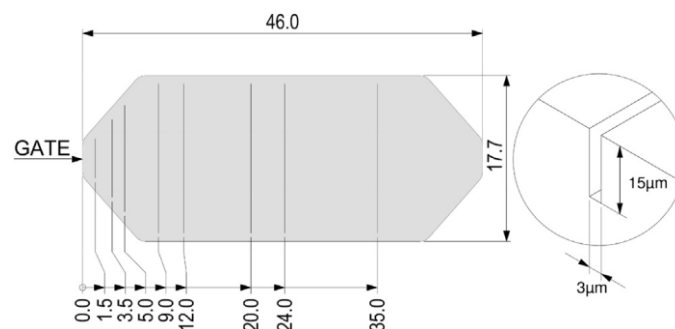
Uit het onderzoek van Packianather, Griffiths en Kadir [20] blijkt dat de matrijstemperatuur een significant effect heeft op het vullen van de microcaviteit ($\pm 500 \mu\text{m}$). Door de matrijstemperatuur te verhogen wordt de textuurholte efficiënter gevuld ten gevolge van een verlaagde viscositeit van het gesmolten polymeer. De matrijs moet dus warm gehouden worden om snelle koeling in de microcaviteiten te voorkomen.

- **Injectietemperatuur**

Uit het onderzoek van Hopmann, Recht en Behmenburg [18] blijkt ook dat de injectietemperatuur individueel geen significant effect heeft op de contacthoek, maar de invloed van de injectiesnelheid op de contacthoek is wel afhankelijk van de injectietemperatuur. Een hoge injectietemperatuur in combinatie met een hoge injectiesnelheid heeft een positief effect op de contacthoek.

De studie van Packianather, Griffiths en Kadir [20] toont aan dat het de hoge instellingen van de injectietemperatuur, matrijstemperatuur en injectiesnelheid de beste resultaten geven voor het produceren van kwaliteitsproducten.

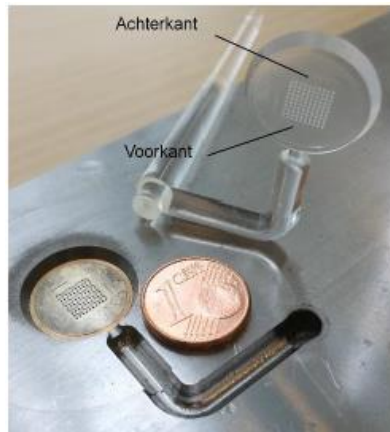
Het is ook belangrijk om te weten op welke positie binnen de matrijs de textuur het beste overgenomen wordt. Hierrond is al een experimenteel onderzoek uitgevoerd, waarbij er gekeken werd naar de technologische grenzen van een microspuitgietsproces bij het overdragen van microtexturen [21]. Binnen dit onderzoek worden op een vlak productplaatje van 1 mm dik 8 microgroeven geplaatst die een breedte hebben van $3 \mu\text{m}$ en een aspect ratio van 5. Dit onderzoek toont aan dat de overdracht van de microtextuur beter is aan het einde van de caviteit in de matrijs. De oorzaak hiervan heeft te maken met de zogenaamde fountain flow [22] van het materiaal in de matrijs. Dit wil zeggen dat tijdens het inspuiten, het materiaal warm in de kern van de matrijs is, terwijl aan de zijwanden het materiaal onmiddellijk stolt. De kunststof zal dus al beginnen afkoelen aan de rand van de matrijs op het moment dat deze in de caviteit terechtkomt, waardoor de laatste warme kunststof zich achteraan de matrijs bevindt. Bij het starten van de nadruk zal de warme kunststof achteraan de caviteit het product beter vullen dan vooraan, waar er al een deel gestolde kunststof zit.



Figuur 13: Boven aanzicht van het productplaatje met 8 microgroeven [21]

Binnen Cel Kunststoffen is recent een masterproef uitgevoerd over de overdracht van microtexturen met een grootte van $\pm 500 \mu\text{m}$ [5]. Hierin werd de tegenovergestelde conclusie gegeven t.o.v. het experimenteel onderzoek hierboven. Deze studie geeft voor het overdragen van een microtextuur aan dat deze overname aan de kant van de aanspuiting beter is dan de overname achteraan de matrijs. Door variotherm spuitgieten toe te passen wordt dit verschil wel verkleind, maar er is nog steeds een betere overname kort bij de aanspuiting. De reden dat hier andere resultaten verkregen worden heeft te maken met de aanspuiting van het product en de ligging van de microtextuur. Dit product heeft een zeer kleine gate voor het makkelijk te verwijderen van de aanspuiting. Doordat deze gate zo klein is vriest deze snel af, waardoor de krimp niet meer gecompenseerd kan worden door de nadruk. De nadruk heeft hier dus

weinig invloed op de microtextuur van het product. De tweede mogelijke reden waardoor deze twee onderzoeken verschillende resultaten vertonen is dat de gebruikte microtextuur voor de masterproef ca. 10 keer groter was. Bij een veel grotere microtextuur, kan de kunststof, door het grotere grondoppervlak van de kegels, makkelijker in de holtes stromen. Bij een kleinere microtextuur is er eerder de mogelijkheid dat de kunststof over de textuurholtes stroomt waardoor de holtes niet gevuld worden. Op deze manier kunnen voor kleinere microtexturen andere parametersbelangrijker zijn t.o.v. grotere microtexturen.

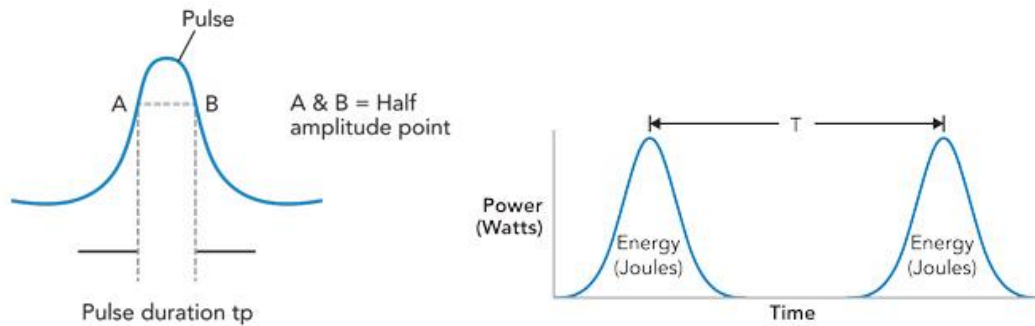


Figuur 14: Product uit het onderzoek van Y.Heijligen [5]

Een derde reden dat in deze masterproef andere resultaten worden weergegeven is de dikteverhouding van het product. Dit product (zie bovenstaande figuur) heeft een dikte van 2 mm en een diameter van 17 mm, waar op het oppervlak een textuur van $\pm 500 \mu\text{m}$ is aangebracht. Door deze dikteverhouding stolt het plaatje traag, waardoor ook het oppervlak, waar de microtextuur is aangebracht, traag zal stollen. Hierdoor worden andere resultaten verkregen t.o.v. een product met een kleinere dikteverhouding.

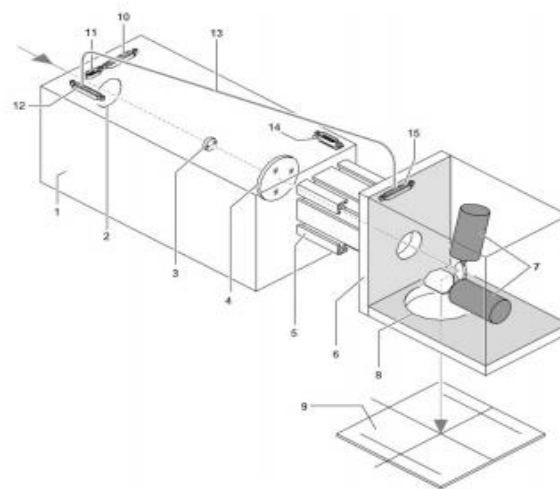
2.4 Werkingsprincipe van een lasertextureermachine

Deze lasertextureermachine werkt met het principe van laser ablatie. Dit is een proces waarbij een laser gefocust is op het oppervlak van een sample, waardoor materiaaldeeltjes weggenomen worden [23]. Femtosecond lasers worden ook wel ultrashort-pulse lasers genoemd. De 2 belangrijkste parameters van dit soort lasers zijn de 'pulse duration' en de 'pulse repetition rate'. Figuur 15 toont de betekenis van deze 2 parameters. De waarde van de pulse duration is gelijk aan de breedte van de pulse op het punt waar de helft van de maximale amplitudewaarde is [24]. De pulse repetition rate (PRR) is de frequentie waarbij de pulses worden uitgezonden door de laser. Omdat we met femtosecond lasers bezig zijn liggen de waarden van de pulse duration tussen 1 fs en 999 fs.



Figuur 15: Betekenis van de 'pulse duration' (links) en van de 'pulse repetition rate' (rechts) [24]

Lasertextureren is een innovatieve precisietechniek die toegepast kan worden op matrijzen van spuitgietmachines [25]. Met deze techniek kan men microtexturen aanbrengen op matrijzen, waardoor het negatieve van deze microtexturen overgebracht kan worden naar de kunststofproducten.



Figuur 16: Principe belangrijkste deelsysteem bij lasertexturering [25]

Op Figuur 16 vindt men het belangrijkste deel van het 3D lasertextureringsysteem. Dit deel bestaat uit een spiegelsysteem (Deflection unit) en een lineaire translatie module. Het spiegelsysteem zorgt ervoor dat de laser gespiegeld wordt op het werkvlak. De laser kan op deze manier in de x- en y-richting bewegen op het werkvlak, oftewel een 2D-beweging uitvoeren. Beide spiegels in het spiegelsysteem beschikken over een galvanometer voor het meten van de intensiteit van de laser. De galvanometer die binnen deze laser gebruikt wordt noemt men een spiegelgalvanometer. Een galvanometer is een elektromechanisch instrument dat aangeeft wanneer er een stroom doorheen gaat. Een spiegelgalvanometer geeft dus een stroom weer wanneer een lichtbundel afgebogen wordt door de spiegel [26].

De laser wordt gefocust door het lineaire translatiesysteem en een F-Theta-lens in het spiegelsysteem. Een F-Theta-lens is een lens die gebruikt wordt in combinatie met spiegelgalvanometers [27]. Het lineaire translatiesysteem bevat een lens die een lineaire beweging maakt en die zorgt voor de focuslengte van de laser. De F-Theta-lens zorgt ook voor het focussen van de laser, maar ook voor het bepalen van de grote van het werkvlak. Het lineaire translatiesysteem zorgt dan voor het bepalen van het vlak waar de laser op gefocust moet worden. Op deze manier kan men spreken van 3D lasertexturering.

3 Materiaal en methode

3.1 Kunststof

In dit onderzoek wordt er gebruik gemaakt van twee soorten kunststof. Een semi-kristallijne thermoplast, nl. polypropyleen (PP) en een amorfe thermoplast, nl. polystyreen (PS). De handelsnaam van het gebruikte PP is PP 400-GA05, geproduceerd door INEOS (zie bijlage B) dit is een copolymeer met een fractie polyethyleen. De handelsnaam van het gebruikte PS is 165N/L, geproduceerd door INEOS (zie bijlage C).

Beide kunststoffen worden gebruikt voor het bepalen van de overdracht van de microtextuur en voor de contacthoekmetingen hierop. PP is een semi-kristallijne kunststof, die door de vorming van de kristallijne fase tijdens het afkoelen meer zal krimpen (2 - 3%) dan bij de amorfe PS (0,3 - 0,6%).

PP heeft van zichzelf een hoge contacthoek met water $\pm 102^\circ$, vandaar dat het zeer interessant is om textuur op deze kunststof aan te brengen voor het hydrofoob effect te vergroten [28]. Voor PS is contacthoek lager ($\pm 87^\circ$), maar doordat deze minder krimp vertoont, wordt er verwacht dat de textuur beter overgenomen wordt.

De belangrijkste eigenschap van de kunststoffen binnen deze studie is de Melt Flow Rate (MFR-getal) en Melt Volume Rate (MVR). Dit getal is een maat voor de viscositeit van de kunststof. De MFR voor PP(230°C/2.6kg) is 5,0g/10min. Voor PS is de MVR (200°C/5.0kg) gegeven. Deze is 3,40cm³/10min omgerekend naar MFR is dit 3.536 g/10min.

3.2 Spuitgietmachine

De spuitgietmachine die in dit onderzoek wordt gebruikt is een 'ENGEL ES 200/35 HL'. Dit is een hydraulische machine die is gekozen vanwege zijn hoge nauwkeurigheid. Ook heeft deze machine een hydraulische accumulator ter beschikking waardoor deze zeer hoge injectiesnelheden kan halen. De specificaties van deze machine staan weergegeven in bijlage A.



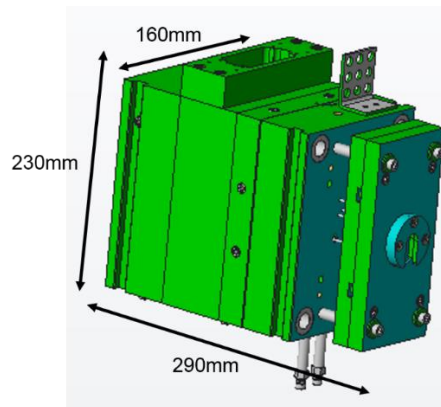
Figuur 17: De ENGEL ES 200/35 HL gebruikt voor dit onderzoek.

De belangrijkste specificaties van deze machine zijn:

- Schroefdiameter 25 mm
- Doseerlengte 140 mm
- Maximaal slagvolume 69 cm³
- Insputstroom 88 cm³/sec
- Insputstroom met accu 190 cm³/sec
- Specifieke spuitdruk 2090 bar
- Sluitkracht 350 kN

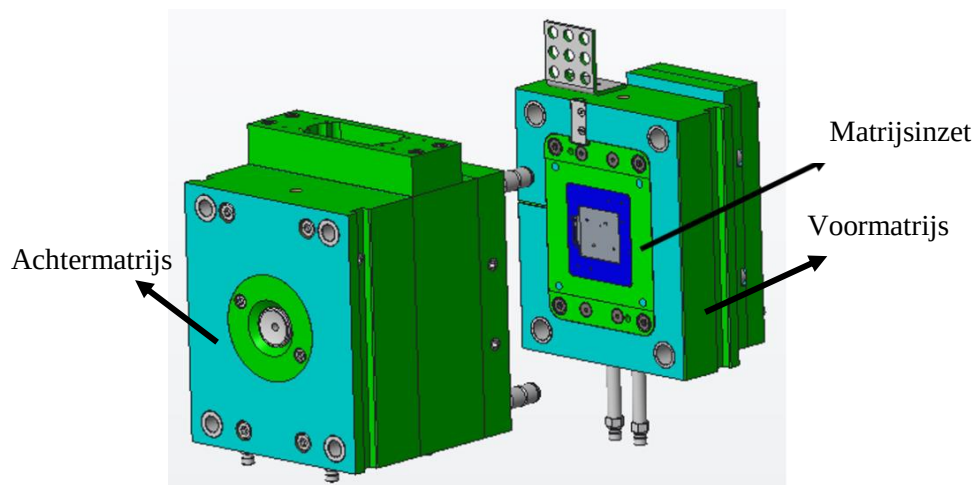
3.3 Matrijs

Voor dit onderzoek zal een bestaande matrijs gebruikt worden, nl. de Benchmarkmatrijs van Cel Kunststoffen (Figuur 18). Deze moedermatrijs heeft de mogelijkheid om met inzetstukken te werken. Een matrijsinzet is een deel van de matrijs dat het negatieve van de productvorm en de koelkanalen bevat. Binnen deze masterproef wordt een nieuw inzetstuk met verwisselbare productplaatjes ontworpen.



Figuur 18: Benchmarkmatrijs

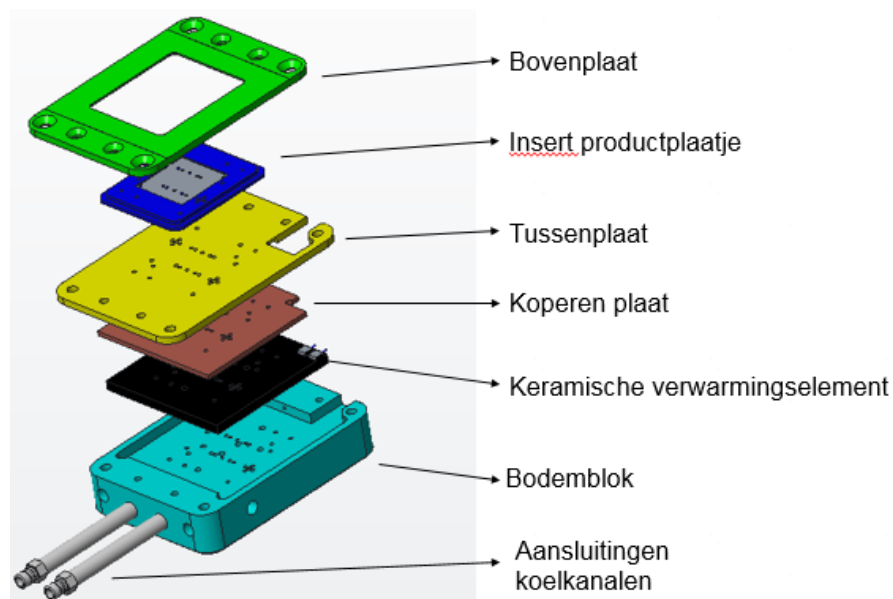
Figuur 19 toont de positie van de matrijsinzet in de Benchmarkmatrijs. Hierbij zijn de voor- en achtermatrijs uit elkaar getrokken.



Figuur 19: Open matrijs met matrijsinzet

3.4 Ontwerp matrijsinzet

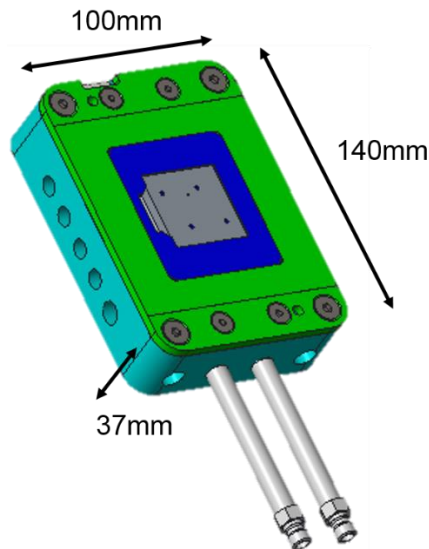
Zoals eerder hierboven vermeld, wordt een ontwerp gemaakt van een matrijsinzet passend in de Benchmarkmatrijs. Doordat er verschillende microtexturen getest worden binnen deze masterproef moeten er meerdere productplaatjes gemaakt worden. Vandaar is er een mogelijkheid in de matrijsinzet voorzien om de productplaatjes makkelijk te wisselen zonder een volledige demontage van de volledige matrijs. Figuur 21 toont het ontwerp van de matrijsinzet die in de Benchmarkmatrijs geplaatst wordt. Het eerst ontwerp (zie Figuur 20) heeft een tussenplaat waaronder een keramisch verwarmingselement geplaatst is. Deze manier van opwarmen gaat veel sneller dan alleen met heet water [29]. Het gebruik van beide opwarmingsmethodes wordt hybride variothermspuitgieten genoemd. Er wordt enerzijds opgewarmd met heet water dat door de koelkanalen gestuurd wordt en anderzijds elektrisch opgewarmd.



Figuur 20: Oud ontwerp met keramische verwarmingselement

Van dit ontwerp heeft Sirris een offerte aangevraagd bij een matrijsenmaker. De prijs van deze inzet bleek te duur waarna het ontwerp is aangepast naar een vernieuwd ontwerp (zie Figuur 21). Bij deze matrijsinzet kan het variotherm spuitgietproces nog steeds toegepast worden alleen zal de opwarming trager gebeuren. Er is wel een mogelijkheid om het huidige matrijsinzet opnieuw te bewerken zodat het keramische verwarmingselement er in kan.

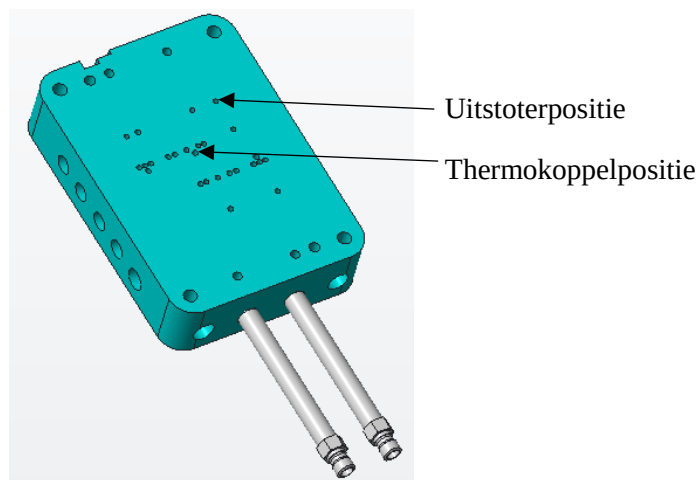
Het tweede en huidige ontwerp bestaat uit 3 delen: de bodemblok (lichtblauw), het productplaatje (donker blauw) en de bovenplaat (groen). In het productplaatje wordt de vormholte (het negatief van het product) gefreesd waarop de textuur wordt aangebracht.



Figuur 21: Huidige ontwerp matrijsinzet

3.4.1 Bodemblok

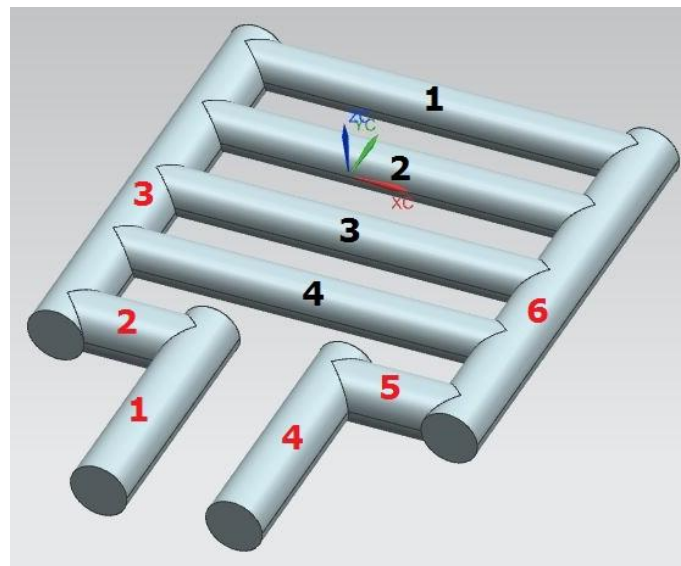
Figuur 22 toont het bodemblok samen met de aansluitingen van de koelkanalen. De doorsnede laat hierbij de ligging van de koelkanalen zien binnenin het bodemblok. De afstanden van de koelkanalen tot de vormholte zijn zodanig bepaald dat deze een goede koeling van het product voorzien [30]. In de literatuur staat ook dat een radiatorstructuur van de koelkanalen zorgt voor de beste uniforme koeling [31]. Deze structuur is dan ook gesimuleerd bij verschillende aan- en afvoerkanalen. Deze stromingssimulaties zijn uitgevoerd in het softwarepakket NX10. Naast de koelkanalen bevat deze bodemblok ook uitstoterholtes en verschillende posities voor het plaatsen van een thermokoppel.



Figuur 22: De bodemblok

Simulaties koelkanalen NX10

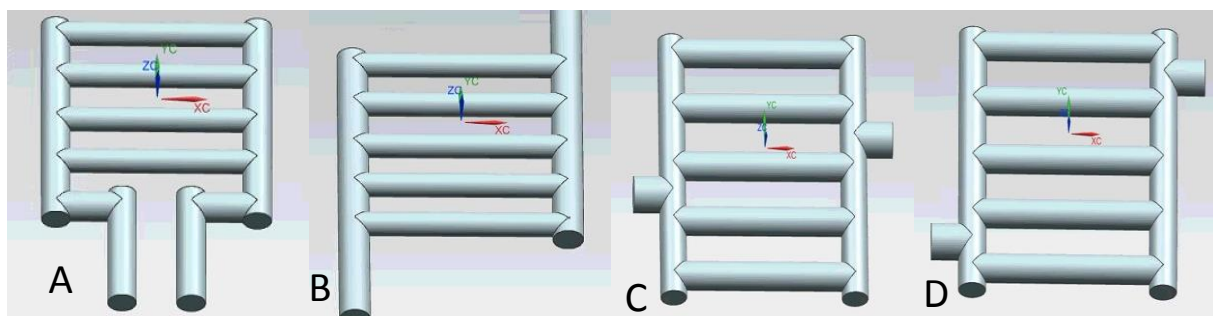
Om deze verschillende scenario's te simuleren is er gebruik gemaakt van het softwarepakket NX 10. Deze simulaties zijn van belang om er zeker van te zijn dat de gekozen positie van de koelkanalen (scenario 1) wel degelijk de beste oplossing is. In totaal zijn er vier verschillende scenario's geanalyseerd. Bij elk van deze vier scenario's worden de koelkanalen, die in het rood genummerd zijn, zowel met een diameter van 8mm als met een diameter van 10mm gesimuleerd. Hierdoor bekomt men in totaal een tiental verschillende simulaties. Volgens de literatuur worden, voor deze radiatorvorm, de diameters van de tussenliggende koelkanalen niet gewijzigd [25]. Dit wordt dus ook toegepast binnen het ontwerp van de koelkanalen. Deze tussenliggende koelkanalen worden op Figuur 23 aangeduid met zwarte nummers. In onderstaande geval zijn er maar vier tussenliggende koelkanalen, in alle andere scenario's zijn dat er vijf. In die gevallen vormen de koelkanalen met het nummer 2 en 5 nog een extra tussenliggend kanaal met een diameter van 8mm.



Figuur 23: Voorbeeld scenario

Om te kunnen simuleren is er eerst een totaaldebiet nodig dat door de koelkanalen van het insert moet stromen. Om een waarde te hebben voor de simulaties hebben we gekeken naar het temperatuurapparaat (HB 180Z3 van HB therm) op hoge temperatuur. Deze koeler kan ongeveer een totaaldebiet leveren van ongeveer 60l/min voor de volledige matrix. Vermits beide matrijshelften gekoeld moeten worden, zijn we ervan uitgegaan dat de verdeling van het koelwater gelijk is. Zo bekomen we een waarde voor het inlaatdebiet van 30l/min.

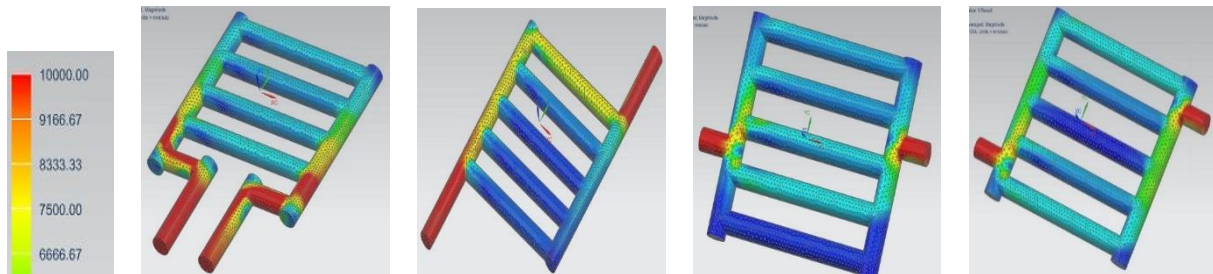
De geteste scenario's voor de simulaties staan in onderstaande figuur.



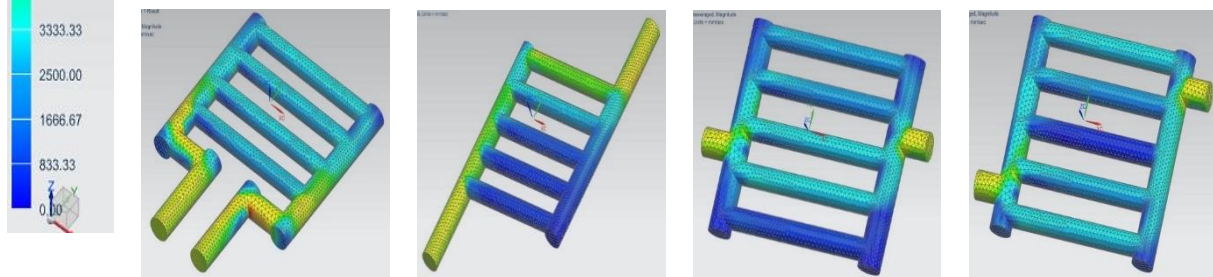
Figuur 24: Gesimuleerde scenario's met koelkanaalaansluitingen: onder (a), boven-onder (b), links-rechts_v1 (c), links-rechts_v2 (d)

Tijdens de simulaties is er gekeken naar een gelijke debietstroming doorheen de zwart genummerde koelkanalen (zie Figuur 23). Als het debiet doorheen elk koelkanaal gelijk is en vermits de koelkanalen allemaal op dezelfde afstand van de vormholte liggen, kan ervan uitgegaan worden dat de afkoeling uniform zal gebeuren. De resultaten van de vier scenario's zijn weergegeven Figuur 25. Dit zowel voor de aan- en afvoerkanalen van 8mm en 10mm diameter.

Diameter aan-en afvoerkanalen: 8 mm



Diameter aan-en afvoerkanalen: 10 mm



Figuur 25: Stromingsimulaties van de snelheid in mm/s

In NX10 wordt de snelheid in mm/s van elk deeltje van de mesh weergegeven. Uitgaande van de visuele figuren laat dit zien dat scenario 1 het beste scenario is. De reden hiervoor is dat alle dwarsliggende kanalen bij dit scenario eenzelfde verdeling van snelheid hebben. In NX10 kan ook de gemiddelde snelheid van elk meshdeeltje doorheen elke koelkanaal bekeken worden. De gemiddelde waarde van de snelheid doorheen de dwarsliggende kanalen kunnen via volgende formule omgezet worden in liter per min

$$Debiet \left(\frac{dm^3}{min} \right) = v_{gem} \cdot A \quad (1)$$

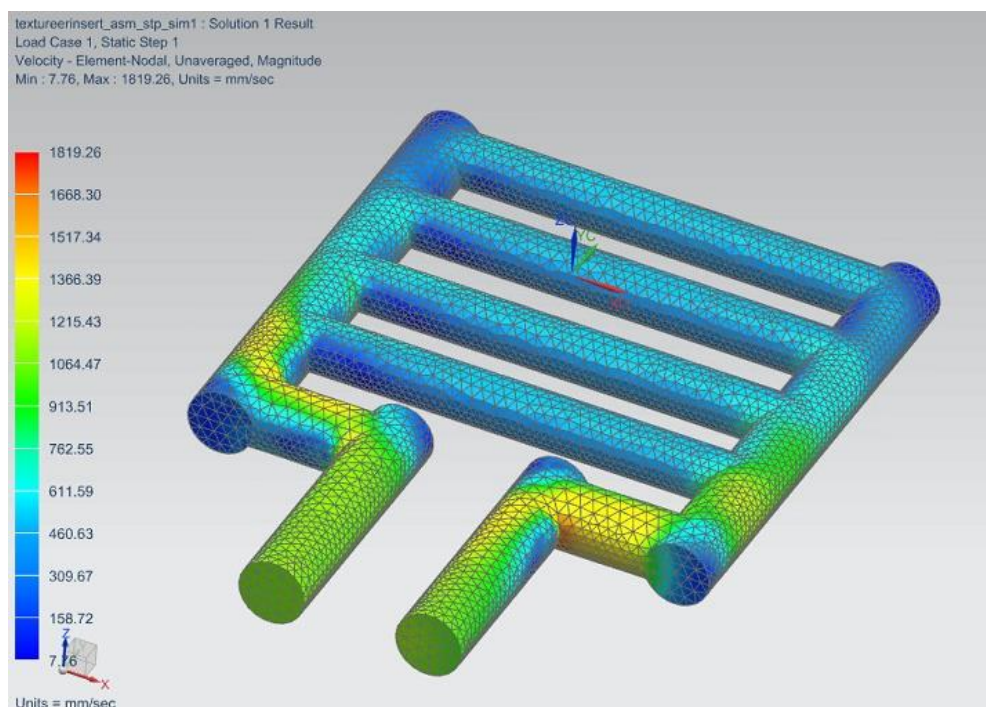
Hierbij is v_{gem} de gemiddelde snelheid die bepaald wordt in de simulatie en A de dwarsdoorsnede van een kanaal met diameter 8mm.

Het verschil in debiet van het dwarsliggende koelkanaal met de hoogste debiet met die met het laagste debiet in l/min geeft het verschildebiet in onderstaande resultatentabel.

Tabel 2: Resultaten debietsimulatie NX10

Positie aansluiting	Diameter (mm)	Vershildebiet (l)
Onder in en uit	8	2,3
	10	0,9
Onder in, boven uit	8	18,2
	10	15,2
Links en rechts V1	8	8,1
	10	6,8
Links en rechts V2	8	10,2
	10	7,8

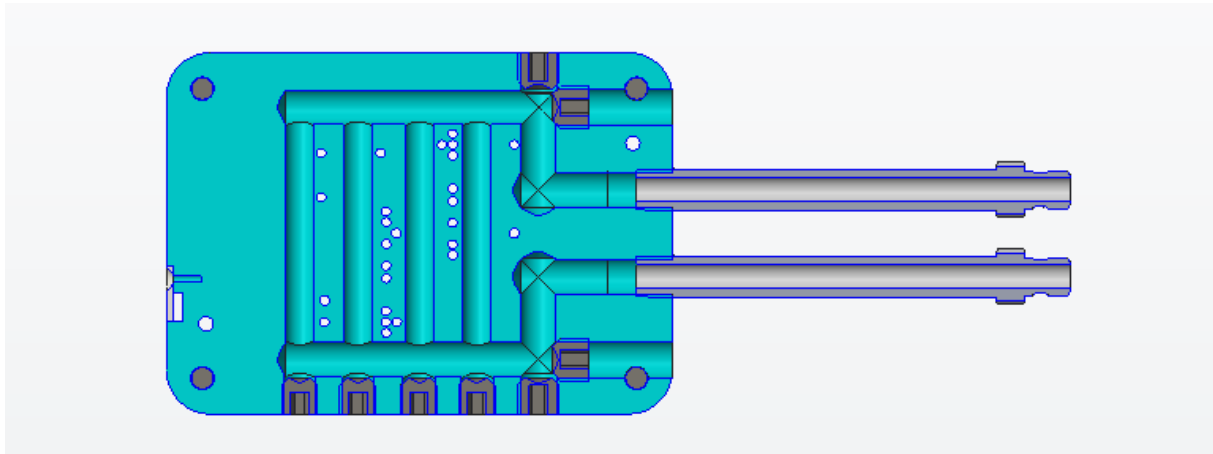
Zoals eerder aangehaald is scenario 1, waarbij de koelkanalen aan de onderkant worden aangesloten, de beste configuratie van de vier. Door bovenstaande tabel te maken kan er ook een verschil gezien worden tussen de toevoerkanalen met een diameter van 8mm en van 10mm. Aan de hand van de resultaten kan er gezegd worden dat bij toevoerkoelkanalen met een diameter 10mm minder verschil in debiet geeft bij de dwarsliggende koelkanalen dan bij een diameter van 8mm. Dit is vervolgens ook gesimuleerd bij een lager debiet van het tempereerapparaat (5l/min). Ook bij die simulatie kwam het eerste scenario met toevoerkanalen van 10mm als beste uit de simulatie.



Figuur 26: Simulatie bij een totaaldebiet van 5l/min

Uit de bekomen resultaten van de simulaties kunnen we concluderen dat het model met de onder aansluitingen voor de koelkanalen de beste opstelling is om het debiet in elk tussenliggend kanaal bijna gelijk te krijgen. Het bijkomend voordeel bij deze opstelling is dat er geen aanpassingen moeten gebeuren aan de matrijs waar het inzetstuk in geplaatst wordt.

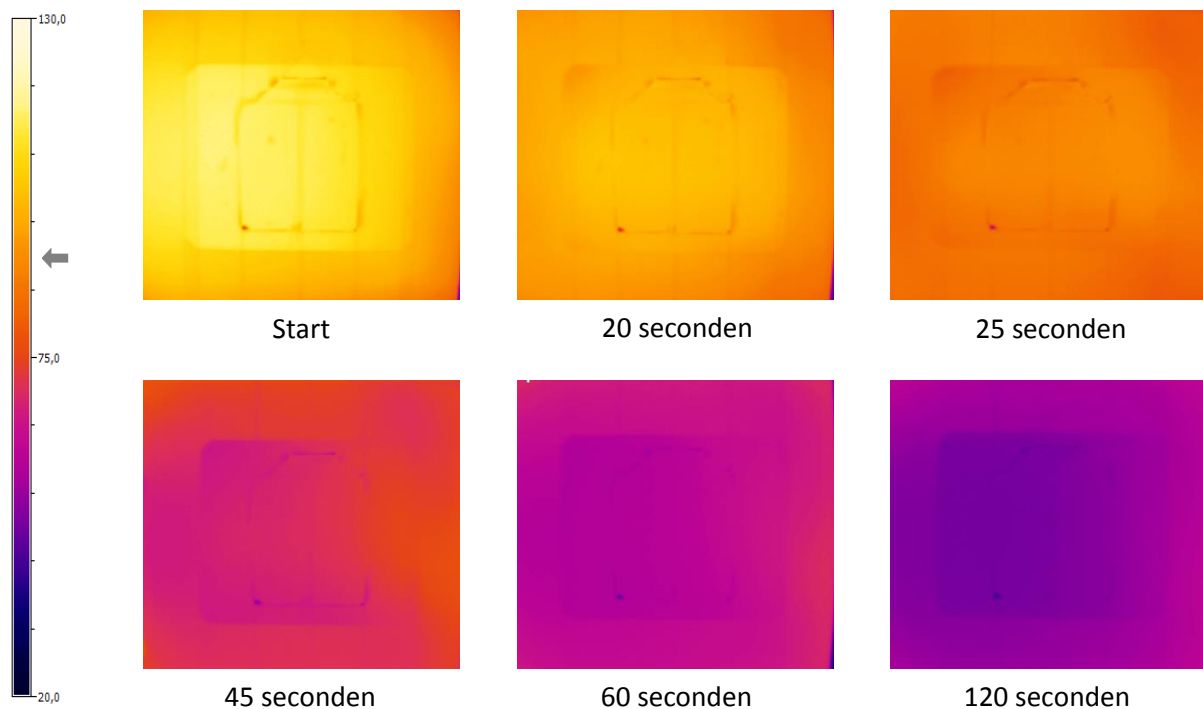
Volgende figuur laat het matrijsinzet in doorsnede zien. De radiatorstructuur kan met conventionele technieken gemaakt worden (boren, frezen). Naderhand worden de gaten aan de buitenzijde dichtgemaakt met schroefafdichtingen zoals op onderstaande figuur afgebeeld is.



Figuur 27: Doorsnede bodemblok

Thermische camera koelkanalen

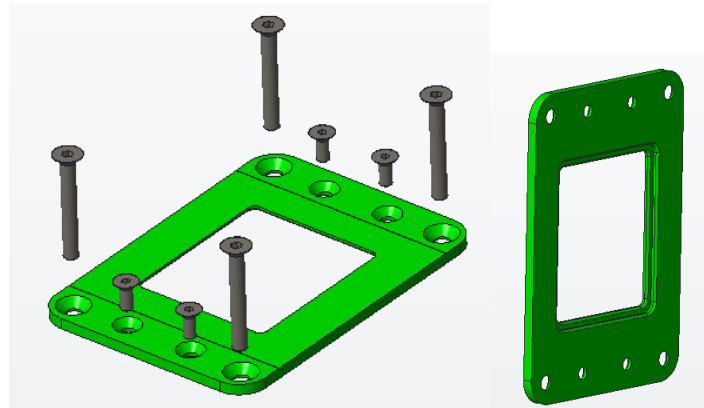
Ter controle van de simulaties is er met een thermische camera een afkoelcyclus bekeken. Uit de simulaties is voorspeld dat een gelijkmatige opwarming en afkoeling zal plaatsvinden, omdat het debiet door elk koelkanaal gelijk is. Deze gelijkmatige opwarming is noodzakelijk wanneer het variotherm spuitgietproces toegepast wordt binnen deze masterproef. Om de afkoeling en opwarming van de matrijs te visualiseren is er zwart tape op de matrijs geplakt, omwille van de gekende emissiviteit. De matrijs wordt opgewarmd tot een temperatuur van 120°C en vervolgens terug afgekoeld. De resultaten van deze test worden weergegeven op Figuur 28. Hierop is te zien dat de caviteit van het product zeer gelijkmatig afkoelt en kan vastgesteld worden dat de radiatorvorm van de koelkanalen een goede keuze is voor deze matrijsinzet.



Figuur 28: Testen van warmteverdeling in koelkanalen met een thermische camera

3.4.2 De bovenplaat

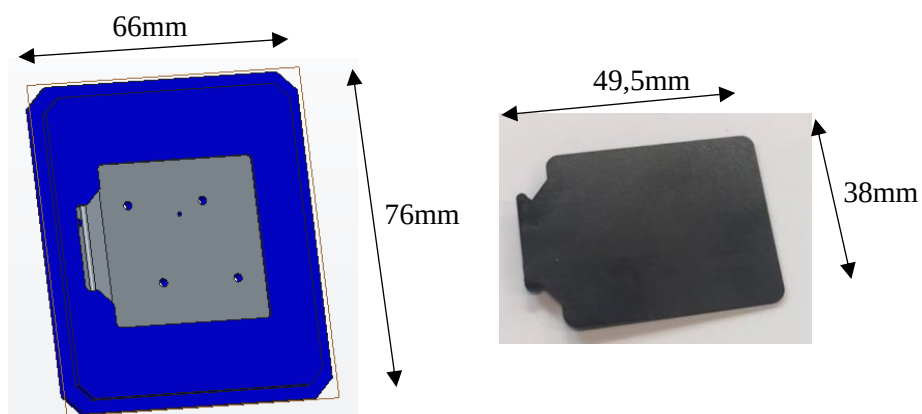
Figuur 29 toont de tussenplaat die bevestigd wordt op de bodemblok. Deze plaat zorgt voor de positionering en verankering van het productplaatje op de bodemblok. Links op de figuur kan men zien dat deze tussenplaat bevestigd wordt op de bodemblok door verzonken bouten. Rechts op de figuur kan men de uitsparing zien waar het productplaatje in komt.



Figuur 29: Bevestiging tussenplaat (links) en de onderkant van de tussenplaat (rechts)

3.4.3 Productplaatje

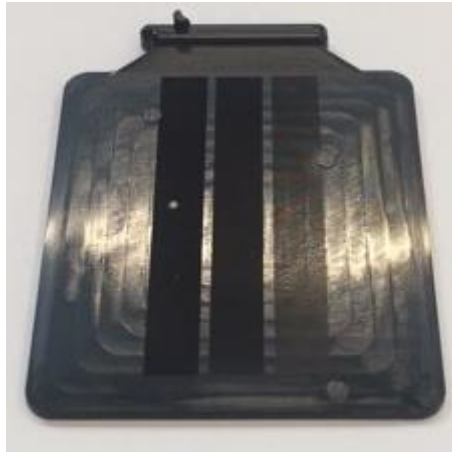
Figuur 30 toont het productplaatje dat vastgehouden wordt door de tussenplaat. Deze heeft een plaatje van 1 mm dik als vormholte, waarop de analyse op de overdracht van de microtextuur gebeurt. Dit productplaatje bevat een film aanspuiting. Dit soort aanspuiting wordt gebruikt voor vlakke producten, waarbij hoge eisen qua maatnauwkeurigheid en vlakheid worden gesteld [32]. Door deze aanspuiting is een gelijkmatige vulling gegarandeerd, waardoor een uniforme krimp ontstaat. De dimensies van het productplaatje zijn 76mm op 66mm met een dikte van 4,5mm.



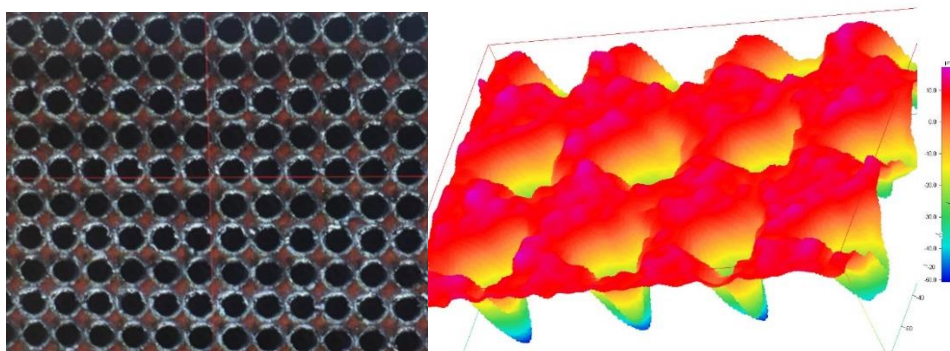
Figuur 30: Vlak productplaatje (links), kunststofproduct (rechts)

3.4.4 Product

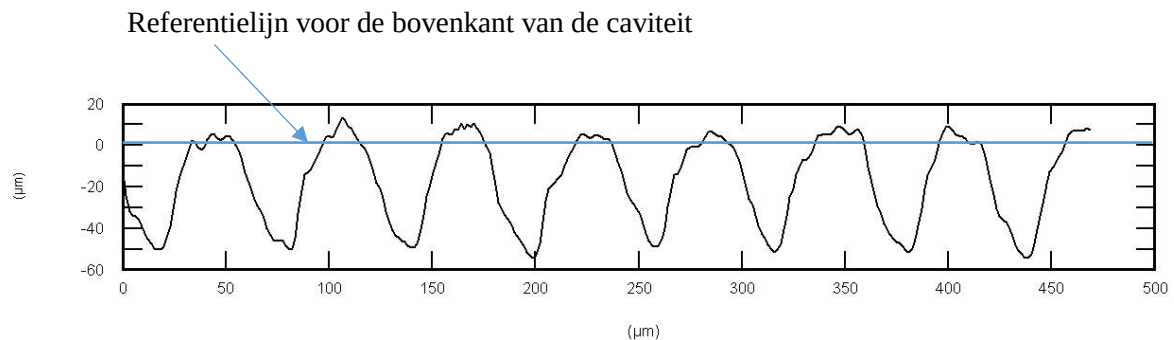
Figuur 31 toont het kunststofproduct dat verkregen wordt vanuit bovenstaand productplaatje met textuur. Hierop kan men 3 stroken zien van verschillende microtexturen. Op dit product zullen de metingen voor de overdracht van de microtextuur en de contacthoekmetingen gebeuren. Een 3D- en 2D-figuur van de textuur staan weergegeven op Figuur 32 en Figuur 33. Elk van deze texturen heeft een diepte van $\pm 60\mu\text{m}$. Getracht wordt om deze textuur door middel van het spuitgieten zo goed mogelijk over te nemen op het kunststofproduct.



Figuur 31: Kunststofproduct met 3 stroken van verschillende microtexturen

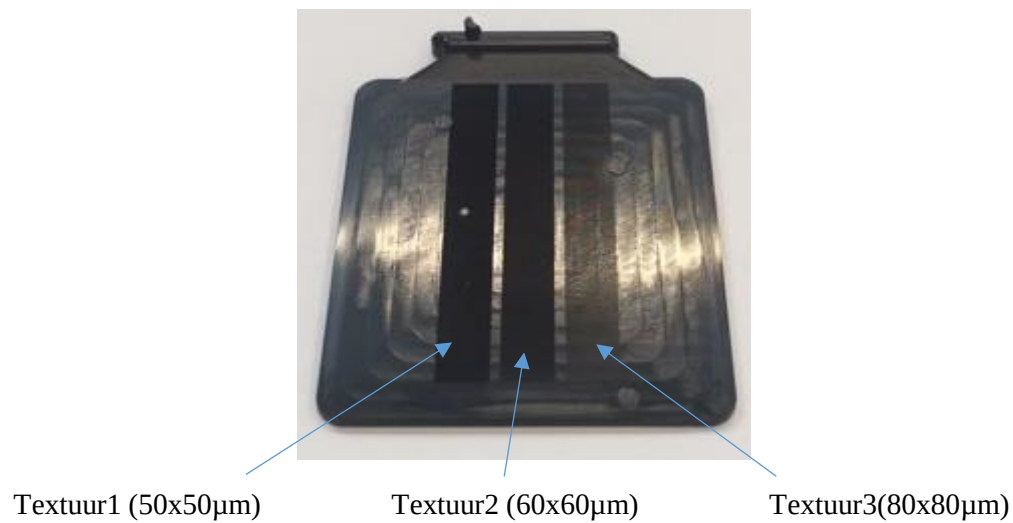


Figuur 32: 2D in het xy-vlak van de textuur op de matrijs gemeten met de microscoop van de lasermachine en 3D textuur matrijs gemeten met de MikroCAD 3D microscoop



Figuur 33: 2D van textuurdiepte in matrijs gemeten met de MikroCAD 3D microscoop

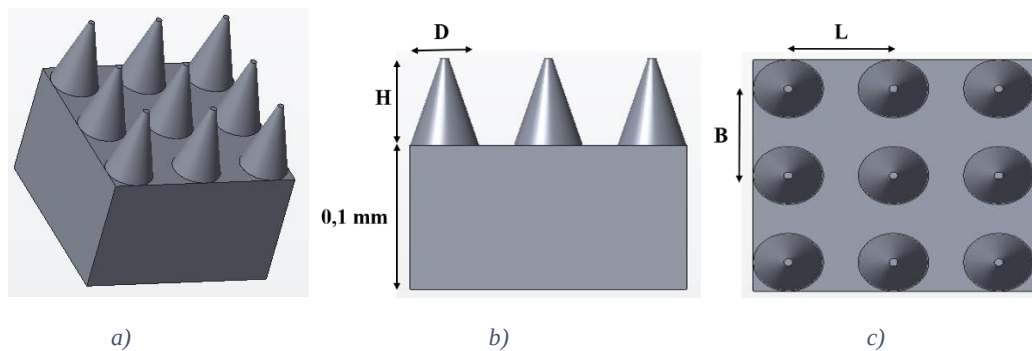
De afmetingen van de verschillende microtexturen die op Figuur 31 getoond worden, worden weergegeven op Figuur 35 en Tabel 3.



Figuur 34: Texturen van het kunststofproduct met de afmetingen tussen de textuurkegels gegeven.

Tabel 3: Afmetingen van de verschillende microtexturen

	Textuur 1 (μm)	Textuur 2 (μm)	Textuur 3 (μm)
B	50	60	80
L	50	60	80
D	40	40	40
H	60	60	60



Figuur 35: Afmetingen van de microtextuur van een deeltje van het sample; a) 3D-tekening van de microtextuur, b) zijaanzicht, c) bovenaanzicht

3.5 Lasertextureermachine

Voor deze masterproef wordt de lasertextureermachine van Sirris gebruikt. Deze lasertextureermachine, de Lasea LS5, is van het merk Lasea en wordt voornamelijk gebruikt voor textureren. Deze machine is vervolgens gebruikt voor het aanbrengen van een microtextuur op de vormholte van het productplaatje. Deze femtoseconde lasertextureermachine is speciaal ontworpen voor de techniek ‘Precision micromachining’ (zie bijlage D).



Figuur 36: De Lasea LS5 lasertextureermachine [33]

Laserbron

De laserbron bevat een zeer snelle Satsuma laser [33]. Deze laser is een hoogenergetische fiber laser met een hoge herhalingsfrequentie. De specificaties van de laserbron staan in onderstaande tabel en in bijlage E.

Tabel 4: Satsuma laserbron specificaties (zie bijlage E)

	Satsuma HP	
Golflengte	1.030	Nm
Puls lengte	350	Fs
Max. puls energie	20	μ J
Gemiddeld vermogen	10	W
Herhalingsfrequentie	0-2	MHz
Koeling	Lucht	

De waarde voor het gemiddeld vermogen is het vermogen aan de bron zelf. Het vermogen aan het te laseren oppervlak is echter lager. Dit komt omdat de laser via enkele spiegels door de lucht wordt geleid naar het te laseren oppervlak. Door deze verplaatsing door de lucht verliest de laser een deel van zijn vermogen en zal het vermogen aan het oppervlak lager zijn dan 10W (ongeveer 8,5W). De laserstraal wordt door middel van gemotoriseerde spiegels afgebogen tot een spotgrootte van minimaal 20 μ m.

XYZ-geleiding

De lineaire XY-geleidingen zijn bevestigd op een granieten blad. Met deze geleidingen worden de te laseren onderdelen met hoge nauwkeurigheid gepositioneerd. Verder beschikken de assen over een interferometrische uitlijning. Hierdoor wordt het mogelijk een nauwkeurige terugkoppeling te hebben

en zo nauwkeurigheden van $\pm 10\mu\text{m}$ te verkrijgen op de positie [34]. De andere specificaties van deze lineaire geleidingen staan in onderstaande tabel.

Tabel 5: Specificaties XY-geleidingen

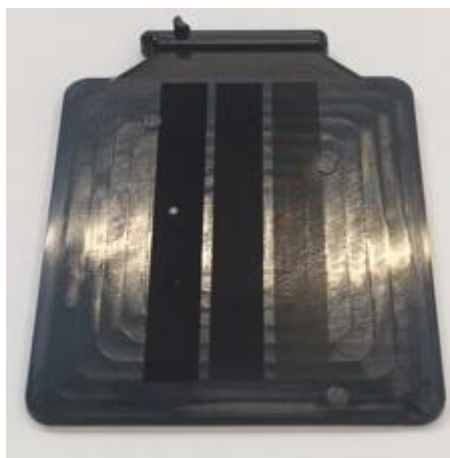
	Specificaties	
Maximale snelheid	200	mm/s
Beweging	300x300	mm
Resolutie	0,5	μm
Repeteerbaarheid	± 1	μm
Nauwkeurigheid per as	± 10	μm
XY-nauwkeurigheid na kalibratie	± 4	μm
Maximaal gewicht	10	Kg

De nauwkeurigheid, maximale snelheid en de versnelling van deze geleidingen zijn natuurlijk afhankelijk van het gewicht. Hoe hoger het gewicht dat er op de XY-tafel geplaatst wordt hoe lager de nauwkeurigheden en snelheden.

De gemotoriseerde z-as heeft dezelfde resolutie, repeteerbaarheid en nauwkeurigheid. De snelheid (50mm/s) en afstand die de geleiding kan afleggen(200mm) is verschillend van de x en y-as.

3.6 Methode

Na het ontwerpen van de matrijsinzet worden de optimale machine-instellingen voor de overdracht van de microtexturen onderzocht. Hiervoor moet er eerst een viscositeitscurve en procesvenster opgesteld worden voor de gebruikte kunststoffen. Dit wordt gedaan op het productplaatje met textuur (Figuur 30). Op deze manier wordt een venster opgesteld, waarbinnen goede kunststofproducten gemaakt worden. Dit venster geeft weer binnen welke grenzen correcte producten gemaakt kunnen worden. Als eerst wordt er gekeken naar de textuurovername bij conventioneel spuitgieten bij PP en PS. De kunststof met de slechtste overname wordt ook getest op variotherm spuitgieten. Als tweede wordt er gekeken naar de contacthoek met water voor zowel PP als PS. Hierbij wordt er ook gekeken welke van de drie overgenomen microtexturen zich het meest hydrofoob gedraagt. De afmetingen van de microtexturen die hierbij getest worden staan in De afmetingen van de verschillende microtexturen die op Figuur 31 getoond worden, worden weergegeven op Figuur 35 en Tabel 3.



Textuur1 (50x50 μ m)

Textuur2 (60x60 μ m)

Textuur3(80x80 μ m)

Figuur 34: Texturen van het kunststofproduct met de afmetingen tussen de textuurkegels gegeven.

3.6.1 Design of Experiments

Design of Experiments (DoE) is een methode die kan gebruikt worden om de invloed van de hoofdeffecten (machine-instellingen) op de textuurhoogte en contacthoek te kennen. Uit de DoE kan er bepaald worden welke hoofdeffecten of combinaties het meeste bijdragen bij de overname van textuur of voor de hoogste contacthoek.

Voor de DoE worden er een aantal parameters (n) met elkaar gecombineerd waardoor er een $n \times n$ matrix verkregen wordt. Deze parametermatrix bestaat dus uit n^2 verschillende instellingen voor de spuitgietmachine.

De gekozen parameters voor dit onderzoek zijn de volgens de literatuur belangrijkste spuitgietparameters. De vier parameters worden met elkaar gecombineerd, waardoor een 4^2 parametermatrix verkregen wordt. Al deze combinaties geven 16 verschillende instellingsmogelijkheden (zie Tabel 6) waarbij de parameters, afwisselend of samen, hoog of laag worden gezet.

Tabel 6: 16 verschillende instellingsmogelijkheden waarbij spuitgietsparameters afwisselend hoog of laag worden gezet

	Nadruk	Injectiesnelheid	Matrijstemperatuur	Matrijstemperatuur
Instelling 1	Laag	Laag	Laag	Laag
Instelling 2	Hoog	Laag	Laag	Laag
Instelling 3	Laag	Hoog	Laag	Laag
Instelling 4	Laag	Laag	Hoog	Laag
Instelling 5	Laag	Laag	Laag	Hoog
Instelling 6	Laag	Hoog	Laag	Hoog
Instelling 7	Hoog	Laag	Hoog	Laag
Instelling 8	Hoog	Laag	Laag	Hoog
Instelling 9	Laag	Laag	Hoog	Hoog
Instelling 10	Laag	Hoog	Hoog	Laag
Instelling 11	Hoog	Hoog	Laag	Laag
Instelling 12	Laag	Hoog	Hoog	Hoog
Instelling 13	Hoog	Laag	Hoog	Hoog
Instelling 14	Hoog	Hoog	Laag	Hoog
Instelling 15	Hoog	Hoog	Hoog	Laag
Instelling 16	Hoog	Hoog	Hoog	Hoog

Textuurhoogtemetingen

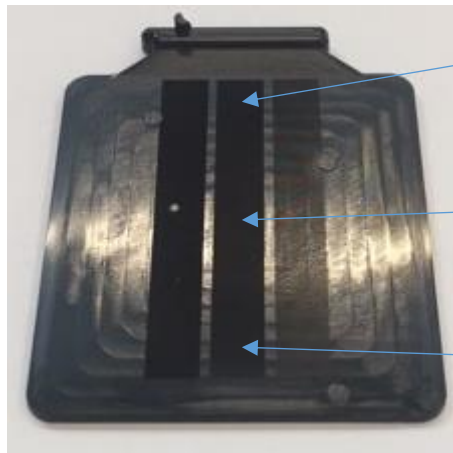
Binnen dit experimenteel onderzoek wordt eerst de DoE-analyse uitgevoerd op de overdracht van de microtextuur bij PP en PS. De invloed van de verschillende parameters op de overname van de microtextuur kan met deze DoE-analyse bepaald worden. De procesparameters die binnen dit onderzoek gevarieerd worden zijn de nadruk, injectiesnelheid, injectietemperatuur en matrijstemperatuur. Voor het opmeten van de resultaten uit de DoE-analyse zal er gebruik gemaakt worden van de MikroCAD 3D microscoop voor het bepalen van de textuurhoogtes [35].



Figuur 37: MikroCAD 3D microscoop [35]

De MikroCad microscoop van Sirris maakt gebruik van gestructureerd licht om een oppervlak in drie dimensies op te meten. Het toestel meet over een oppervlak van 1,6x1,2mm. De microscoop heeft een camerapixel van 1,23Mio en heeft een minimale onderscheidingsafstand tussen twee punten van 1,2mm. Door middel van gestructureerd licht op het oppervlak te sturen kan er aan de hand van het weerkaatste licht bepaald worden hoe het profiel van het oppervlak eruitziet.

De textuurhoogte wordt enkel gemeten op textuur 2 (60x60µm). Op elk sample worden 3 metingen uitgevoerd, nl. vooraan aan de aanspuiting, in het midden van het sample en achteraan het sample. De posities van deze metingen worden getoond op Figuur 38.



Vooraan aan de aanspuiting

Midden van het product

Achteraan het product

Figuur 38: Posities voor de metingen van de textuurhoogte

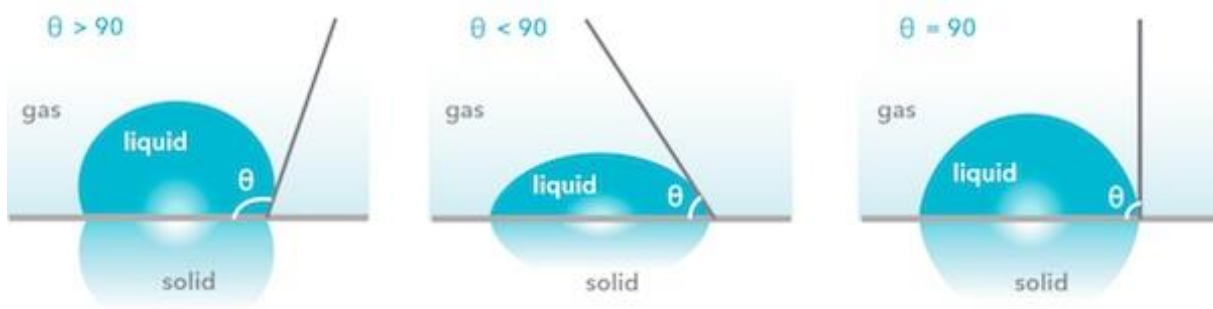
Contacthoekmetingen

Contacthoekmetingen zijn uit te voeren met verschillende vloeistoffen. Deze metingen kunnen uitgevoerd worden met: water, ethanol, glycol, dijoodmethaan, enzovoort. Maar omdat deze masterproef kijkt naar de waterafstotend karakter van getextureerde kunststofproducten is er voor water gekozen. Een spuit gevuld met water wordt in de houder geplaatst. Vervolgens wordt er een kleine hoeveelheid ($3\mu\text{l}$) door middel van een nauwkeurig gemotoriseerde geleiding uit de spuit geëjecteerd. Door de spuit omlaag te brengen zal de druppel in contact komen met het te meten oppervlak. Eenmaal er contact is kan de spuit terug omhoog worden gebracht waardoor de druppel op het oppervlak zal blijven liggen. De druppel wordt opgemeten een horizontaal geplaatste microscoop en tot slot gefit worden op een contacthoek model door middel van een programma op de computer.



Figuur 39: Meetopstelling contacthoekmeter

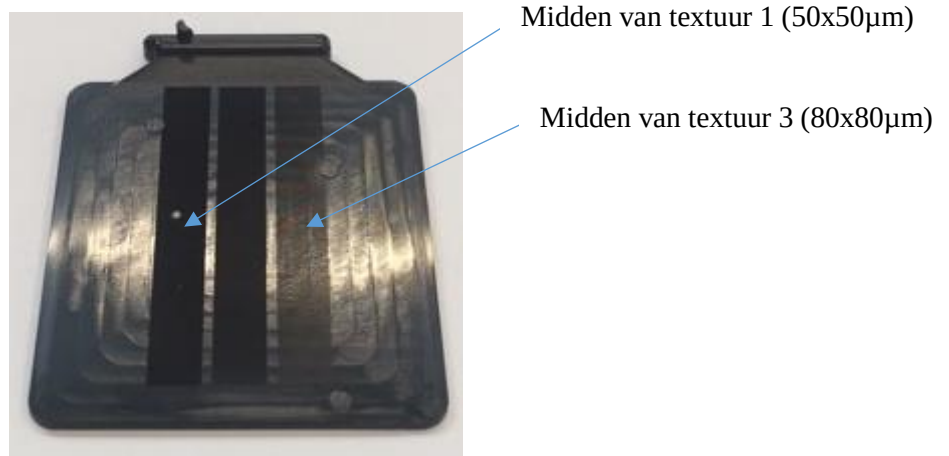
Onderstaande figuur geeft mogelijke vormen die een druppel kan aannemen wanneer deze op een oppervlak wordt geplaatst.



Figuur 40: Mogelijke druppelvormen op vast oppervlak [36]

De vorm van de druppel is een maat voor de oppervlakte-energie van het materiaal. Hoe hoger de oppervlakte-energie van het materiaal hoe lager de contacthoek. Bij contacthoeken groter dan 90° wordt er gesproken van slechte benatting of hydrofobe oppervlakken. Als daarentegen de contacthoek lager is dan 90° is er een goede benatting tot zelfs een volledige benatting van het materiaal bij een contacthoek van 0° . Bij zeer hoge contacthoeken van 150° wordt er gesproken van super hydrofobe oppervlakken.

De contacthoekmetingen worden uitgevoerd op 5 verschillende posities op het sample. Eerst wordt op dezelfde posities gemeten als de textuurhoogte (zie Figuur 38). Daarna worden ook metingen uitgevoerd op textuur 1 ($50 \times 50 \mu\text{m}$) en textuur 3 ($80 \times 80 \mu\text{m}$). De posities van deze 2 metingen worden weergegeven op Figuur 41.



Figuur 41: Posities van de contacthoekmetingen bij textuur1 en textuur 3

3.6.2 Variotherm

Voor het variotherm spuitgieten wordt de matrijstemperatuur, stapsgewijs verhoogd tijdens het inspuiten van het kunststofproduct (zie paragraaf 2.1.2). De andere drie procesparameters veranderen tussen de uiterste grenzen van het procesvenster en de viscositeitscurve. Deze analyse wordt enkel uitgevoerd bij de kunststof die de slechtste waarden geeft bij de analyses voor de textuurhoogtes bij conventioneel spuitgieten. De reden hiervoor is omdat er dan meer ruimte is voor verbetering van de textuurhoogte, waardoor de invloed van het variotherm proces op de textuurhoogte beter gevisualiseerd kan worden. Na deze analyse, wordt nog een DoE-analyse uitgevoerd op de contacthoek met water bij de overgedragen microtextuur met variotherm spuitgieten. Na het verwerken van deze resultaten wordt dit volledig onderzoek besproken en worden de verschillende resultaten met elkaar vergeleken.

4 Resultaatanalyse

In deze paragraaf worden de resultaten van DoE van de overdracht van de microtextuur en de contacthoek met water besproken en dit zowel voor PP als voor PS. Via deze DoE kunnen de optimale machine-instellingen bepaald worden voor conventioneel spuitgieten. Eerst worden de opgestelde viscositeitscurves en procesvensters besproken gevolgd door de resultaten van de DoE. Voor de DoE's is er gekeken naar de overdracht en de contacthoek van textuur 2 (zie Figuur 34) waarbij de kegels op een x en y afstand van 60µm van elkaar liggen. Uit deze resultaten wordt er dan bij de beste instelling een vergelijking gemaakt op vlak van hydrofobiciteit met de twee andere texturen met een onderlinge kegelfstand van 50x50µm en 80x80µm. Tot slotte is er een extra test met variotherm uitgevoerd bij de kunststof die bij conventioneel de laagste textuurhoogte haalt.

4.1 Conventioneel spuitgieten

4.1.1 Procesvenster opstellen

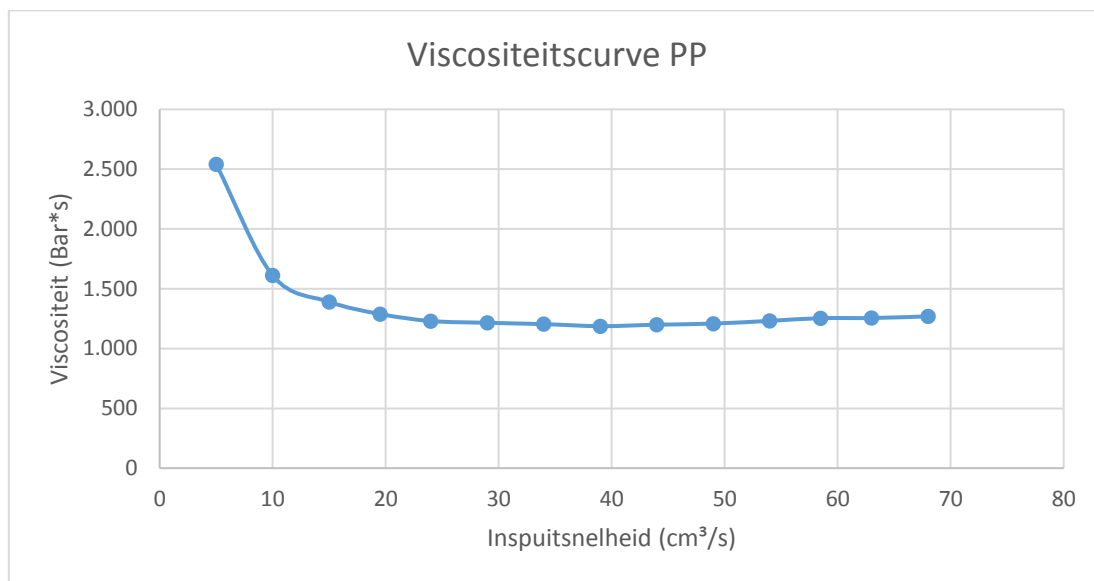
Viscositeitscurve

De viscositeitscurve is het eerste wat opgesteld moet worden voor de gebruikte kunststoffen. Voor deze masterproef is deze curve opgesteld voor een andere matrijs. De reden hiervoor is dat hotrunner van de matrijs met het ontworpen inzet zorgde voor verkeerde weergave van injectiedrukken. Het product van de matrijs waarop deze curves zijn opgesteld is gelijkaardig aan het ontworpen product voor deze masterproef. Zo hebben ze een gelijkaardige aanspuiting en zijn beide producten even dik. Het uitvoeren van deze viscositeitscurve gebeurt in een aantal stappen zoals vermeld in paragraaf 2.2. De opgemeten waarden uit deze stappen worden vervolgens gebruikt voor het maken van de viscositeitscurve. Onderstaande tabel toont de opgemeten waarde voor PP.

Tabel 7: Metingen voor het opstellen van de viscositeitscurve van PP

Inspuitsnelheid (cm ³ /s)	Piekdruk (bar)	Inspuittijd (s)	Viscositeit (Bar*s)
68	601	2,11	1269
63	595	2,11	1255
58,5	589	2,13	1254
54	573	2,15	1232
49	557	2,17	1209
44	543	2,21	1200
39	525	2,26	1187
34	519	2,32	1204
29	506	2,40	1215
24	492	2,50	1230
19,5	483	2,67	1289
15	472	2,95	1391
10	461	3,50	1612
5	495	5,13	2541

De waarde van de viscositeit uitgezet in functie van de injectiesnelheid geeft volgende grafiek.



Figuur 42: Viscositeitscurve PP

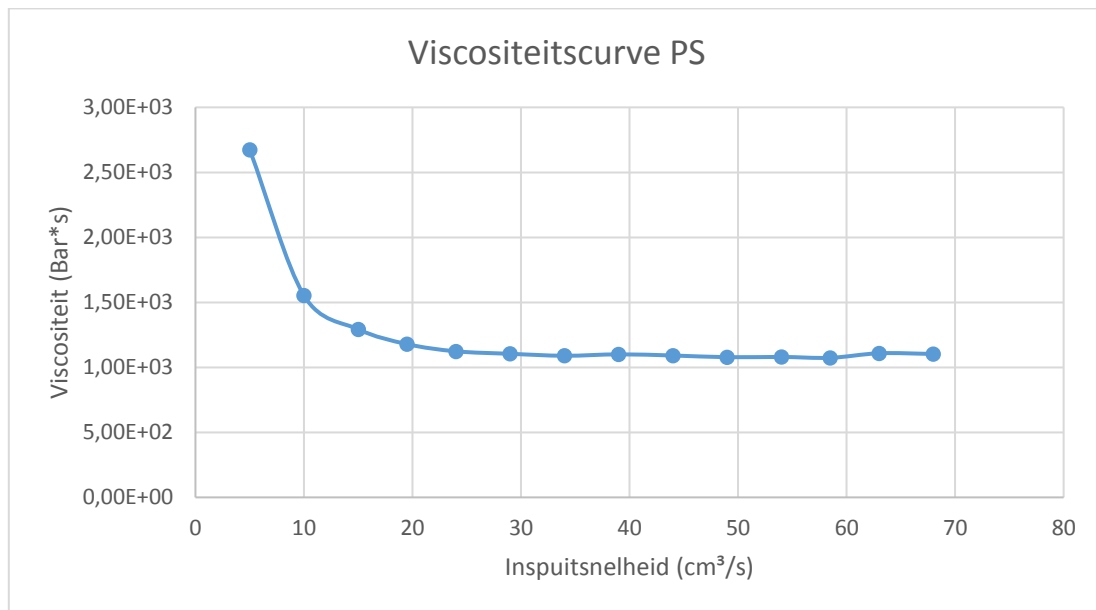
Als grenzen voor de inspuitsnelheid is er gekozen voor 39 cm³/s en 68 cm³/s. Tussen deze twee injectiesnelheden blijft de viscositeit zo goed als constant.

Ook voor de viscositeitscurve van PS is de piekdruk en de inspuittijd opgemeten bij elke injectiesnelheid. De opgemeten In staan deze opgemeten waardes en de berekende viscositeit.

Tabel 8: Metingen voor het opstellen van de viscositeitscurve van PS

Inspuitsnelheid (cm³/s)	Piekdruk (bar)	Inspuittijd (s)	Viscositeit (Bar*s)
68	525	2,1	1103
63	525	2,11	1109
58,5	506	2,12	1074
54	505	2,14	1080
49	497	2,17	1078
44	494	2,21	1091
39	489	2,25	1100
34	472	2,31	1089
29	462	2,39	1104
24	449	2,5	1124
19,5	442	2,67	1179
15	440	2,94	1293
10	446	3,48	1553
5	525	5,09	2674

De viscositeitscurve zelf van PS ziet er gelijkaardig uit als die van PP.

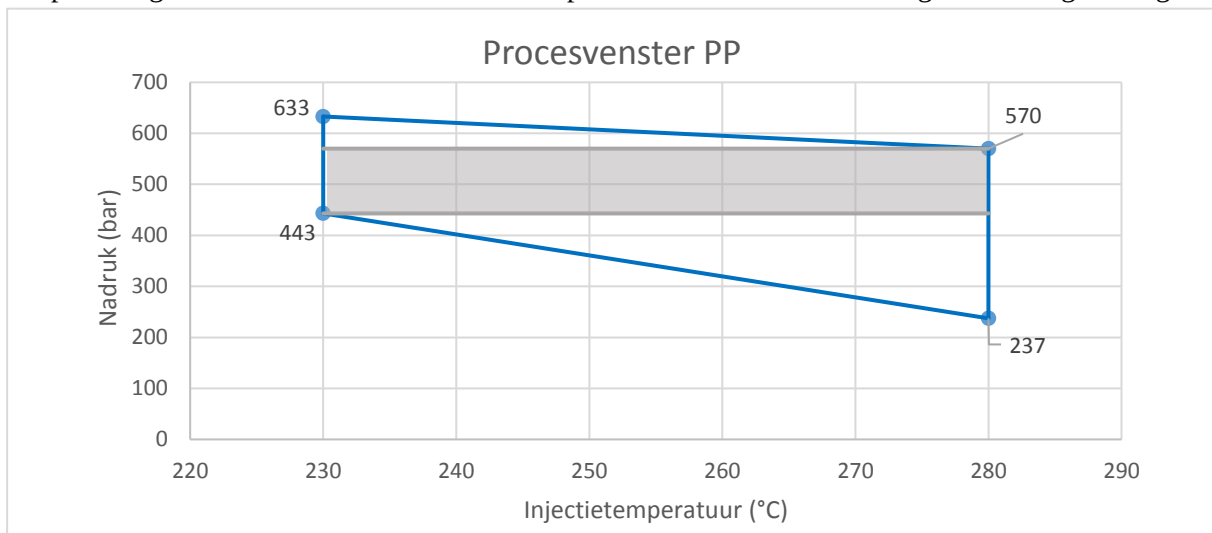


Figuur 43: Viscositeitscurve PS

Ook hier worden als inspuitgrenzen 39 cm³/s en 68 cm³/s genomen omdat daar de curve constant blijft.

Procesvenster

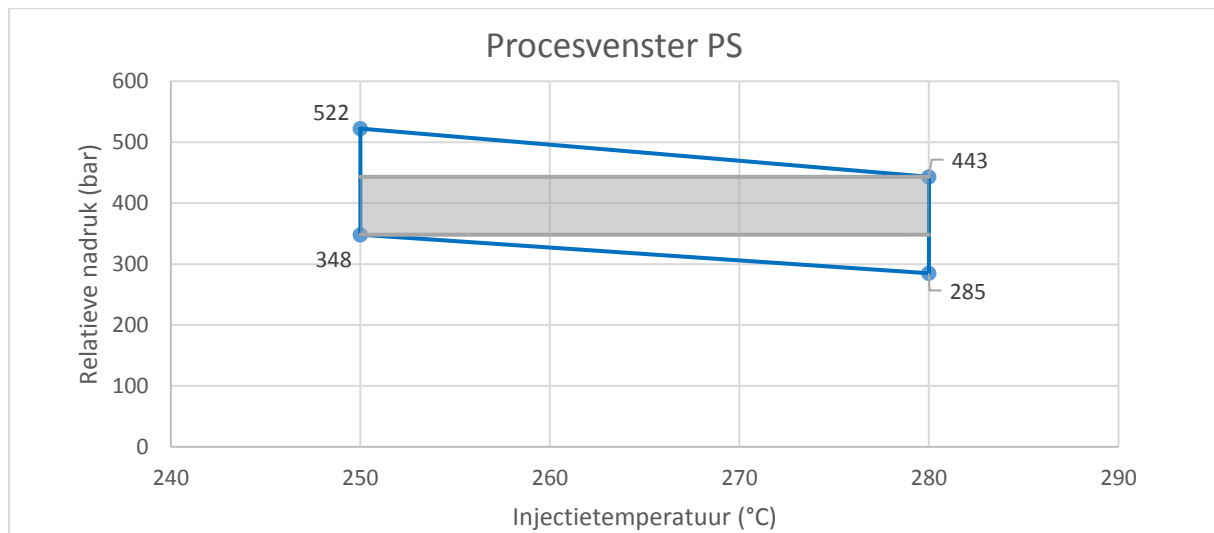
De bedoeling van het procesvenster is het zoeken van de onder- en bovengrens van de nadruk waarbinnen er goede producten worden gemaakt. Dit zowel op hoge als op lage temperatuur. Deze temperaturen zijn bepaald uit verschillende bronnen ([37], [38] en [39]). Voor PP ligt dit temperatuurgebied tussen 230°C en 280°C. Het procesvenster voor PP is weergegeven in volgende figuur.



Figuur 44: Procesvenster PP

Op de lage temperatuur (230°C) kan de druk gevarieerd worden tussen 443 en 633bar. Op hoge temperatuur(280°C) ligt deze tussen 237 en 570bar. Deze grenzen voor de DoE zijn 443 en 570bar; Binnen deze nadrukken kunnen er zowel op hoge als lage temperatuur goede producten gemaakt worden.

Voor PS wordt een gelijkaardig venster bekomen. Verschillend van het venster van PP is dat bij PS de injectietemperatuurgrenzen, die ook bepaald zijn uit de literatuur, van 250°C tot 280°C liggen.



Figuur 45: Procesvenster PS

De gevonden nadrukrange op lage temperatuur (250°C) ligt voor PS tussen 348 en 522 bar. Voor de hoge temperatuur (280°C) is de nadruk gelegen tussen 285 en 443 bar. Voor de DoE wordt hier voor de ondergrens 348 bar en de bovengrens 443 bar genomen. De reden hiervoor is dat binnen deze grenzen, zowel op hoge als lage temperatuur, goede producten gemaakt worden (zie Figuur 45).

4.1.2 Beschrijving van de DoE-analyse

In deze masterproef is de Design of Experiment (DoE) een parameterstudie met nadruk, injectietemperatuur, matrijstemperatuur en injectiesnelheid als parameters.

Parametermatrix

De DoE is gebaseerd op een parametermatrix. De parameters voor deze matrix worden bepaald uit datasheets, viscositeitscurves en procesvensters. De gevonden parameters zijn:

- Injectiesnelheid

De injectiesnelheid wordt bepaald aan de hand van de viscositeitscurves. Voor PP en PS zijn deze grenzen van 39 tot 68 cm³/s gekozen.

- Nadruk

De nadruk grenzen voor de DoE zijn bepaald uit het procesvenster. Voor PP mag de nadruk variëren tussen 443 en 570 bar. Bij PS mag deze variëren tussen 348 en 443 bar.

- Injectietemperatuur

Deze parameters zijn bepaald uit de literatuur voor beide kunststoffen. Voor PP ligt deze temperatuur tussen 230°C en 280°C. Voor PS is dit 250°C en 280°C.

- Matrijstemperatuur

Ook deze zijn bepaald uit de literatuur. Voor PP ligt de matrijstemperatuur tussen 30 en 60°C en voor PS tussen 60 en 80°C.

Een samenvatting van de grenzen voor PP en PS van de vier parameters staat in onderstaande tabel.

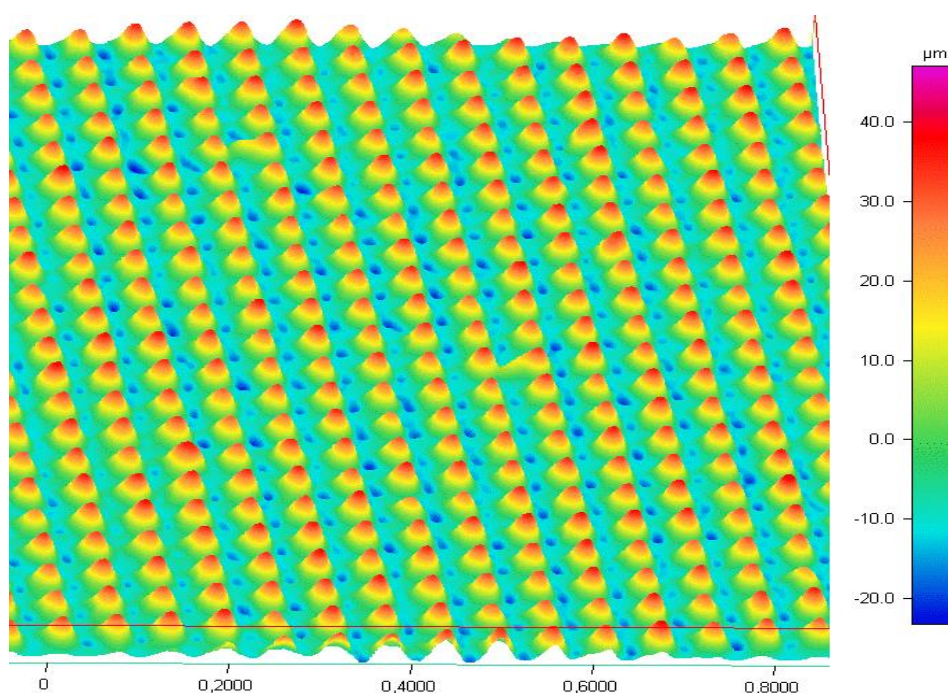
Tabel 9: Onder- en bovengrenzen van de parameters voor de DoE

Parameter	Eenheid	PP		PS	
		Ondergrens	Bovengrens	Ondergrens	Bovengrens
Injectiesnelheid	cm ³ /s	39	68	39	68
Nadruk	Bar	443	570	348	443
Injectietemperatuur	°C	230	280	250	280
Matrijstemperatuur	°C	30	60	60	80

Door de vier parameters met elkaar te combineren worden een 4X4 matrix bekomen zoals weergegeven in Tabel 8.

4.1.3 Resultaten textuuroverdracht

Deze paragraaf gaat over de mate van overname van de textuur door kunststofproducten. De textuurhoogte werd voor elke kunststofproduct op drie verschillende posities met de MikroCAD 3D microscoop opgemeten. Zo is het mogelijk om een verloop van textuurhoogte te krijgen, van de voorzijde naar achterzijde op het product. Onderstaande afbeelding toont een 3D scan van de microscoop bij een product uit PP.



Figuur 46: 3D van textuur op kunststofproduct

Voor elk product van de DoE's is er dergelijke scan op de drie posities genomen. Uit deze scans is de gemiddelde textuurhoogte gehaald. Voor PP wordt er een maximale textuurhoogte van $\pm 50 \mu\text{m}$ behaald terwijl voor PS dit maximaal $\pm 30 \mu\text{m}$ is. Al de opgemeten resultaten zijn gebruikt als input voor de statistische verwerking van de DoE.

Controle op variabiliteit van restwaardes

Figuur 47 toont aan de linkerkant een curve die het cumulatieve procentuele aantal geeft als functie van de restwaarde en een histogram. Hieruit kan men besluiten dat de veronderstelling van een normale verdeling voldaan is. Aan de rechterkant worden twee grafieken van de restwaarde als functie van gefitte waarde en volgorde gegeven. Hiermee kan gecontroleerd worden of er geen variabiliteit door externe factoren doorheen de tijd wordt toegevoegd. Voor deze grafieken stelt Minitab een analytisch model op voor het voorspellen van de textuurhoogte bij een bepaalde machine instelling. Met dit model worden dan de restwaardes berekend. Deze restwaarde is het verschil tussen de voorspelde waarde met de gemeten waarde van de textuurhoogte. Indien alle parameters laag zijn bekomt het model bv. 12 μm in textuurhoogte, terwijl de gemeten waarde 10 μm was. In dit geval is de restwaarde dan gelijk aan 2 μm . Statistische verwerking van de DoE vereist dat de observaties normaal en onafhankelijk verdeeld zijn. Dit wordt bij de significantie van de effecten gecontroleerd door middel van een T-test.

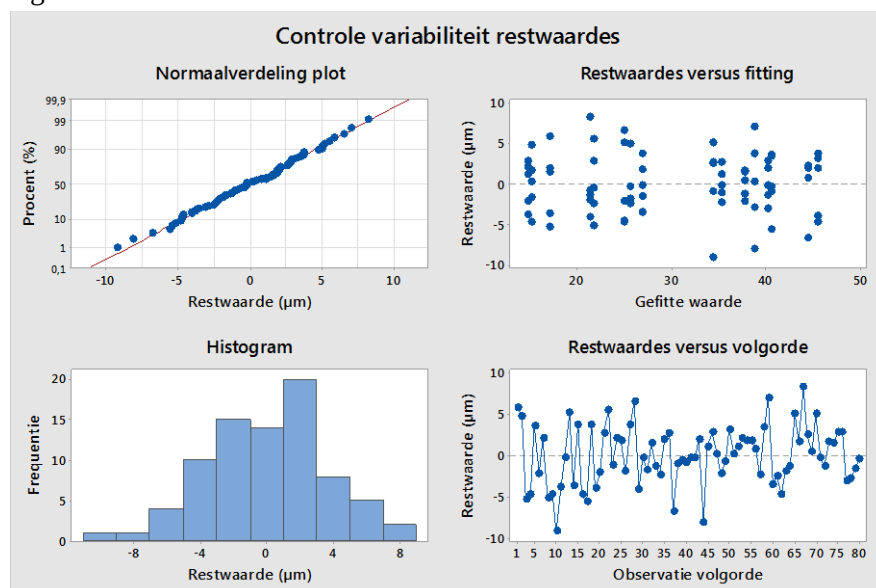
De normaalverdeling plot geeft op de y-as de cumulatieve frequentie weer in functie van de restwaarde (x-as). De uitgezette punten van de restwaardes liggen allemaal op de rode lijn. Indien dit niet zo is, dan betekent dit zijn er uitschieters of zijn de resultaten niet normaal verdeeld.

Het histogram geeft op de y-as de frequentie weer dat de restwaarde voorkomt, terwijl op de x-as de restwaarde gegeven wordt. Dit histogram vertoont hier een Gauss-curve, wat nogmaals wijst op een normaalverdeling van de resultaten.

Aan de rechterkant van de figuur staan de restwaarden t.o.v. de gefitte waarden en de restwaarden t.o.v. de volgorde van metingen. De gefitte waarde is de waarde van het punt dat op het berekende vlak van de normaalverdeling plot ligt. De observatie volgorde betekent de volgorde waarop de samples gemeten zijn. De samples zijn dus opgemeten vanaf sample 1 t.e.m. sample 80. In beide grafieken zou er geen patroon mogen gezien worden. Indien een patroon te zien is, bv. alle punten met lage waarden linksonder en alle punten met hoge waarden rechtsboven op de grafiek, dan betekent het dat het proces beïnvloed is door externe factoren. Een voorbeeld van zo een externe factor kan een deur zijn die openstaat, waardoor de matrijstemperatuur beïnvloed wordt.

In beide grafieken is er geen patroon te zien, zodat vastgesteld kan worden dat dit goede resultaten zijn zonder invloed doorheen de metingen en tijd van omgevingsfactoren.

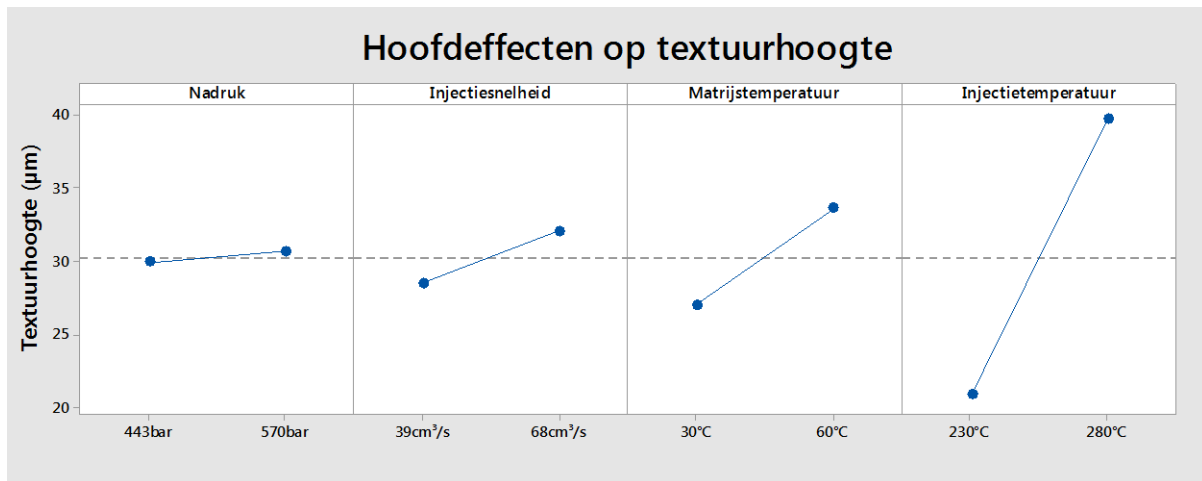
De DoE van de textuurhoogte van PS is ook gecontroleerd op normaalverdeling en externe factoren. Deze voldeed hier ook aan waardoor het analytisch model ook aangenomen mag worden. In bijlage F is deze figuur terug te vinden.



Figuur 47: Resultaten van textuurhoogte bij PP uit Minitab

Invloed van de hoofdeffecten op textuurhoogte

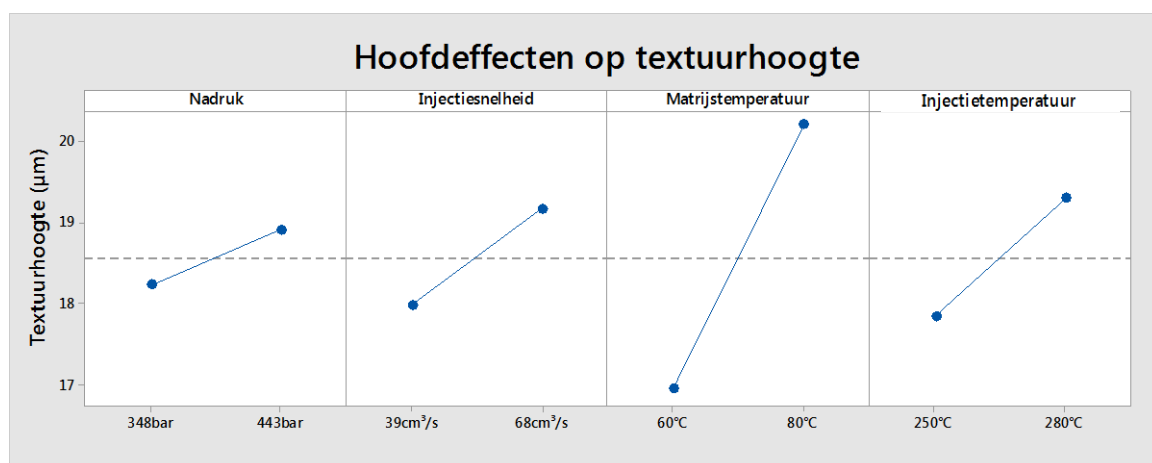
Figuur 48 toont de resultaten van de hoofdeffecten op de textuurhoogte bij PP. Op de y-as staat telkens de textuurhoogte, terwijl op de x-as telkens de grenzen staan van de verschillende parameters.



Figuur 48: hoofdeffecten op textuurhoogte bij PP vanuit Minitab

Op deze figuur is te zien dat de invloed van de nadruk op de textuurhoogte het kleinst is. De injectiesnelheid en matrijstemperatuur hebben iets meer invloed op de textuurhoogte. De injectietemperatuur daar en tegen heeft hier duidelijk het meeste effect. Indien de injectietemperatuur op een hoge waarde wordt gezet, dan zal de viscositeit van de kunststof verlagen. Hierdoor zal deze beter in de textuurholtes kunnen vloeien.

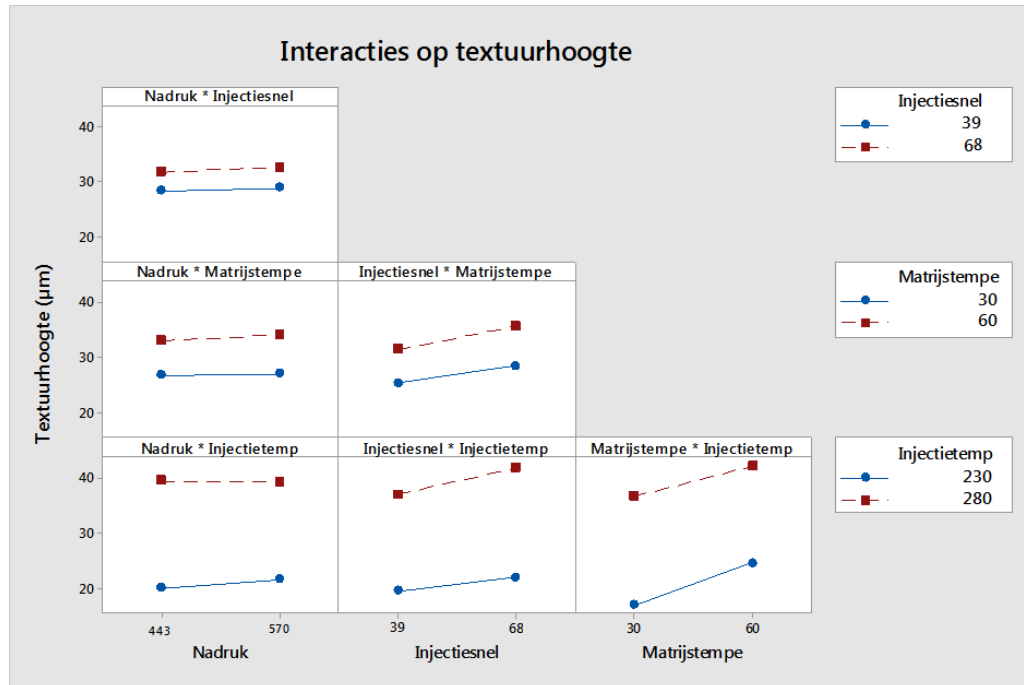
De hoofdeffecten van de verschillende parameters op de textuurhoogte bij PS worden weergegeven op Figuur 49. Op deze figuur kan men zien dat de matrijstemperatuur het meeste invloed heeft op de textuurhoogte, terwijl dit bij PP de injectietemperatuur is. De reden hiervoor is dat PP een semi-kristallijne kunststof is, waarvan de glastransitietemperatuur zeer laag is (onder de 0°C). Hoe ver de temperatuur van de kunststof van de glastransitietemperatuur zit bepaalt mee de viscositeit van de kunststof. Bij PS ligt deze temperatuur rond de 100°C. Hierdoor kan deze temperatuur bij PS eerder bereikt worden bij het afkoelen van het materiaal in de matrijs, waardoor de viscositeit van de PS sneller hoog is. Door de matrijstemperatuur hoger te zetten bij PS, zal de viscositeit van het materiaal langer laag blijven. Op deze manier kunnen de textuurholtes bij PS veel beter gevuld worden dan bij een lage matrijstemperatuur.



Figuur 49: De hoofdeffecten van de verschillende parameters op de textuurhoogte bij PS

Interacties op textuurhoogte

Figuur 50 toont de effecten van de interacties tussen parameters op de textuurhoogte bij PP. Op deze manier kan gecontroleerd worden of de parameters elkaar onderling beïnvloeden. Indien bij een grafiek de twee lijnen evenwijdig t.o.v. elkaar staan, betekent dit dat ze elkaar niet beïnvloeden. Indien de lijnen elkaar kruisen beïnvloeden ze elkaar wel. Als de helling groter wordt binnen de grenzen, dan beïnvloeden ze elkaar positief terwijl als een kleinere helling een negatieve invloed weergeeft.



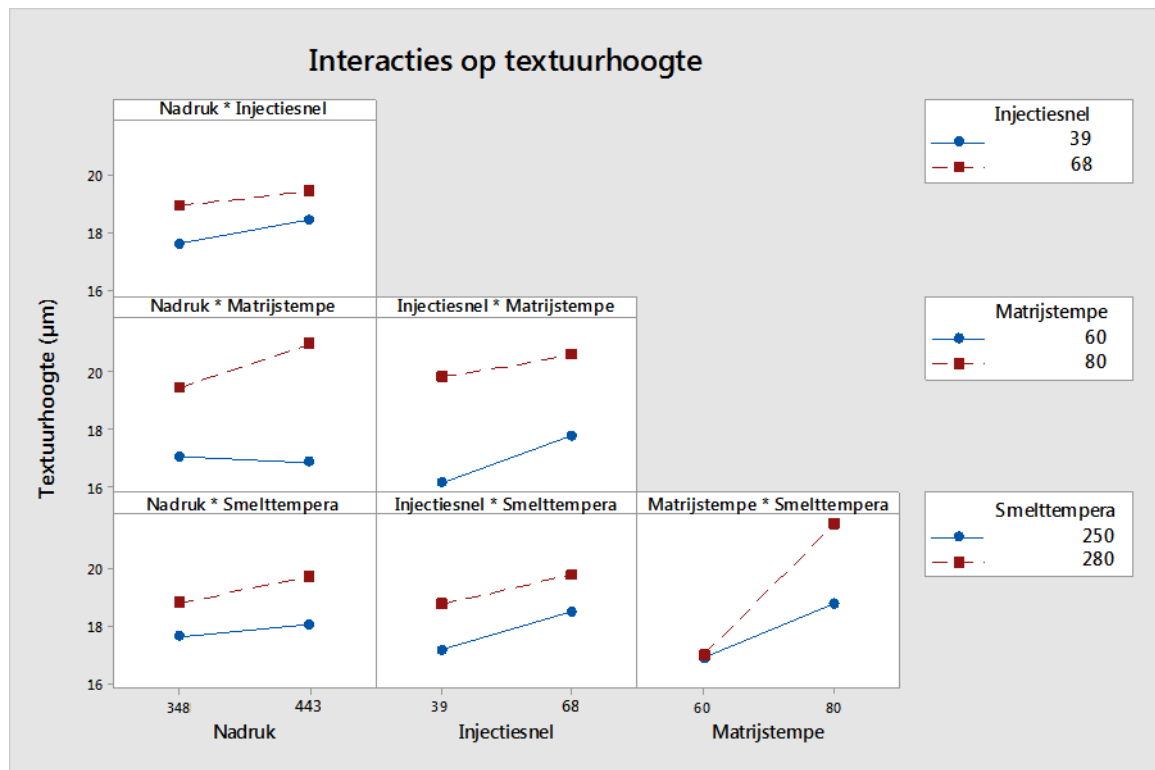
Figuur 50: Effecten van de interacties tussen de parameters bij de textuurhoogte van PP

De lage glastransitietemperatuur van PP zorgt ervoor dat tijdens het afkoelen de viscositeit langer laag blijft. Bij deze semi-kristallijne kunststof wordt een grote krimp verwacht, die kan zorgen voor een slechte dimensiebeheersing. Dit is echt niet het geval binnen de textuurholtes. Door het zeer kleine volume van zo een textuurholte en veel contact van de kunststof met de matrijs binnen deze holte zal deze kunststof hier sneller afkoelen. Door het snel afkoelen heeft PP niet de tijd gehad om te kristalliseren, waardoor minder krimp ontstaat op deze plaats.

Op Figuur 50 kan men voor PP zien dat overal de lijnen evenwijdig staan tegenover elkaar. Op deze figuur wordt nogmaals aangetoond dat de injectietemperatuur de meeste invloed heeft op de textuurhoogte. Door deze injectietemperatuur dan nog eens te combineren met een hoge matrijstemperatuur kunnen zelfs nog hogere textuurhoogtes verkregen worden. Dit komt doordat bij een hogere temperatuur de kunststof minder viskeus is, waardoor de textuurholtes beter gevuld kunnen worden. Binnen de textuurholtes zelf zal hier nog altijd weinig krimp optreden. Zoals hierboven aangegeven heeft de textuurholte een klein volume, waar veel contact plaatsvindt tussen de kunststof en de matrijs en dus de kunststof snel afkoelt op deze plaats.

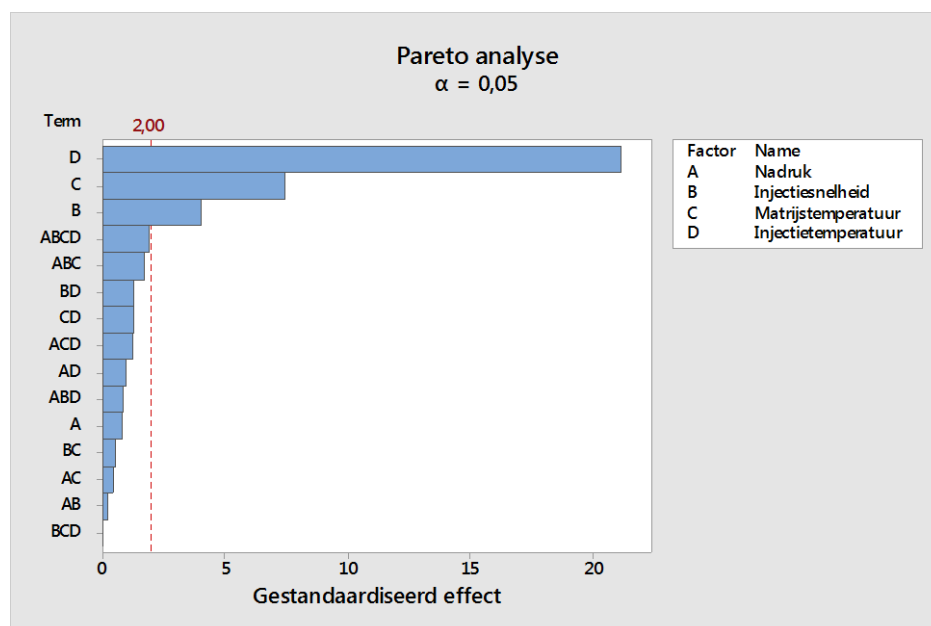
Voor PS worden deze interacties gegeven op Figuur 51. Hierop kan men zien dat de matrijstemperatuur de nadruk beïnvloedt. Indien men bij een hoge matrijstemperatuur de nadruk verhoogt, dan zal er een stijging zijn in de textuurhoogte. De reden hiervoor is dat de hoge matrijstemperatuur ervoor zorgt dat de kunststof langer vloeibaar blijft in de matrijs, waardoor de nadruk meer invloed zal krijgen. Indien bij een lage matrijstemperatuur de nadruk wordt verhoogd, dan is de textuurhoogte nagenoeg constant. Dit komt omdat PS een amorfe kunststof is en sneller afvriest bij een lage matrijstemperatuur dan een semi-kristallijne kunststof. Bij de matrijstemperatuur in combinatie met de injectietemperatuur is er ook een duidelijke interactie te zien. Bij een lage injectietemperatuur heeft de matrijstemperatuur veel

minder invloed dan bij een hoge injectietemperatuur. Dit komt ook weer doordat PS amorf is, waardoor deze sterk wordt beïnvloed door de temperaturen. Bij een lage injectietemperatuur zal de kunststof veel sneller stollen in de matrijs, dan bij een hoge injectietemperatuur. Door de matrijstemperatuur te verhogen bij een lage injectietemperatuur, zal deze dus meer invloed hebben (t.o.v. de invloed bij een hoge injectietemperatuur) doordat de kunststof minder snel stolt in de matrijs.



Figuur 51: Effecten van de interacties tussen de parameters bij de textuurhoogte van PS

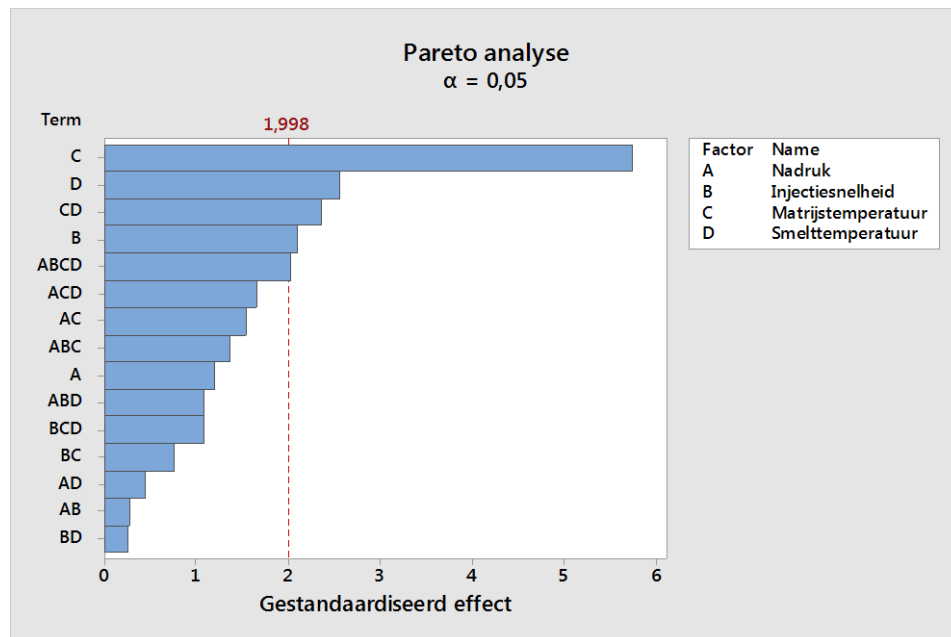
Figuur 52 toont de Pareto analyse van PP. Deze analyse laat zien welke parameters (en ook combinaties van deze parameters) significant zijn en welke niet. Op deze figuur staan op de y-as de parameters en de combinaties van de parameters en op de x-as staat het gestandaardiseerd effect. Dit gestandaardiseerd effect is het effect dat de parameter heeft op de textuurhoogte nadat ze herschaald en gedeeld is door de standaardafwijking. Het herschalen kan duidelijk gemaakt worden a.d.h.v. een voorbeeld: De matrijstemperatuur heeft een range tussen de onder- en bovengrens van 30°C terwijl de injectietemperatuur een range heeft van 50°C. Als de ondergrens van beide parameters met 10°C verhoogd wordt dan zullen beide parameters een andere invloed hebben op de textuurhoogte. Bij de matrijstemperatuur is deze verhoging 1/3 van de range terwijl bij de injectietemperatuur dit 1/5 is. Dit heeft als gevolg dat de parameters niet met elkaar vergeleken kunnen worden. Door de grenzen te herschalen tussen -1 en 1 zal bij een verhoging het effect van de parameters wel met elkaar vergeleken kunnen worden. Het herschalen van het effect geeft dus een eerlijke vertoning van de effecten van de parameters op dezelfde schaal. In onderstaande figuur is het gestandaardiseerd effect van de matrijstemperatuur het grootste. Dit wilt dus zeggen dat deze het meeste invloed heeft op de textuurhoogte.



Figuur 52: Pareto analyse bij de textuurhoogte van PP

De significantie grenswaarde (α -waarde) is aangeduid met een rode streeplijn. Deze waarde is de gestandaardiseerde waarde voor het 0,05 significantieniveau. Indien de gestandaardiseerde waarde van een parameter of een combinatie van parameters hoger is dan het significantieniveau, waarbij het gestandaardiseerd effect gelijk is aan 2, dan wilt dit zeggen dat deze een significantie invloed hebben op de textuurhoogte. Binnen deze Pareto analyse kan men zien dat voor de textuurhoogte bij PP de injectietemperatuur, matrijstemperatuur en injectiesnelheid elk apart een significante invloed hebben op de textuurhoogte.

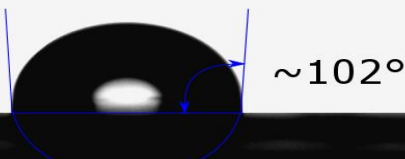
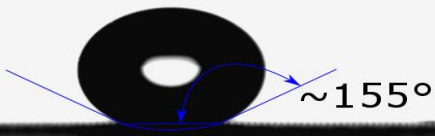
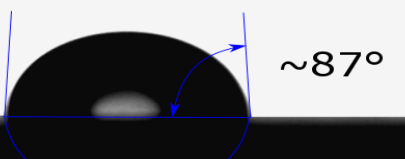
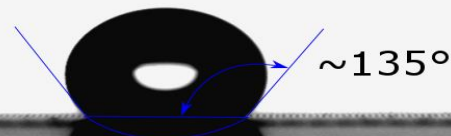
Figuur 53 toont dan de Pareto analyse van PS. Deze figuur laat zien dat bij PS meerdere parameters en combinaties van parameters een significante invloed hebben op de textuurhoogte. Hierbij heeft de matrijstemperatuur, de injectietemperatuur en ook de combinatie van beide een significante invloed op de textuurhoogte. De injectiesnelheid en de combinatie van vier parameters wordt nog net als significant beschouwd.



Figuur 53: Pareto-analyse bij de textuurhoogte van PS

4.1.4 Resultaten contacthoekmetingen

In deze paragraaf worden de resultaten van de DoE van de contacthoekmetingen besproken. De contacthoeken zijn op de productplaatjes voor textuur twee van voor naar achter bekeken. Volgende figuur toont enkele contacthoekmetingen voor PP en PS. Links zijn figuren van metingen van het kunststofproduct zonder textuur en rechts met textuur.

	Zonder textuur	Met textuur
Polypropyleen	 $\sim 102^\circ$	 $\sim 155^\circ$
Polystyreen	 $\sim 87^\circ$	 $\sim 135^\circ$

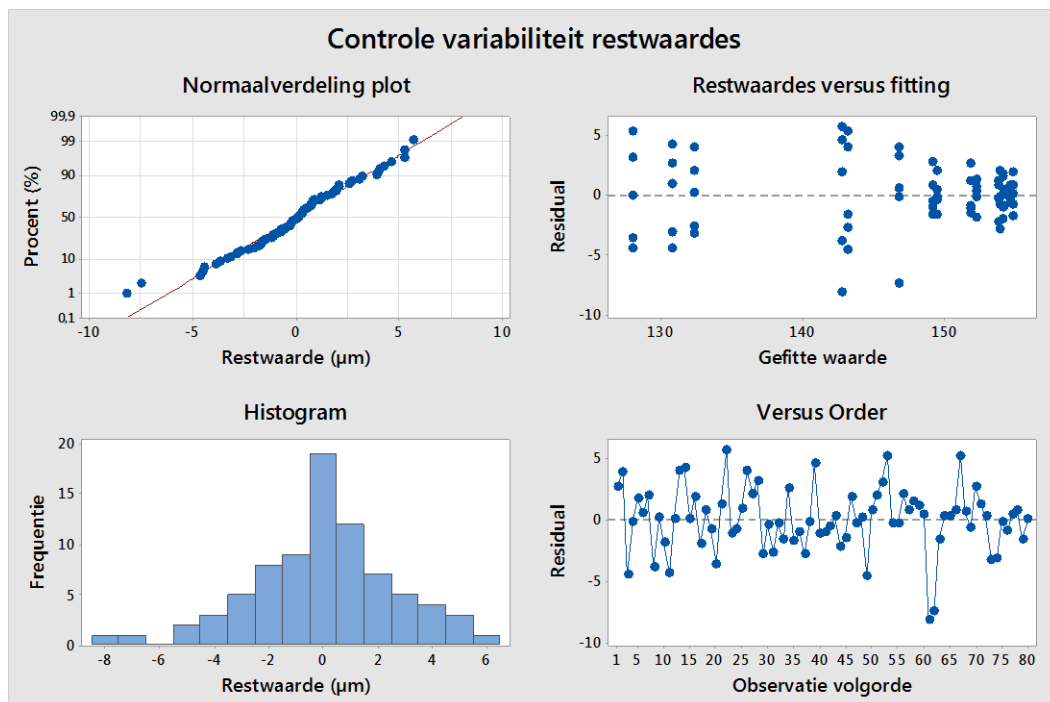
Figuur 54: Contacthoekmetingen

Voor PP wordt er een maximale contacthoek van $\pm 155^\circ$ bekomen. Dit is ten opzichte van het blanke materiaal een verhoging van ongeveer 50° . Omdat de contacthoek hoger is dan 150° kan er dus gezegd worden dat de productplaatjes met textuur superhydrofoob geworden zijn. Ook tijdens het meten werd dit opgemerkt, de druppel wilde niet van de spuit op het oppervlak blijven plakken.

Voor PS is er een maximale contacthoek van $\pm 135^\circ$ gemeten. Aangezien de contacthoek van PS ongeveer 15° lager is dan PP is dit toch een grote toename van de contacthoek.

Controle op variabiliteit van restwaardes

Voor de contacthoekmetingen worden dezelfde analyses uitgevoerd. Figuur 55 toont de resultaten van de contacthoekmetingen bij PP.

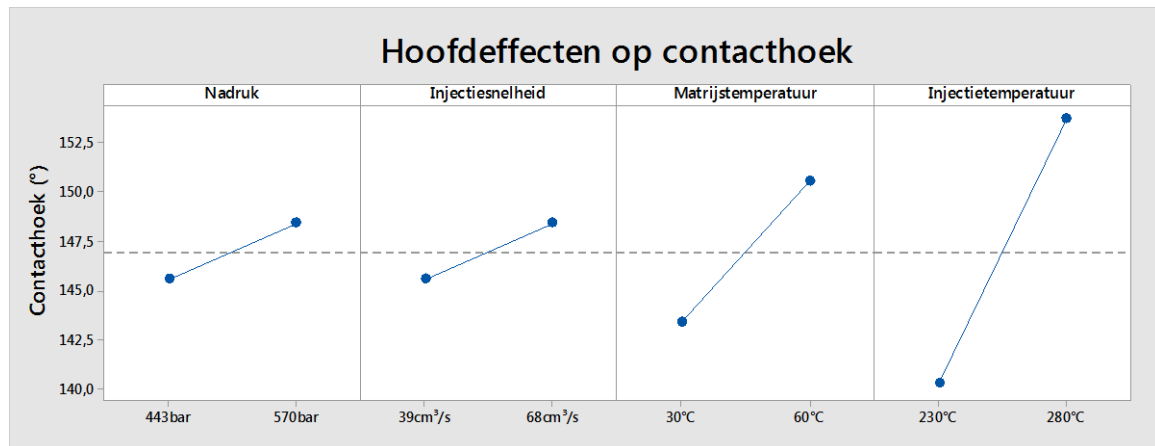


Figuur 55: Resultaten van contacthoek bij PP uit Minitab

Binnen deze figuur kan men zien dat er twee punten zijn die meer afwijken van de rode lijn. Dit zijn mogelijke resultaten die te veel afwijken t.o.v. de andere resultaten. Dit kan vastgesteld worden in de normaalverdeling plot, waar deze twee resultaten verder van de rode lijn gepositioneerd zijn en met een hogere restwaarde. Indien deze twee uitschieters weggelaten worden, dan zijn deze resultaten normaal verdeeld. Ook zijn de uitschieters terug te vinden in het histogram, waar de twee resultaten volledig links liggen en de andere resultaten een Gauss-curve vormen. Binnen de grafiek van de restwaarde i.f.v. de gefitte waarde is er geen patroon zichtbaar. Dit wilt zeggen dat het proces niet beïnvloed is door externe factoren. In de laatste figuur (rechts onder) is er ook geen regelmaat terug te vinden. Ook deze DoE is normaal verdeeld en is niet beïnvloed door externe factoren waardoor de statistische verwerking van de DoE als correct beschouwd mag worden. Deze figuur is te terug te vinden in Bijlage F.

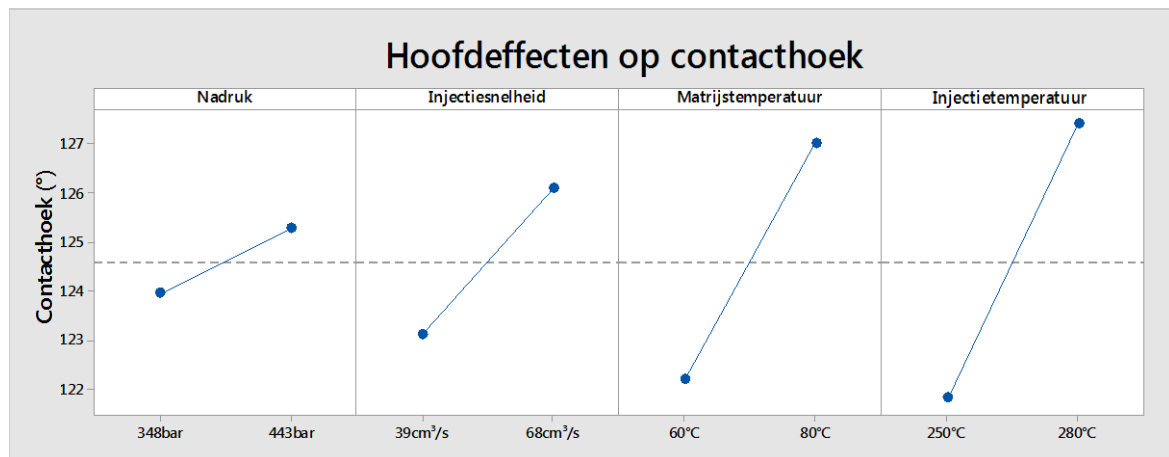
Invloed van de hoofdeffecten op de contacthoek

Figuur 56 geeft de hoofdeffecten weer van de verschillende parameters op de contacthoek met water bij PP. De nadruk- en injectiesnelheid hebben een klein effect op de contacthoek, terwijl de matrijstemperatuur en injectietemperatuur daarentegen een groot effect hebben op de contacthoek. Dit komt omdat bij deze parameters bij de textuurhoogte meer invloed hebben.



Figuur 56: De hoofdeffecten van de verschillende parameters op de contacthoek bij PP

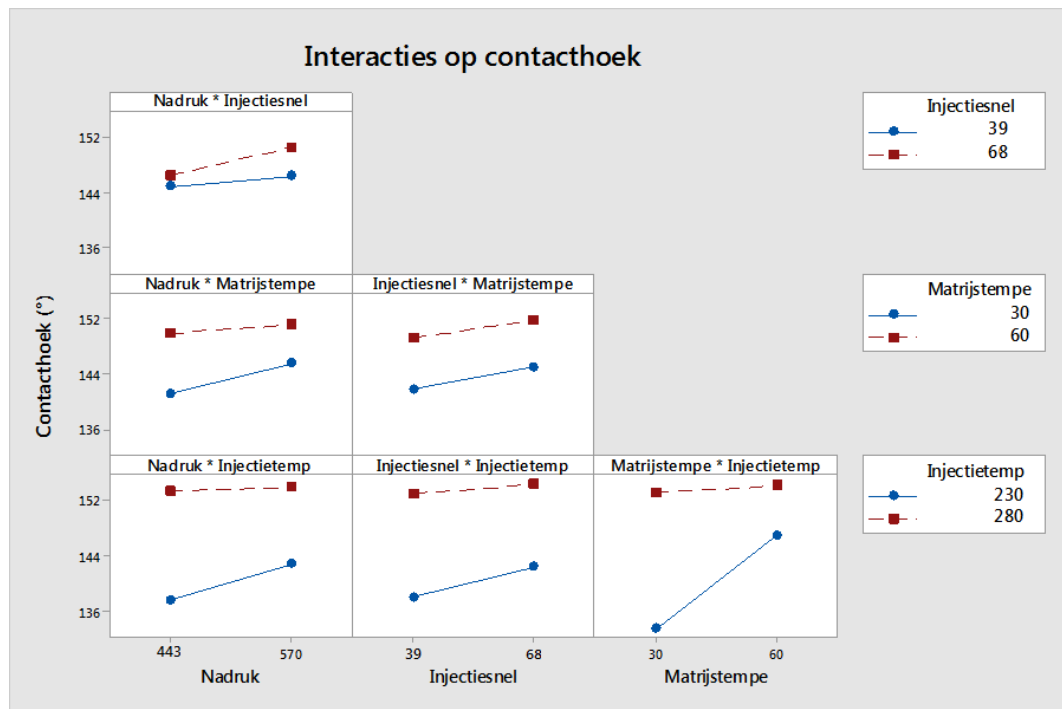
De hoofdeffecten op de contacthoek met water bij PS worden weergegeven op Figuur 57. De injectiesnelheid heeft hier veel meer effect op de contacthoek met water dan bij PP. Het is hier vooral de matrijstemperatuur en de injectietemperatuur die hier het meeste effect vertonen. Dit is ook zo te zien in Figuur 49 waarbij deze hoofdeffecten een sterke invloed hebben op de textuurhoogte.



Figuur 57: De hoofdeffecten van de verschillende parameters op de contacthoek bij PS

Interacties op contacthoek

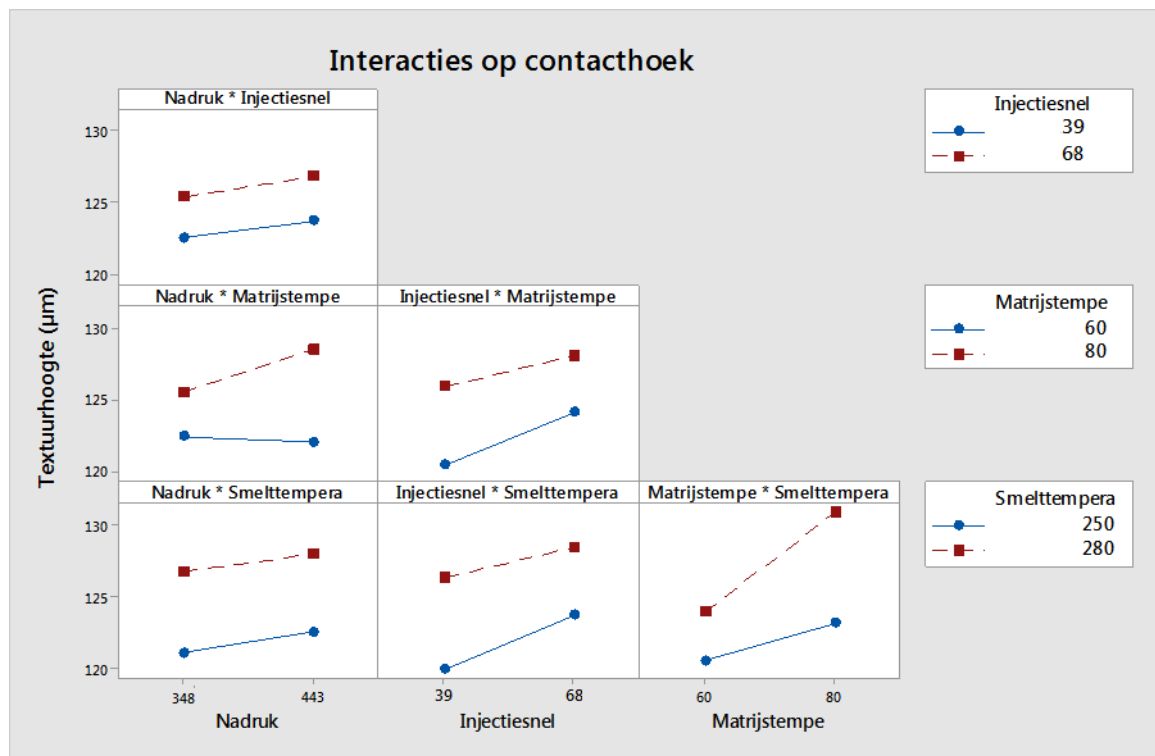
De effecten van de combinaties van verschillende parameters op de contacthoek met water bij PP wordt weergegeven op Figuur 58.



Figuur 58: Interacties van de parameters op de contacthoek van PP

Op deze figuur is te zien dat bij een hoge injectiesnelheid de nadruk meer invloed heeft op de contacthoek, dan bij een lage injectiesnelheid. Door de hoge injectiesnelheid krijgt de kunststof minder tijd om af te koelen waardoor deze nog warmer is bij het nadrukken. Men kan ook bij combinatie van matrijstemperatuur en injectietemperatuur een groot verschil zien. Bij een lage injectietemperatuur heeft de matrijstemperatuur veel meer invloed op de contacthoek dan bij een hoge injectietemperatuur. De hoge injectietemperatuur zorgt hier wel telkens voor zeer hoge resultaten van de contacthoek bij PP. Op hoge injectietemperatuur heeft de matrijstemperatuur minder effect dan op lage injectietemperatuur.

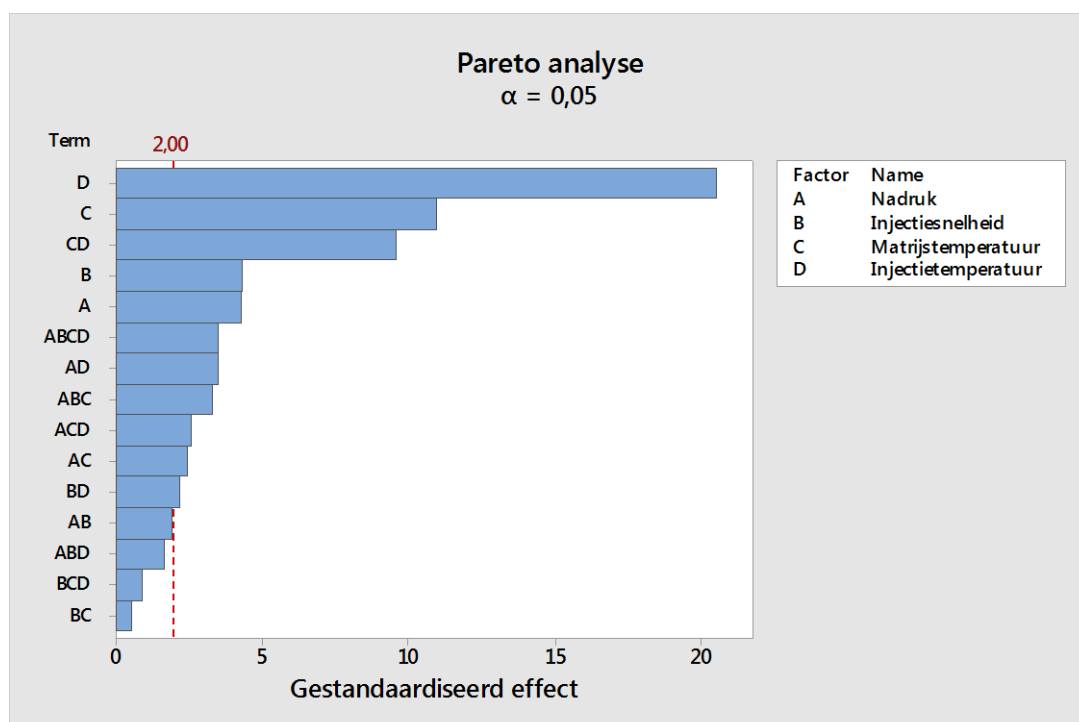
De interacties op de contacthoek voor PS staan in onderstaande figuur. Bij de combinatie van de matrijstemperatuur en de injectietemperatuur gebeurt hier het omgekeerde dan bij PP. Op hoge injectietemperatuur heeft hier de matrijstemperatuur meer effect dan op lage temperatuur.



Figuur 59: Interacties van de parameters op de contacthoek van PS

Pareto analyse

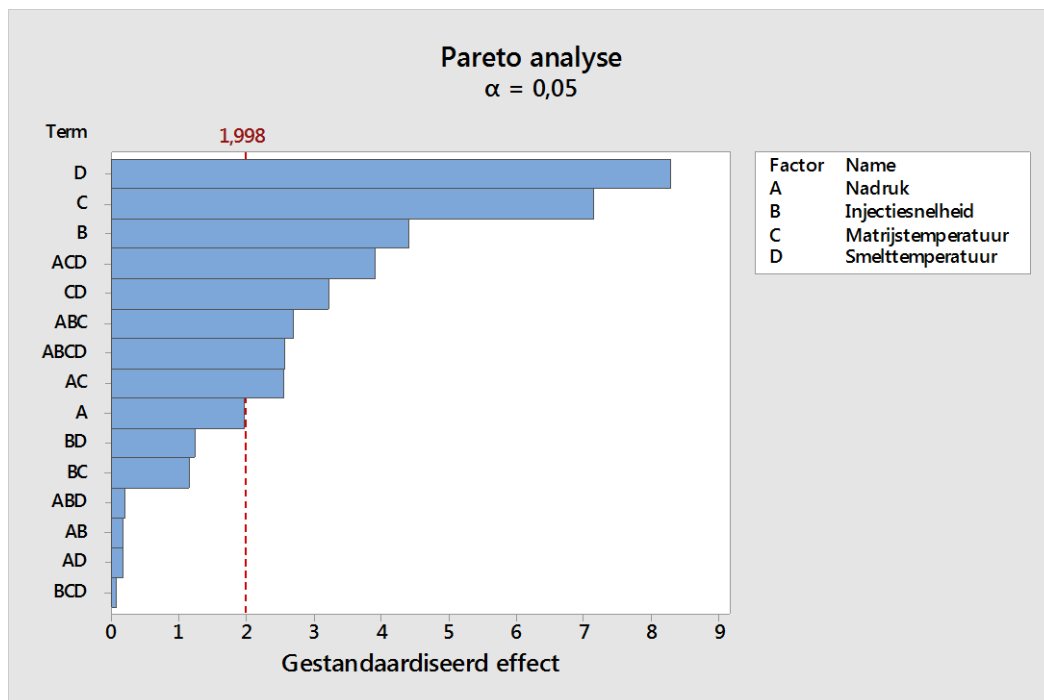
De Pareto analyse van de contacthoek met water bij PP (Figuur 60) laat de parameters en combinaties van parameters zien die een significante invloed hebben op de contacthoek. In tegenstelling met de Pareto analyses van de textuurhoogtes zijn hier meer significantie parameters.



Figuur 60: Pareto-analyse bij de contacthoek van PP

Voor de contacthoek zijn er veel meer parameters en combinaties die een significante invloed hebben op de contacthoek. De matrijstemperatuur, injectietemperatuur en de combinatie van beide hebben hierbij het grootste effect.

Figuur 61 toont de Pareto analyse op de contacthoek met water bij PS.



Figuur 61: Pareto-analyse bij de contacthoek van PS

Hierbij wordt nogmaals vastgesteld dat de injectietemperatuur en matrijstemperatuur een zeer groot effect hebben, maar ook de combinatie van beide parameters heeft een effect. De injectiesnelheid heeft ook een groot effect maar de nadruk niet. Door het combineren van de nadruk met andere parameters kan men wel vaststellen dat dit voor een significant effect kan zorgen.

4.1.5 Optimale machine-instellingen

De optimale parameters of machine-instellingen zijn voor beide kunststoffen analoog. Voor de DoE's van de textuurhoogte en de contacthoek worden de hoogste resultaten bekomen op de bovengrens van de parameters. In onderstaande tabel zijn de optimale procesparameters voor elk materiaal nog eens uitgezet.

Tabel 10: Optimale parameters en resultaten voor PP

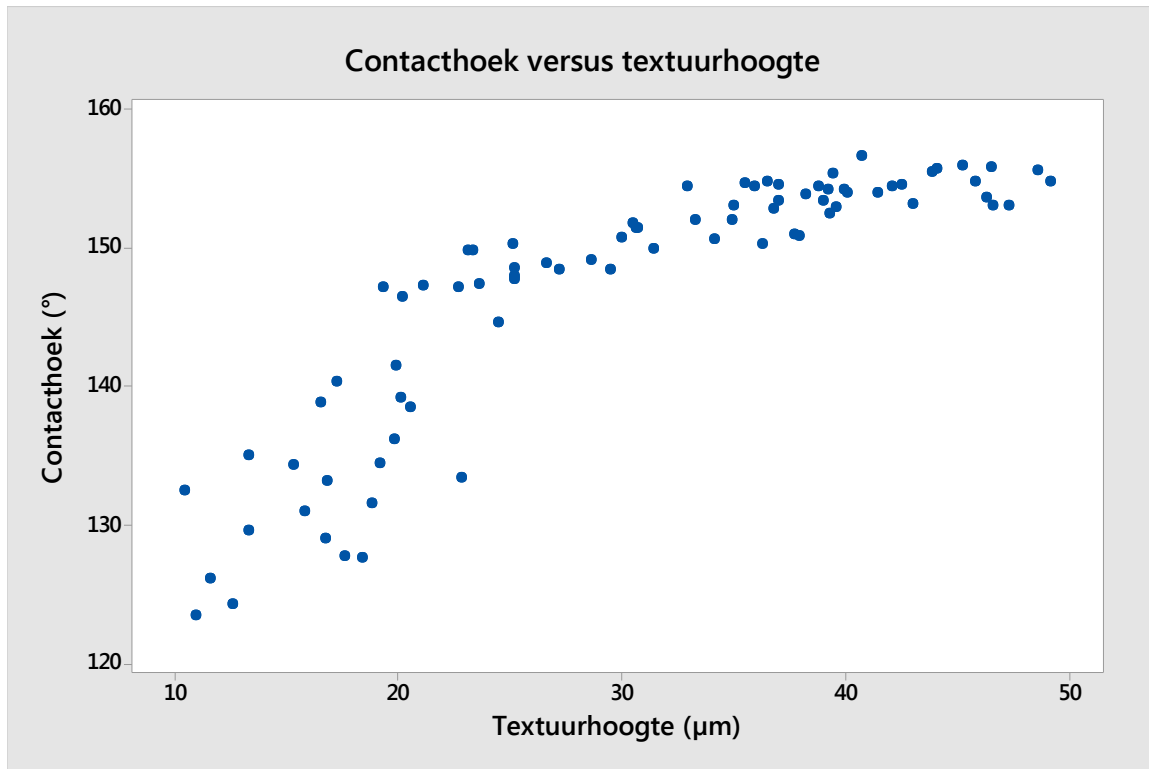
Parameter	Eenheid	PP
Injectiesnelheid:	cm ³ /s	68
Nadruk:	bar	570
Injectietemperatuur:	°C	280
Matrijstemperatuur:	°C	60
Behaalde textuurhoogte:	µm	50
Behaalde contacthoek:	°	155

Tabel 11: Optimale parameters en resultaten voor PS

Parameter	Eenheid	PS
Injectiesnelheid:	cm ³ /s	68
Nadruk:	bar	443
Injectietemperatuur:	°C	280 °C
Matrijstemperatuur:	°C	80 °C
Behaalde textuurhoogte:	µm	30
Behaalde contacthoek	°	135

4.1.6 Relatie tussen contacthoek en textuurhoogte

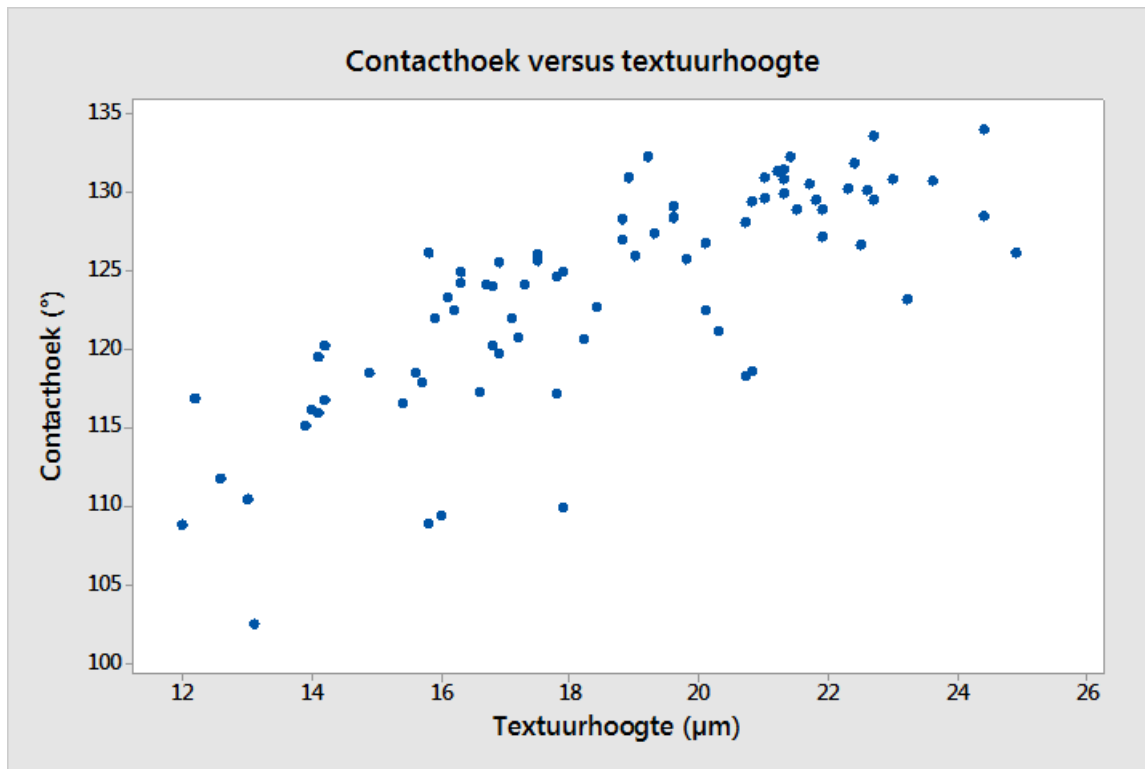
In Figuur 62 is de contacthoek uitgezet in functie van de textuurhoogte. Deze grafiek is gemaakt met de data van textuur 2 (zie paragraaf 3.4.4) waarbij de onderlinge kegelafstand $60\mu\text{m}$ is. De hoogte van de textuur die in deze grafiek is uitgezet is gemeten in het midden van de getextureerde strook.



Figuur 62: Contacthoek in functie van de textuurhoogte voor PP

Het eerste deel van de figuur lijkt lineair te zijn maar naarmate er een contacthoek van 150° en hoger behaald wordt stagneert deze curve tot net boven de 160° . Vanaf 150° wordt er gesproken van super hydrofobe oppervlakken. Deze wordt bereikt bij een kegelhoogte van $30\mu\text{m}$ en meer. Tussen een textuurhoogte van 40 en $50\mu\text{m}$ wordt er geen hogere contacthoek meer gemeten. Variatie op de textuurhoogte bij $50\mu\text{m}$ zal nagenoeg geen effect hebben op de contacthoek met water terwijl dit wel het geval is bij bijvoorbeeld een hoogte van $20\mu\text{m}$.

Figuur 63 toont de contacthoek in functie van de textuurhoogte voor PS. Hierbij wordt nogmaals aangetoond dat de contacthoek stijgt bij stijgende textuurhoogte. Binnen deze grafiek is echter meer variatie te zien. Dit kan men ook zien bij de hogere textuurhoogte, waardoor het dus mogelijk is dat de maximale contacthoek nog niet gemeten wordt bij deze textuurhoogte.

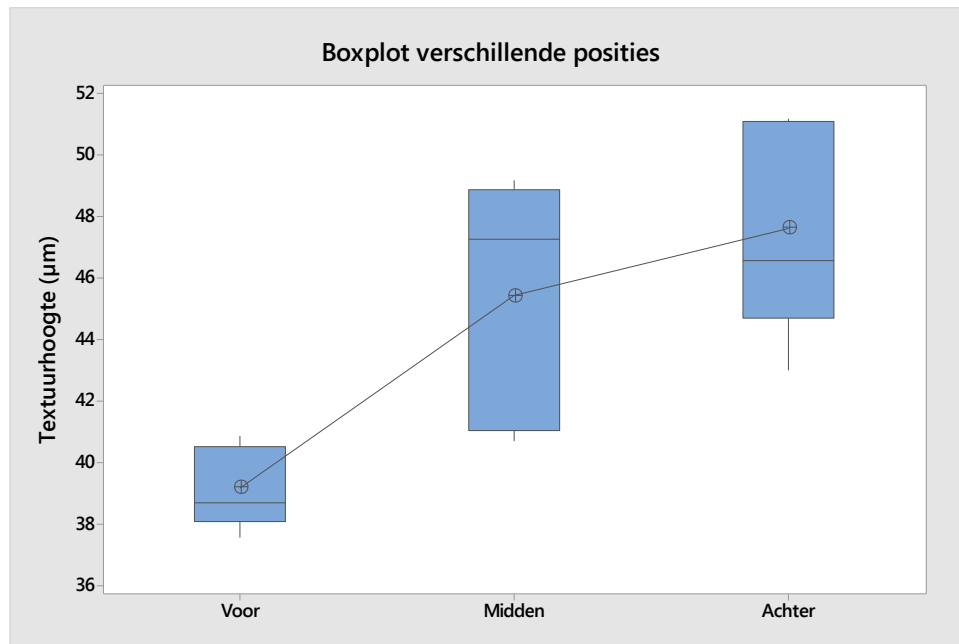


Figuur 63: Contacthoek in functie van de textuurhoogte voor PS

4.1.7 Textuurhoogte en contacthoek over de lengte van het product

Textuurhoogte

Onderstaande grafiek toont voor de hoogste instellingen bij PP de textuurhoogte vooraan, in het midden en achteraan (zie Figuur 38) op het kunststofproduct. Deze textuuroverdracht vergelijking is opgesteld voor textuur twee waarbij de kegels op een onderlinge afstand van 60µm staan. Op elke positie is er een boxplot gemaakt vanuit de resultaten van de DoE-analyse. Deze boxplot wordt dus gemaakt vanuit 5 samples bij de beste instelling voor de overdracht van de microtextuur. Deze geven zowel de textuurhoogte als de spreiding weer. De gemiddelde waarden op elke positie worden verbonden door een volle lijn.

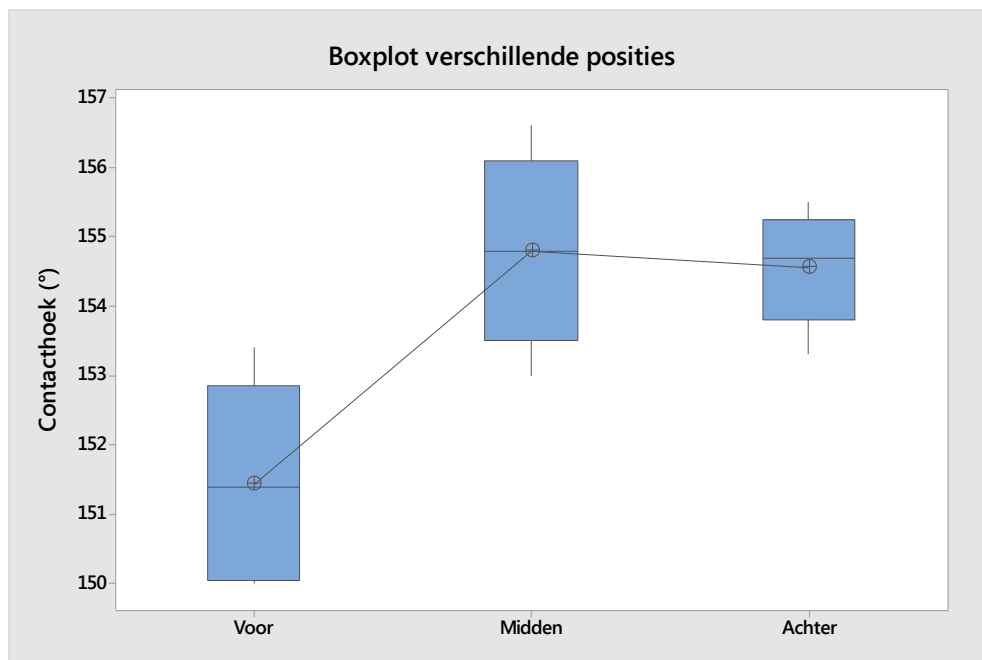


Figuur 64: Textuurhoogte op verschillende posities op het product van PP

In de figuur is te zien dat de textuur van voor naar achter toeneemt in hoogte. De hoogste textuur wordt dus achteraan het product bereikt. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de kunststof eerst over de textuur in de caviteit vloeit. Wanneer de gesmolten kunststof de achterkant van de caviteit bereikt, neemt de druk in de vormholte sterk toe. Doordat de kunststof achteraan nog warmer is, dan de gedeeltelijk gestolde kunststof vooraan in de vormholte, zal deze minder viskeus zijn waardoor deze beter in de textuur vloeit.

Contacthoek

Onderstaande figuur toont de contacthoek bij de beste machine-instellingen in functie van de positie op het product. Deze figuur is ook gemaakt uit de resultaten van textuur twee. Ook hier is er een lijn getrokken tussen de gemiddelde waarden van de contacthoek op elke positie.

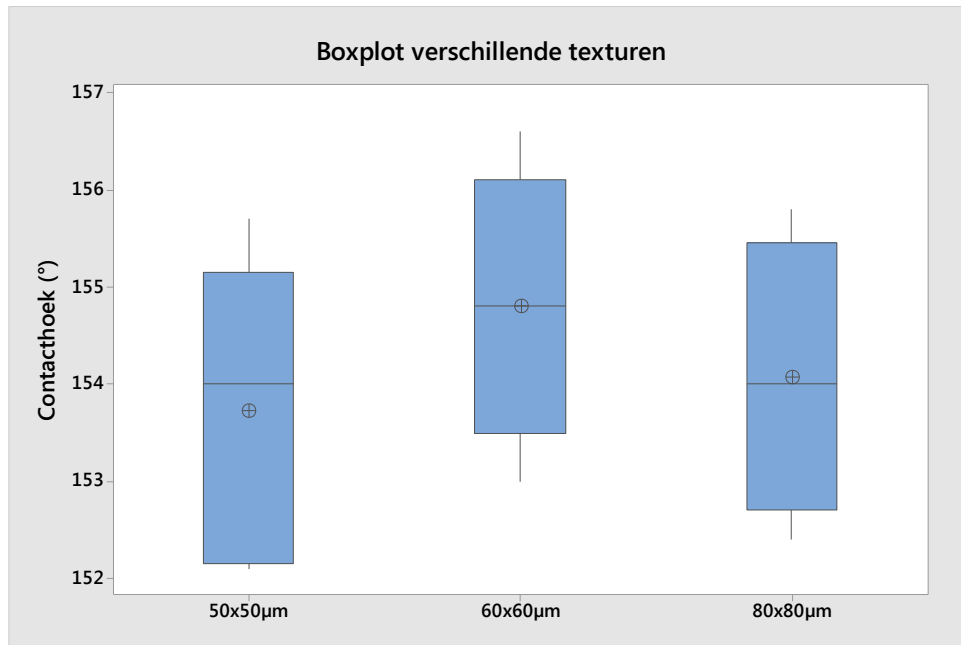


Figuur 65: Contacthoek op verschillende posities op het product van PP

Zoals eerder vermeld (in paragraaf 4.1.5) verandert de contacthoek niet veel bij grotere textuurhoogtes dan $40\mu\text{m}$. In Figuur 65 is te zien dat de textuur in het midden en achteraan op het product maar enkele μm verschil. Deze kleine variatie in textuurhoogte heeft geen invloed op de contacthoek. De hogere kegels achteraan op het product zorgen er wel voor dat de variatie op de contacthoek kleiner wordt. Daarentegen is in het midden van het product de textuurhoogte een beetje lager, maar er is wel meer variatie op de contacthoek. Vooraan op het product worden minder hoge contacthoeken bereikt. Dit komt doordat de textuurhoogte daar ook lager is dan in het midden en achteraan het product.

4.1.8 Vergelijking van de contacthoek tussen verschillende texturen

De contacthoeken van de drie texturen uit paragraaf 3.4.4 zijn ook met elkaar vergeleken. Dit is bekeken bij de beste instellingen van de machine voor PP waarbij de hoogste contacthoeken behaald worden. Voor deze vergelijking is de contacthoek in het midden van de producten met elkaar vergeleken.



Figuur 66: Contacthoek bij verschillende texturen van PP

Het verschil van de contacthoek tussen de drie texturen is niet groot. Met alle drie de texturen kunnen superhydrofobe oppervlakken gemaakt worden. Maar toch worden de hoogste contacthoeken behaald bij textuur twee waarbij de onderlinge afstand tussen de kegels 60µm is. De onderlinge afstand tussen de kegels is dus het beste voor de behaalde kegelhoogte op de beste machine-instellingen. Nog hogere textuurhoogtes zouden ervoor kunnen zorgen dat textuur drie nog betere contacthoeken kan behalen.

4.2 Variotherm

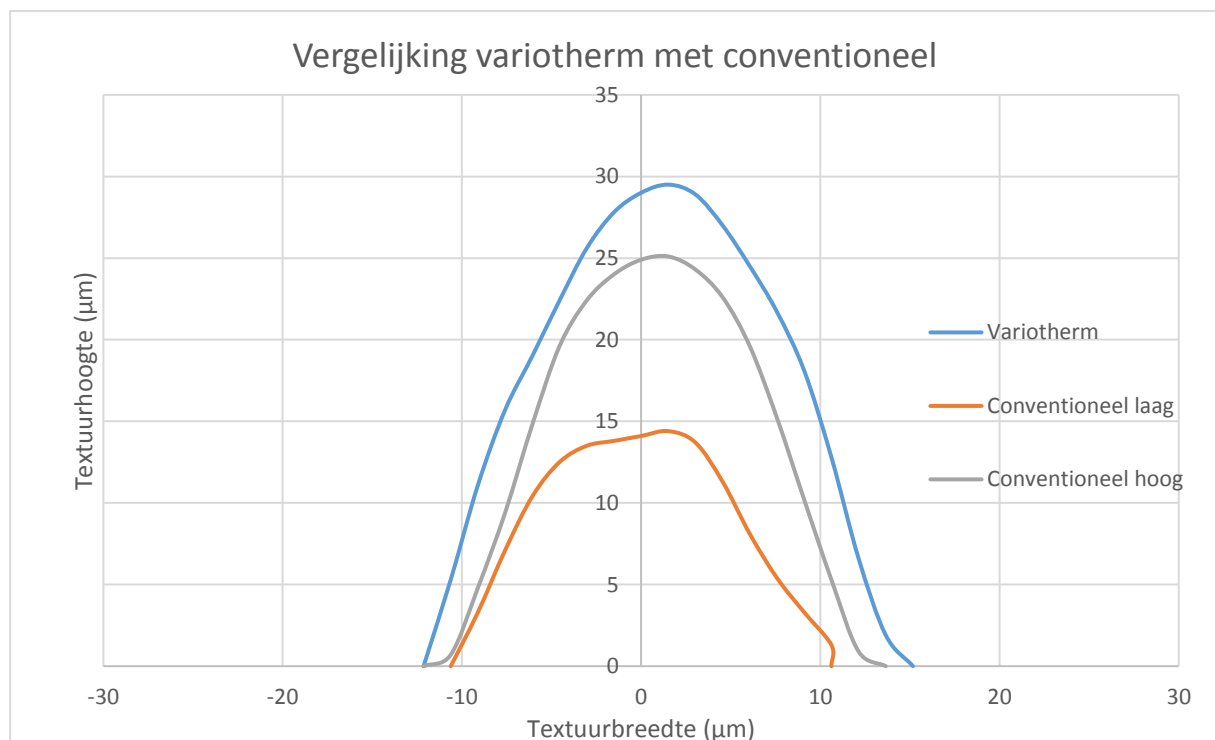
Uit de resultaten van conventioneel spuitgieten is gebleken dat de matrijstemperatuur en de injectietemperatuur het meeste invloed hebben op de textuurhoogte van de kunststofproducten. De injectietemperatuur heeft het meeste invloed, maar is beperkt voor het gebruikte materiaal. Bij het variotherm spuitgieten wordt matrijs, net voor inspuiten, opgewarmd. Voor amorfe kunststoffen is dit tot boven de glastransitietemperatuur en voor semi-kristallijne kunststoffen is dit rond de smelttemperatuur. Voor PP is de smelttemperatuur 160°C en voor PS ligt de glastransitietemperatuur tussen 90°C en 100°C. PS heeft op de beste instellingen een maximale textuurhoogte van $\pm 30\mu\text{m}$ terwijl PP een maximale hoogte behaalt van $\pm 50\mu\text{m}$. De textuur van de matrijs wordt bij PP voor 83% overgenomen terwijl dit voor PS 50% is. Omdat de textuurhoogte bij PS veel lager is, wordt de test met variotherm op deze kunststof uitgevoerd. Zo zal het effect van variotherm beter waarneembaar zijn. Ook wordt niet de beste maar een slechtere instelling genomen voor het effect te vergroten.

De lage instellingen van conventioneel spuitgieten, waarbij variotherm spuitgieten getest is, zijn:

- Injectiesnelheid = 68 cm³/s
- Nadruk = 348 bar
- Matrijstemperatuur = 60°C
- Injectietemperatuur = 250°C

De matrijstemperatuur wordt voor variotherm niet op 60°C gehouden maar verhoogd tot 100°C net voor het inspuiten. Na het inspuiten van de kunststof wordt de matrijs terug gekoeld tot ongeveer 60°C.

Onderstaande figuur toont de hoogte en breedte van één kegel voor conventioneel en variotherm spuitgieten.



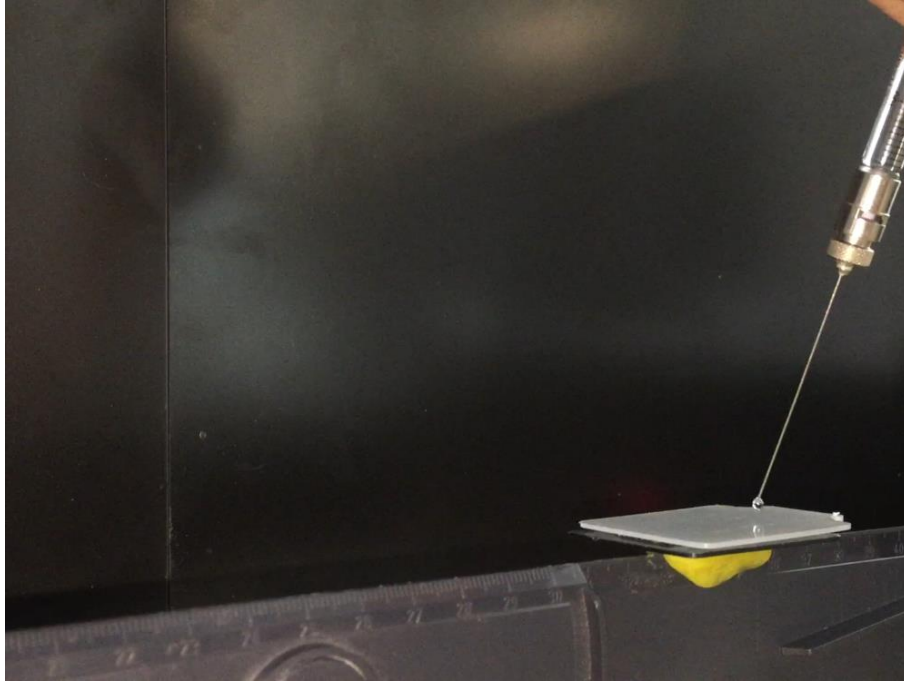
Figuur 67: Kegelvorm bij conventioneel met lage instellingen, conventioneel met hoge instellingen en variotherm

De oranje kegel geeft de vorm, hoogte en breedte van de textuur van de producten die met conventioneel spuitgieten, met bovenstaande instellingen, gemaakt is. De blauwe kegel is gemaakt met variotherm spuitgieten. De grijze kegel is ook met conventioneel spuitgieten gemaakt maar dan met de beste instellingen (zie paragraaf 4.1.5). Door variotherm toe te passen op de lage instellingen, die vermeld staan boven Figuur 67, wordt de textuurhoogte verdubbeld. Hierbij neemt ook de breedte van de textuur toe. Door variotherm spuitgieten wordt er een hogere textuurhoogte bekomen dan op de hoogste instellingen (zie paragraaf 4.1.5) bij conventioneel spuitgieten.

Het variotherm spuitgieten werd ook toegepast bij de hoge instellingen, maar dit gaf enkele problemen. Wanneer de procesparameters op de hoge instellingen werden gezet en de matrijstemperatuur steeg tot 120°C, dan bleef het product in de matrijs plakken. Dit wil zeggen dat het niet mogelijk was om het product uit te werpen. Dit product zat zelfs zo vast dat de uitstoters door de kunststof heen drukte. Het product werd er dus handmatig uitgehaald, maar hierdoor braken de textuurkegels af en bleven er resten kunststof in de matrijs zitten. Vandaar dat deze testen niet meer verder zijn uitgevoerd op hoge instellingen, maar dit wordt wel verder opgenomen als suggestie voor verder onderzoek. Dit wordt nogmaals aangehaald in paragraaf 5.2.

4.3 Visuele weergave van het waterafstotend karakter

In deze paragraaf wordt de testopstelling besproken, di is gemaakt om visueel het verschil te zien tussen het getextureerd en ongetextureerde oppervlak. Bij deze opstelling wordt de helling van het plaatje veranderd terwijl er een druppel op het oppervlak ligt. De volgende vier figuren tonen een druppel die op de ongetextureerde achterkant van het product ligt.



Figuur 68: Druppel op ongetextureerd oppervlak bij helling van 0°



Figuur 69: Druppel op ongetextureerd oppervlak bij helling van 15°



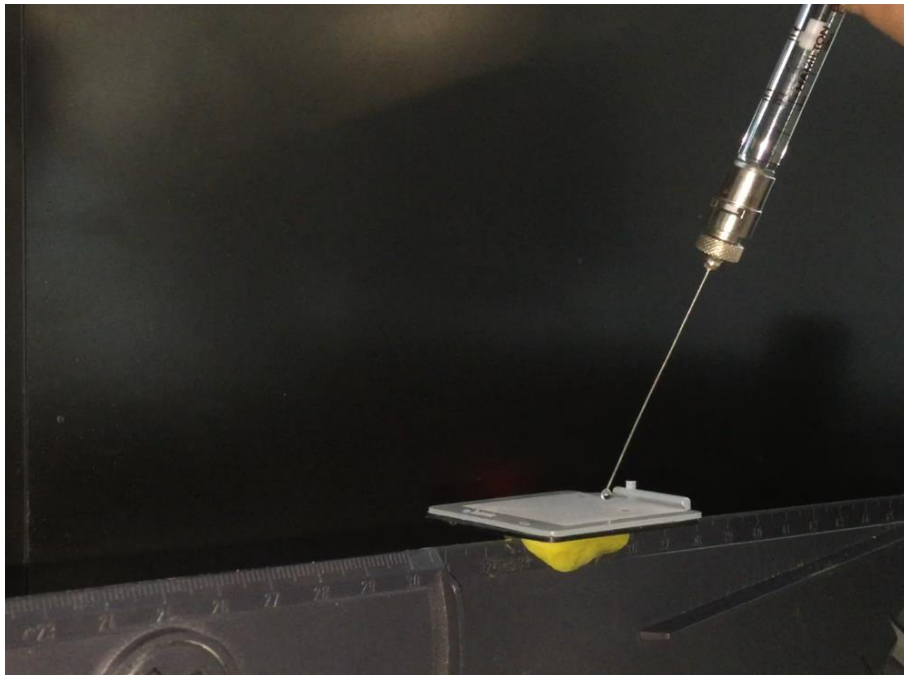
Figuur 70: Druppel op ongetextureerd oppervlak bij helling van helling van 75°



Figuur 71: Druppel op ongetextureerd oppervlak bij helling van 90°

Zoals in de figuren gezien kan worden, rolt of schuift de druppel amper over het oppervlak zelfs bij een hoekstand van 90° blijft de druppel aan het oppervlak plakken. De contacthoek met water van het materiaal ($\pm 102^\circ$) is te laag om de druppel van het oppervlak te laten schuiven.

De test werd ook uitgevoerd op de getextureerde zijde. Hierbij is te zien dat de druppel op de getextureerde zijde er vanaf rolt. Dit gebeurt al bij een helling van $\pm 16^\circ$.



Figuur 72: Druppel op getextureerd oppervlak bij helling van 0°



Figuur 73: Druppel op getextureerd oppervlak bij helling van 15°



Figuur 74: Rollende druppel op getextureerd oppervlak bij helling van 16°



Figuur 75: Druppel op getextureerd oppervlak bij helling van 16°

5 Bespreking eindresultaten

5.1 Conclusie

In deze masterproef werd onderzoek uitgevoerd naar de optimale spuitgietsparameters voor de overname van de microtextuur door kunststofproducten. Hierbij werd er ook gekeken naar de hydrofobiciteit van de kunststofproducten met deze textuur.

Het onderzoek naar de overname van de microtextuur werd uitgevoerd m.b.v. twee DoE's, nl. één DoE PP en de andere bij PS. Uit de literatuur bleek dat de belangrijkste spuitgietsparameters voor de overname van textuur de nadruk, de injectiesnelheid, de matrijstemperatuur en de injectietemperatuur zijn. Uit de experimenten is gebleken dat in onze toepassingen de nadruk zowel voor PP als voor PS geen significante invloed heeft op de textuurhoogte. De drie andere parameters (injectiesnelheid, injectietemperatuur en matrijstemperatuur) hebben daarentegen wel een significante invloed op de textuurhoogte. Bij PP is de injectietemperatuur de belangrijkste parameter, terwijl bij PS dit de matrijstemperatuur is. De glastransitietemperatuur van PP is zeer laag (onder de 0°C), terwijl deze bij PS hoger ligt (rond de 100°C). Hierdoor zal PS tijdens het afkoelen in de matrijs eerder zijn glastransitietemperatuur bereiken, waardoor de viscositeit sneller toeneemt. Dit geeft dan ook de reden dat de matrijstemperatuur belangrijker is voor PS. Door een hogere matrijstemperatuur blijft PS langer vloeibaar, waardoor deze beter de textuurholtes zal vullen. Voor PP is de injectietemperatuur belangrijker, omdat de kunststof minder snel afkoelt vertrekkend van een hoge temperatuur. Hierdoor blijft PP dus langer vloeibaar, waardoor de textuurholtes nog beter gevuld worden. Door het makkelijker bereiken van de glastransitietemperatuur bij PS zijn de textuurhoogtes, die bij deze kunststof bereikt worden, daarom ook een stuk lager. Bij PP wordt hetzelfde verwacht door de sterke krimp bij semi-kristallijne kunststoffen. Deze krimp is echter zeer klein bij de microtextuurkegels. De reden hiervoor is dat de textuurholtes een zeer klein volume hebben en de kunststof maakt hier veel contact met de koude matrijs. Hierdoor zal het PP snel afkoelen, waardoor deze minder de kans krijgt om te kristalliseren. Op deze manier zal er dus weinig krimp ontstaan en zullen de textuurholtes toch beter gevuld worden.

Bij PS werd er een textuurhoogte van $\pm 30 \mu\text{m}$ bereikt, terwijl dit voor PP $\pm 50 \mu\text{m}$ was. Doordat de matrijstemperatuur de belangrijkste parameter is bij PS, wordt het variotherm spuitgieten enkel uitgevoerd bij deze kunststof.

Het hydrofoob gedrag van de kunststofproducten werd bekeken door middel van een contacthoekmeting met water. Het onderzoek van dit hydrofoob gedrag wordt geanalyseerd door nogmaals 2 DoE's uit te voeren voor beide kunststoffen. Deze DoE's hebben aangetoond dat de nadruk voor PP wel significant is, terwijl voor PS net niet. De reden hiervoor is dat PS een amorf kunststof is, waardoor deze snel afvriest in de matrijs. Door het snel afvriezen zal de nadruk beduidend minder effect hebben. De injectietemperatuur en de matrijstemperatuur zijn, net zoals bij de textuurhoogte, de belangrijkste parameters voor het behalen van de hoogste contacthoek. Door een combinatie van de parameters wordt er voor PP een maximale contacthoek van 155° en voor PS een contacthoek van 135° verkregen. Dit wil zeggen dat voor PP een superhydrofoob oppervlak (contacthoek $> 150^\circ$) bekomen kan worden, terwijl voor PS een hydrofoob oppervlak mogelijk is. De contacthoek van PP zonder textuur is 102° en voor PS is dit 87°. Hieruit kan men besluiten dat voor beide kunststoffen een verhoging in contacthoek van $\pm 50^\circ$ bekomen is.

Indien de contacthoek in functie van de textuurhoogte wordt uitgezet, dan kan besloten worden dat de contacthoek stijgt bij stijgende textuurhoogte. Hierbij wordt wel aangetoond dat deze curve afvlakt bij een textuurhoogte groter dan 40 μm , waardoor de contacthoek nagenoeg constant blijft. De textuurhoogte en de contacthoek kunnen ook uitgezet worden in functie van de positie op het plaatje. De textuurhoogte is vooraan het plaatje lager dan achteraan het plaatje. Dit komt doordat de kunststof eerst over de textuur heen vloeit tot de achterkant van de vormholte bereikt wordt. Vanaf dan zal de inspuitedruk verhogen en omdat de kunststof achteraan op dat moment minder gestold t.o.v. vooraan de matrijs, zal deze achteraan ook beter in de textuur dringen. De contacthoek is vooraan het plaatje ook het laagste en in het midden en achteraan ongeveer gelijk. Dit komt omdat de textuur in het midden, bij de beste instellingen, al een hoogte bereikt van boven de 40 μm . Vanaf dat moment zal de contacthoek nagenoeg constant blijven tot achteraan het product.

Bijkomend is er ook nog een test met variotherm spuitgieten uitgevoerd voor PS. Dit werd enkel op PS gedaan omdat uit de voorgaande DoE's blijkt dat bij deze kunststof de matrijstemperatuur de belangrijkste parameters is. Om het effect tussen conventioneel en variotherm spuitgieten te vergroten zijn er nieuwe producten gemaakt op een lage instelling. Dit wordt op een lage instelling gedaan, omdat er dan veel verbetering mogelijk is in de textuurhoogte. Deze lage procesinstellingen zijn dus behouden voor variotherm spuitgieten. Het enige verschil t.o.v. conventioneel spuitgieten is dat bij variotherm de matrijstemperatuur varieert gedurende de spuitgietscyclus. De behaalde textuurhoogte met conventioneel spuitgieten was op de lage instelling maximaal 15 μm . Door variotherm spuitgieten wordt deze textuurhoogte maximaal verdubbeld, nl. 30 μm . De aanpassing van de matrijstemperatuur heeft dus voor PS een zeer grote invloed. Hierbij wordt vastgesteld dat de kegels niet alleen in de hoogte beter gevuld worden, maar ook in de breedte. Dit komt doordat de kunststof langer warm blijft in de matrijs, waardoor de nadruk meer effect zal hebben en deze de krimp in de breedte van de kegels ook opvangt.

5.2 Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek

Het maken van hydrofobe oppervlakken door het aanbrengen van texturen op kunststoffen kan leiden tot innovatieve toepassingen in de kunststofindustrie. Hiervoor is er nog bijkomend onderzoek nodig:

- Om kunststofproducten met een hydrofobe textuur te kunnen gebruiken is het nodig om de sterkte van de textuur te verbeteren. Momenteel wordt de textuur beschadigd door met je nagel over het getextureerde oppervlak te krassen. Hierdoor verliest het product zijn waterafstotend karakter waardoor het niet meer bruikbaar is. Door gebruik van een ander materiaal, coating of andere hydrofobe textuur zou dit verbeterd kunnen worden.
- Het variotherm proces voor het overnemen van de textuur moet verder onderzocht worden. Hierdoor kan de textuur beter overgenomen worden wat kan leiden tot nog hogere contacthoeken of een robuuster oppervlak. Het variotherm proces kan hierbij ook geoptimaliseerd worden door middel van hybride variotherm spuitgieten.
- Onderzoek voeren naar een andere vorm voor de textuur die meer lossing bevat waardoor deze beter uitgeworpen kan worden. Bij variotherm wordt de textuur beter overgenomen, waardoor het product vast komt te zitten. Een ander ontwerp van kegel met een betere diameter hoogte verhouding kan een mogelijkheid zijn. Bijkomend bij het vorige voorstel kan er ook met lossingscoatings op de matrijs gewerkt worden.
- Ook kan er een onderzoek gevoerd worden naar andere spuitgiettechnieken zoals compression injection moulding, vacuüm venting, foaming,....

- Het vulgedrag van de textuur in de caviteit is onbekend. Door het vullen van de textuur in de caviteit te visualiseren, kan men hier meer inzicht over krijgen. Vandaar dat dit een belangrijk onderzoek is.

Literatuurlijst

- [1] „Sirris: Driving industry by technology,” Sirris, [Online]. Available: <http://www.sirris.be/nl>. [Geopend 5 Mei 2017].
- [2] „Sirris: Drining industry by technology,” Sirris, [Online]. Available: <http://www.sirris.be/nl/precision-manufacturing-lab>. [Geopend 5 Mei 2017].
- [3] „Cel Kunststoffen,” KU Leuven, [Online]. Available: <http://iiw.kuleuven.be/onderzoek/kunststoffen>. [Geopend 18 Oktober 2016].
- [4] M. Groenendijk, „3D-Oberflächenstrukturierung von Freiformflächen,” *Mikrolaserbearbeitung*, pp. 30-34.
- [5] Y. Heijligen, Masterproef: Analyse van spuitgietparameters bij het toepassen van variothermtechniek bij microspuitgieten, Diepenbeek, 2015.
- [6] V. Goodship, Practical Guide to Injection Moulding, ARBURG, 2004.
- [7] Rajasekaran, „Mechanical Engineer's World,” 29 Maart 2015. [Online]. Available: <http://www.mechscience.com/injection-moldinginjection-molding-machineinjection-molding-processinjection-molding-on-plastics/>. [Geopend 21 Oktober 2016].
- [8] G. Z. Y. G. Guilong Wang, „Thermal response of an electric heating rapid heat cycle molding mold and its effect on surface appearance and tensile strength of the molded part,” *Journal of Applied Polymer Science*, nr. 128, pp. 1339-1352, 2012.
- [9] „Direct industry,” [Online]. Available: <http://pdf.directindustry.com/pdf/gwk/dynamic-cyclic-temperature-control/20505-310543.html>. [Geopend 17 Mei 2017].
- [10] K. Suhas, „Developing a Viscosity Curve to Optimize Injection Speeds,” *Frontier Injection Molding and Material Technologies*, pp. 1-5.
- [11] K. Suhas, „The Process Window Study,” *Frontier Injection Molding and Material Technologies*, pp. 1-4.
- [12] M. Otsuka, A. Oyabe en H. Ito, „Effects of mold surface conditions on flow length in injection molding process,” *Polymer Engineering & Science*, pp. 1383-1388, 2011.
- [13] D. Patel, V. Jain en J. Ramkumar, „Surface Texturing for Inducing Hydrophobicity,” nr. 15, pp. 46-53, 2015.
- [14] A. Cavalli, F. Okkels, P. Bogild en R. J. Taboryski, „Wetting on micro-structured surfaces: modelling and optimization,” Kgs. Lyngby, 2013.
- [15] E. Celia, T. Darmanin, E. Taffin de Givenchy, S. Amigoni en F. Guittard, „Recent advances in designing superhydrophobic surfaces,” *ELSEVIER*, pp. 1-18, 2013.

- [16] M. Groenendijk, „Fabrication of super hydrophobic surfaces by fs laser pulses: How to produce self-cleaning surfaces,” *Macro Material Processing*, pp. 44-48, 2017.
- [17] L. When , Z. Hongyun , Z. Xiaokai, M. Fahong, L. Taiohai en L. Haihua, „Determination of the second step microstructure for superhydrophobic surfaces,” Xiantan, 2012.
- [18] C. Hopmann, U. Recht en C. Behmenburg, „Injection moulding of durable superhydrophobic surfaces made of LSR,” pp. 366-370, 2014.
- [19] W. Michaeli en F. Klaiber, „Investigations in Injection Moulding of Micro Structures and Microstructured Surfaces,” pp. 1-4, 2007.
- [20] M. Packianather, C. Griffiths en W. Kadir, „Micro injection moulding process parameter tuning,” Elsevier, Manchester, 2014.
- [21] M. S. C. E. G. Lucchetta, „Investigating the technological limits of micro-injection molding in replicating high aspect ratio micro-structured surfaces,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, nr. 63, pp. 521 - 524, 2014.
- [22] „www.Beaumontinc.com,” Beaumont, [Online]. Available: <http://www.beaumontinc.com/injection-molding-glossary/fountain-flow/>. [Geopend 21 Mei 2017].
- [23] „Applied Spectra: Transforming the way the world does chemistry,” Applied Spectra, [Online]. Available: <http://appliedspectra.com/technology/laser-ablation.html>. [Geopend 13 Mei 2017].
- [24] „Industrial laser solutions for manufacturing,” Industrial lasers, [Online]. Available: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-27/issue-04/features/fermtosecond-laser-micromachining-a-back-to-basics-primer.html>. [Geopend 13 Mei 2017].
- [25] Y. S. Xiao, Z. Y. Zhao en Z. Y. Quan, „Research on 3D Laser Texturing Technology of Mold,” *Applied Mechanics and Materials*, pp. 3-7, 2014.
- [26] „Elektrotechnik: A website on electrical engineering,” Elektrotechnik, [Online]. Available: <http://www.elektrotechnik.net/2015/06/what-is-mirror-galvanometer.html>. [Geopend 18 Mei 2017].
- [27] „www.silloptics.de,” Sill optics, [Online]. Available: <http://www.silloptics.de/1/products/sill-encyclopedia/laser-optics/f-theta-lenses/>. [Geopend 18 Mei 2017].
- [28] „Accu Dyne Test,” Accu Dyne Test, [Online]. Available: https://www.accudynetest.com/polytable_03.html?sortby=contact_angle. [Geopend 11 Mei 2017].
- [29] T. Evens, „Masterproef: Vergelijkende studie tussen conventioneel, variotherm en hybride variotherm spuitgieten,” p. 103, 2015-2016.
- [30] J. Suy, *Spuitgieten*, 2000, p. 569.
- [31] R. Appermont en J. De Keyzer, *Rechtlijnen voor het Variotherm Spuitgieten*, 2013.

- [32] Y. Santermans, J. Kerremans, L. Naelaerts, Appermont R. en J. De Keyzer, Basisopleiding spuitgieten, 2014.
- [33] „Lasea,” Lasea, [Online]. Available: <https://www.lasea.eu/en/machines/l5/>. [Geopend 7 Mei 2017].
- [34] „Renishaw: Apply innovation,” Renishaw, [Online]. Available: <http://www.renishaw.nl/nl/waarom-een-interferometrische-laserencoder-gebruiken--38613>. [Geopend 11 Mei 2017].
- [35] „Senseit: the human automation factor,” SenseIT, [Online]. Available: <http://www.senseit.nl/en/Metrology/MikroCADPremium>. [Geopend 11 Mei 2017].
- [36] „Contact angle measurement,” 2016. [Online]. Available: <http://www.biolinscientific.com/application/contact-angle-measurement/>. [Geopend 2017 Mei 17].
- [37] M. R. Kamal, A. I. Isayev en S.-J. Liu, „Injection molding: Introduction and general background,” in *Injection molding: Technology and fundamentals*, München, Hanser, p. 57.
- [38] T. A. Osswald, L.-S. Turng en P. Gramann, „Processing fundamentals,” in *Injection molding handbook*, München, Hanser, 2008, p. 65.
- [39] V. Goodship, „Processing Amorphous and Semi-Crystalline Thermoplastics,” in *Arburg: Practical guide to injection moulding*, Shawbury, UK, Rapra technology, pp. 82-83.
- [40] „Minitab,” Minitab Inc., [Online]. Available: <http://www.minitab.com/en-us/products/minitab/>. [Geopend 2017 mei 11].
- [41] „www.ptonline.com,” Plastics Technology, [Online]. Available: <http://www.ptonline.com/articles/a-new-look-at-evaluating-fill-times-for-injection-molding>. [Geopend 26 Mei 2017].
- [42] „www.amplitude-systemes.com,” Amplitude systemes, [Online]. Available: <http://www.amplitude-systemes.com/satsuma-fiber-laser.html>. [Geopend 26 Mei 2017].

Bijlagen

Bijlage A: ENGEL ES 200/35 HL	84
Bijlage B: INEOS PP 400-GA05	85
Bijlage C: Styrolution PS 165N/L	86
Bijlage D: Lasea LS5-1	88
Bijlage E: Satsuma 10W 350 fs laser	90
Bijlage F: Controle op variabiliteiten bij de DoE's van textuurhoogte en contacthoek van PS	91

Speciale Spuitgiettechnieken

ES 200/35 HL



Sluiteenheid		
Sluitkracht	kN	350
Slag bewegende opspanplaat	mm	350
Kracht uitwerper	kN	30
Slag uitwerper	mm	100
Minimale inbouwhoogte matrijs	mm	180
Maximale afstand tussen platen	mm	530
Vergrootte opspanplaat	mm	550 x 330
Uitvalschaftbreedte	mm	360
Droogloop (Euromap 6) ~ slag	sec ~ mm	1,5 ~ 150
Aandrijving		
Pompaandrijfvermogen	kW	11
Olievulling	l	115
Gewicht		
Netto (zonder olie)	kg	3300
Afmetingen		
Lengte x breedte x hoogte	m	3,30 x 1,20 x 1,80

Spuiteenheid		
Schroefdiameter	mm	25
Schroeflengte standaard	L/D	24,8
Plastificeeropbrengst standaard	g/sec	12
Doseerlengte	mm	140
Schroeftoerental	r/min	20-480
Inspuitstroom	cm ³ /sec	88
Maximaal slagvolume	cm ³	69
Specifieke spuitdruk	bar	2090
Specifieke spuitdruk verhoogd	bar	2400
Slag Spuitneus	mm	200
Perskracht spuitneus	kN	28
Verwarmingsvermogen	kW	6,8
Aantal verwarmingszones		4

INEOS PP 400-GA05

Polypropylene Impact Copolymer
INEOS Olefins & Polymers Europe

PROSPECTOR®
www.ulprospector.com

Technical Data

Product Description

400-GA05 is a general purpose high impact copolymer for injection moulding applications. It offers a superior balance of stiffness and impact strength as compared to competitive impact copolymers of similar melt flow rate.

Applications

- Appliances
- Rigid packaging
- Rigid transport packaging
- Consumer products
- Luggage

Benefits and Features

- Ultra-high impact resistance
- Superior impact/stiffness balance

General

General		
Material Status	▪ Commercial: Active	
Literature ¹	▪ Technical Datasheet (English)	
Search for UL Yellow Card	▪ INEOS Olefins & Polymers Europe	
Availability	▪ Europe	
Features	▪ General Purpose ▪ Good Stiffness	▪ Impact Copolymer ▪ Ultra High Impact Resistance
Uses	▪ Appliances ▪ Consumer Applications	▪ Luggage ▪ Rigid Packaging
RoHS Compliance	▪ Contact Manufacturer	
Forms	▪ Pellets	
Processing Method	▪ Injection Molding	

Physical	Nominal Value Unit	Test Method
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (230°C/2.16 kg)	5.0 g/10 min	ISO 1133
Mechanical	Nominal Value Unit	Test Method
Tensile Stress (Yield)	25.0 MPa	ISO 527-2
Flexural Modulus (23°C)	1200 MPa	ISO 178
Impact	Nominal Value Unit	Test Method
Charpy Notched Impact Strength		ISO 179/1eA
-20°C	4.5 kJ/m²	
23°C	15 kJ/m²	
Notched Izod Impact Strength		ISO 180/1A
-20°C	6.5 kJ/m²	
23°C	14 kJ/m²	
Thermal	Nominal Value Unit	Test Method
Heat Deflection Temperature		ISO 75-3/B
0.45 MPa, Unannealed	88.0 °C	
Vicat Softening Temperature	152 °C	ISO 306/A
Peak Melting Temperature	164 °C	ASTM D3417

Notes

¹ These links provide you with access to supplier literature. We work hard to keep them up to date; however you may find the most current literature from the supplier.

² Typical properties: these are not to be construed as specifications.



Styrolution PS 165N/L

General Purpose Polystyrene

INEOS Styrolution Group GmbH

PROSPECTOR®

www.ulprospector.com

Technical Data**Product Description**

Styrolution PS 165N/L is a high molecular weight, good flowing grade, often blended with high impact extrusion grades.

FEATURES

- High molecular weight
- Good flow characteristics
- Appropriate for blending with HIPS
- UL 94 HB (Antwerp only)

APPLICATIONS

- Injection molded articles
- CD/DVD jewel boxes
- Refrigerator components
- Blending with HIPS for thermoformed cups

General

Material Status	▪ Commercial: Active		
Literature ¹	▪ Technical Datasheet (English)		
UL Yellow Card ²	▪ E108538-100729308		
Search for UL Yellow Card	▪ INEOS Styrolution Group GmbH ▪ Styrolution PS		
Availability	▪ Africa & Middle East	▪ Europe	
Features	▪ General Purpose	▪ Good Flow	▪ High Molecular Weight
Uses	▪ Appliance Components ▪ Blending	▪ Cups ▪ Media Packaging	
Forms	▪ Pellets		
Processing Method	▪ Extrusion	▪ Injection Molding	

Physical	Nominal Value Unit	Test Method
Density	1.04 g/cm ³	ISO 1183
Melt Volume-Flow Rate (MVR) (200°C/5.0 kg)	3.40 cm ³ /10min	ISO 1133
Molding Shrinkage	0.30 to 0.60 %	ISO 294-4
Water Absorption		ISO 62
Saturation, 23°C	< 0.10 %	
Equilibrium, 23°C, 50% RH	< 0.10 %	
Mechanical	Nominal Value Unit	Test Method
Tensile Modulus	3300 MPa	ISO 527-2
Tensile Stress (Yield, 23°C)	52.0 MPa	ISO 527-2
Tensile Strain (Break, 23°C)	2.0 %	ISO 527-2
Tensile Creep Modulus		ISO 899-1
1 hr	3300 MPa	
1000 hr	2600 MPa	
Flexural Stress	86.0 MPa	ISO 178
Impact	Nominal Value Unit	Test Method
Charpy Unnotched Impact Strength (23°C)	< 25 kJ/m ²	ISO 179
Hardness	Nominal Value Unit	Test Method
Ball Indentation Hardness	150 MPa	ISO 2059-1
Thermal	Nominal Value Unit	Test Method
Heat Deflection Temperature ⁴		
0.45 MPa, Annealed	84.0 °C	ISO 75-2/B
1.8 MPa, Annealed	76.0 °C	ISO 75-2/A

1 of 2



UL and the UL logo are trademarks of UL LLC © 2017. All Rights Reserved.
UL Prospector | 800.758-4889 or 312.743.8227 | www.ulprospector.com

The information presented on this datasheet was acquired by UL Prospector from the producer of the material. UL Prospector makes substantial efforts to ensure the accuracy of this data. However, UL Prospector assumes no responsibility for the data values and strongly encourages that upon final material selection, data points are validated with the material supplier.

Form No. TDS 100208 en

Document Created: Thursday, March 9, 2017

Added to Prospector: April 2013

Last Updated: 07/02/2018

Thermal	Nominal Value Unit	Test Method
Vicat Softening Temperature		
—	97.0 °C	ASTM D1525 ¹
—	89.0 °C	ISO 306/B50
CLTE - Flow	8.0E-5 cm/cm/°C	ISO 11350-2
Thermal Conductivity	0.17 W/m/K	DIN 52912
Electrical	Nominal Value Unit	Test Method
Surface Resistivity	> 1.0E+14 ohms	IEC 60093
Volume Resistivity	> 1.0E+18 ohms-cm	IEC 60093
Dielectric Constant (100 Hz)	2.50	IEC 60250
Dissipation Factor		IEC 60250
100 Hz	9.0E-5	
1 MHz	7.0E-5	
Flammability	Nominal Value Unit	Test Method
Flame Rating ²	HB	UL 94
Injection	Nominal Value Unit	
Processing (Melt) Temp	180 to 280 °C	
Mold Temperature	40 °C	
Injection Velocity	12 m/min	
Extrusion	Nominal Value Unit	
Melt Temperature	< 240 °C	

Notes

¹ These links provide you with access to supplier literature. We work hard to keep them up to date; however you may find the most current literature from the supplier.

² A UL Yellow Card contains UL-verified flammability and electrical characteristics. UL Prospector continually works to link Yellow Cards to individual plastic materials in Prospector; however this list may not include all of the appropriate links. It is important that you verify the association between these Yellow Cards and the plastic material found in Prospector. For a complete listing of Yellow Cards, visit the UL Yellow Card Search.

³ Typical properties; these are not to be construed as specifications.

⁴ 4hr/80°C

⁵ Rate B (120°C/h), Loading 1 (10 N)

⁶ Antwerp Only



Bijlage D: Lasea LS5-1

LASEA MACHINES LS5

The laser machine with a movement system for the workpieces

Available in 3 models (LS5-1, LS5-2, LS5-3), the LS5 has a large motorized door with a wide access to the processing zone and to the laser source area.

Its ash on ycarb or granite structure and its external enclosure completely insulated from the internal structure ensure high precision work without the risk of external interference.

This workstation can include all types of laser sources, in particular fiber laser sources for micromachining, or even several sources for greater flexibility.

Extremely precise traces can be obtained at very high speed (several meters per second with acceleration ramps of only a few microm).



Specifications

Models	LS5-1	LS5-2	LS5-3
Available laser systems	Any laser source up to 1000 x 500 mm + LS-Shape + LS-Scan		
Door opening	Motorized		
Control panel	Emergency stop & reset - Maintenance key - Start & Stop - Door opening		
Electrical cabinet	Cabinet separated from the machine		
Transportation	Integrated wheels (excluding electrical cabinet)		

Options

Fume extractor	Outside the machine - Active only during laser process
Quick positioning	Shape recognition, autofocus or 3 red pointers crossing at the right focal distance
On-axis Camera	Camera seeing through the laser beam path
Topography	Point or line sensor measuring the topography of the part before and after process
Customized automation	The LS5 can be especially designed for an application, including various automation or sensing features
Loading robot	Additional module inside the machine for automatic loading of plates and parts (autonomy over several shifts)
User interface	LS-HMI - KYLA™ - easyKYLA

Dimensions (H x L x D)

Machine	1950 x 1500 x 1500 mm	1950 x 1500 x 2000 mm	1950 x 1500 x 3100 mm
Safety window	580 x 290 mm		
Working Area	Depending on the application		
Electrical cabinet	1900 x 1400 x 600 mm		

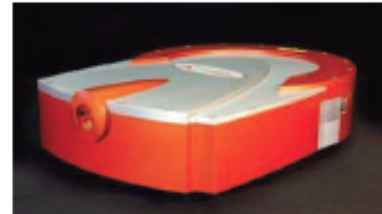
Standard models	LS5 MOTION	LS5 MOTION ACCURATE	LS5 CNC	LS5 CNC ACCURATE
Honeycomb table with granite bridge - Isolated from the external and cause	•			
Granite table with bridge - Isolated from the external and cause		•	•	•
Motorized Z stage - 200 mm travel - 1 µm repeatability - 10 µm accuracy	•	•	•	•
Motorized XY stages - 400 x 300 mm travel - 1 µm repeatability - 10 µm accuracy	•		•	
Motorized XY stages - 400 x 300 mm travel - 0,75 µm repeatability - 3 µm accuracy		•		•
Motorized AC stages - Infinite x 110° travel - 50 µrad repeatability - 150 µrad accuracy			•	
Motorized AC stages - Infinite x 110° travel - 5 µrad repeatability - 15 µrad accuracy				•
Slide camera	•	•	•	•

III LASER SOURCE

Satsuma is a high energy ultrafast fiber laser. It benefits from Amplitude Systemes extensive experience in ultrafast laser technology and simultaneously offers a high output power and high repetition rate.

Thanks to groundbreaking, patented technological advances in fiber design and amplifier technology, Satsuma offers short pulse width, high repetition rate (up to 2MHz) and high energies in an ultra-compact, highly stable, and air-cooled housing. With its extremely high repetition rate and beam quality, Satsuma combines the high quality of ultrafast laser micromachining and the processing speed required for industrial applications.

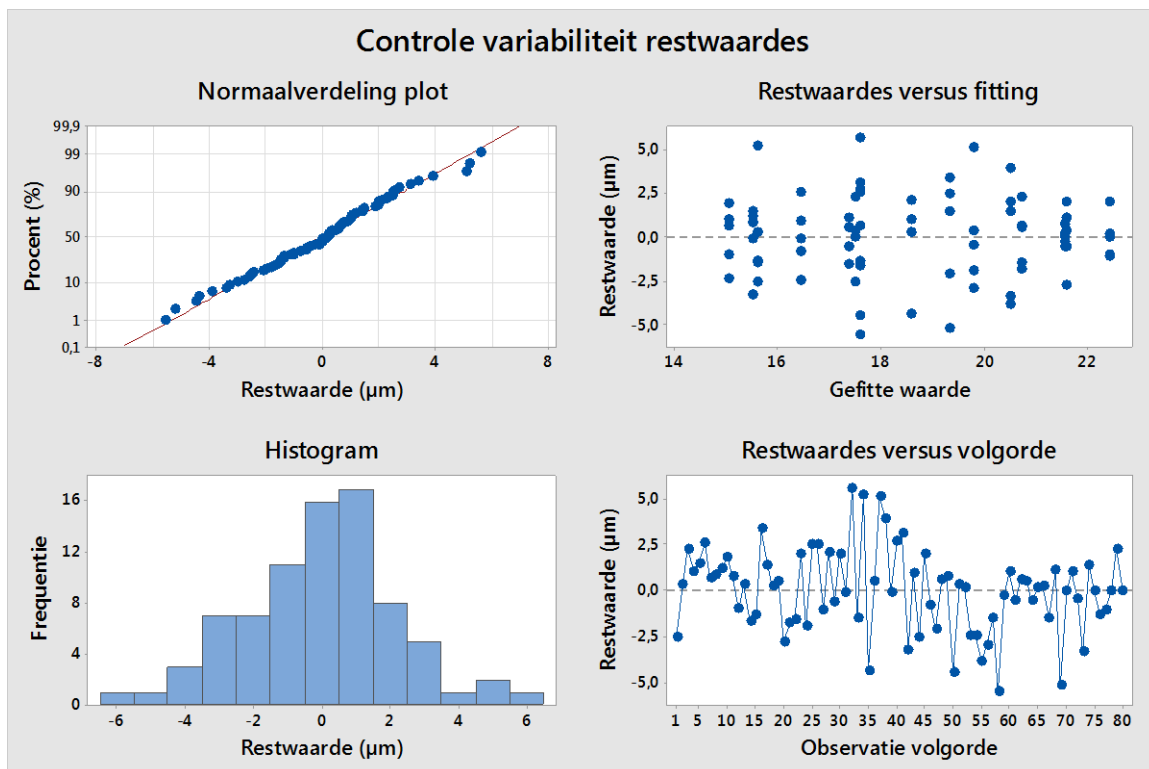
The laser source includes an output acousto-optic modulator which allows triggering the laser after the actual output of the laser cavity, contrary to "Q-switched" lasers. With this configuration, the laser beam features an extreme power stability and prevent from the formation of more energetic first pulses, which is very useful for the highly sensitive machining process.



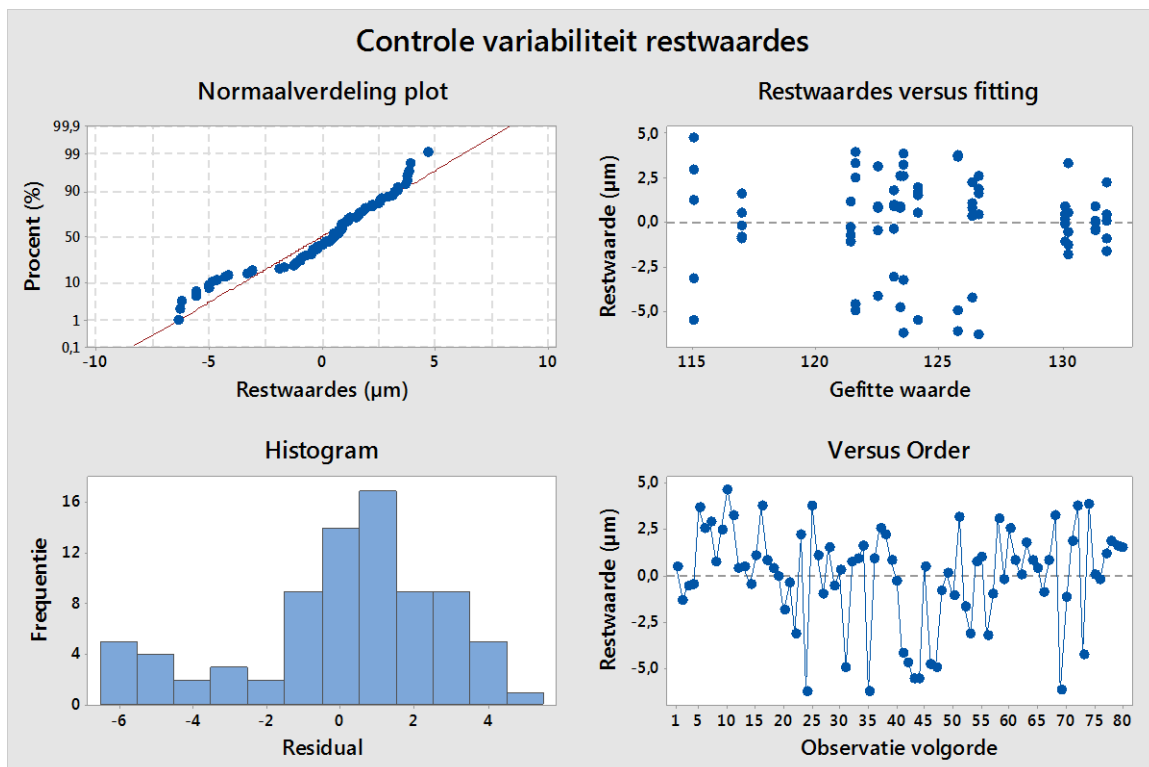
	Satsuma	Satsuma HP	Satsuma HP ²
Type	Fiber laser		
Wavelength	1.030nm		
Pulse length	< 350fs		
Max pulse energy	10μJ	20μJ	40μJ
Average power	5W	10W	20W
Repetition rate	from 0 to 2MHz		
Beam quality	M ² ≤1,2		
Cooling	Air-cooled		

Bijlage F: Controle op variabiliteiten bij de DoE's van textuurhoogte en contacthoek van PS

Onderstaande figuur geeft de controle op variabiliteiten bij de DoE van de textuurhoogte bij PS.



Onderstaande figuur geeft de controle op variabiliteiten bij de DoE van de contacthoek bij PS.



Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
Getextureerde matrijzen in een kunststofspuitgietproces

Richting: **master in de industriële wetenschappen: elektromechanica**
Jaar: **2017**

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,

Ceyssens, Stef

Daubies, Tiber

Datum: **6/06/2017**