การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและการหล่อเย็นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ส่งผลต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก

กฤช ฉายสุริยะกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ปีการศึกษา 2560

STUDY ON INFLUENCE OF HEATING AND COOLING TEMPERATURE IN INJECTION MOLDING TO EFFECT ON GLOSSY OF PLASTIC INJECTION PARTS

Krit Chaisuriyakul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
For The Degree of Master Engineering Program in Engineering Technology
Graduate School
Thai-Nichi Institute of Technology
Academic Year 2017

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและการหล่อเย็นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ส่งผลต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก
โดย	กฤช ฉายสุริยะกุล
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์	ดร.วิโรช ทัศนะ

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. .....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภู ศรีสืบสาย)

..... กรรมการ

(ดร. ดอน แก้วดก)

..... กรรมการ

(ดร.เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยาพนธ์

(ดร. วิโรช ทัศนะ)

กฤช ฉายสุริยะกุล : การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและการหล่อเย็นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ส่งผลต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก, อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร. วิโรช ทัศนะ, 160 หน้า.

กระบวนการฉีดพลาสติกเป็นหนึ่งในกรรมวิธีการผลิตที่ถูกใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยที่ให้ประสิทธิผลในการผลิตสูง ความสามารถในการผลิตที่สูงอีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปที่ซับซ้อนได้อย่างถูกต้องแม่นยำและรวดเร็ว หลักการพื้นฐานคือ การฉีดเข้าตามแบบแม่พิมพ์ การอัดย้ำ การหล่อเย็นและการปลดชิ้นงาน ในปัจจุบันนี้ชิ้นงานพลาสติกถูกนำมาใช้ในงานที่ต้องการแสดงพื้นผิวภายนอกมากขึ้นและเน้นเรื่องสีสันและความสวยงาม ทำให้ชิ้นงานฉีดพลาสติกนี้จึงไม่จำเป็นต้องเข้าสู่กระบวนการพ่นสีหรือเคลือบสี โดยทั่วไปแล้วชิ้นงานลักษณะนี้จะต้องไม่มีข้อบกพร่องเรื่องรอยเชื่อมพลาสติกในกระบวนการฉีด เนื่องจากจะทำให้พื้นผิวภายนอกไม่สวยงาม และไม่มีความมันเงา ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดงานพลาสติกโดยมีสามตัวแปร คือ อุณหภูมิปลายหัวฉีด อุณหภูมิของแม่พิมพ์ และความเร็วฉีดย้ำ โดยใช้พลาสติกประเภทเอบีเอส และออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองร่วมกับการออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต เพื่อหาข้อสรุปของระดับความมันเงาจากอิทธิพลที่ทำให้ชิ้นงานมีความมันเงาที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่าอิทธิพลที่ส่งผลต่อความมันเงามากที่สุด คือ อุณหภูมิปลายหัวฉีดที่ 223.18 องศาเซสเซียส, อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ 76.82 องศาเซสเซียส และความเร็วฉีดย้ำที่ 166.82 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งทำให้ได้ค่าความมันเงาสูงที่สุดที่ 92.8 GU ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

บัณฑิตวิทยาลัย ลายมือชื่อนักศึกษา .....

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2560

KRIT CHAISURIYAKUL : STUDY ON INFLUENCE OF HEATING AND COOLING TEMPERATURE IN INJECTION MOLDING TO EFFECT ON GLOSSY OF PLASTIC INJECTION PARTS. ADVISOR : WIROJ THASANA, 160 PP.

Injection molding process is one of the most extensively used for manufacturing plastic processes due to high productivity, high efficiency and also the manufacturing of the net shape or complex design parts. In general, the finished plastic parts are growing trend towards using in automotive parts, electronic appliances and require more direct appearance surfaces. Nowadays, plastic injection parts do not need to be painted or coated with the manufacturing processes and weld marks on the surface parts must be completely eliminated. The objective of the research is to study the effect of gloss in plastic parts. The study has been applied the parameters as injection temperature, cavity temperature and injection holding speed. Using ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) materials and design of experiment by Response Surface Methodology (RSM) combined with Central Composite Design (CCD) to independent temperature variables. The results of study was estimated the maximum optimized of gloss surface were the parameter values of injection temperature at 223.18 °C, cavity temperature at 76.82 °C and injection holding speed 166.82 mm/sec, respectively, on the 95% confidence interval.

Graduate School Student's Signature .....

Field of Engineering of Technology Advisor's Signature .....

Academic Year 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับคำปรึกษาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.วิโรช ทัศนะ ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภู ศรีสืบสาย จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรรมการสอบ ดร. ดอน แก้วดก และดร.เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ รวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ด้วยที่คอยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในทุกขั้นตอนของการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี เพื่อให้งานวิจัยฉบับนี้มีความเรียบร้อยสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และอาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่คอยแนะนำและติเตียนในส่วนของการคำนวณและในส่วนของการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก การเขียนแบบแม่พิมพ์ที่มีมาตรฐาน หลักการคำนวณทางสถิติศาสตร์ที่ช่วยให้ผลงานวิจัยอยู่บนพื้นฐานของความแม่นยำทางคณิตศาสตร์ และคอยช่วยเหลือทุกๆสิ่งทุกๆอย่างที่คอยอยู่เคียงข้างเสมอมาในยามที่เกิดปัญหา

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่เทคนิคประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ คุณธีรเดช ขะจีฟ้า ที่ให้ความกรุณาในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือ ในการผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและคอยอำนวยความสะดวกในทุกๆเรื่อง จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่นที่ให้การสนับสนุนในส่วนของทุนวิจัยเพื่อพัฒนาผลงานของห้องวิจัย ขอบพระคุณพ่อ แม่ ครอบครัว และเพื่อนๆทุกท่านทั้งผู้ที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนาม ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาและสนับสนุนในการทำงาน จนดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กฤช ฉายสุริยะกุล

สารบัญ

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

สารบัญรูป

รูป หน้า

สารบัญรูป (ต่อ)

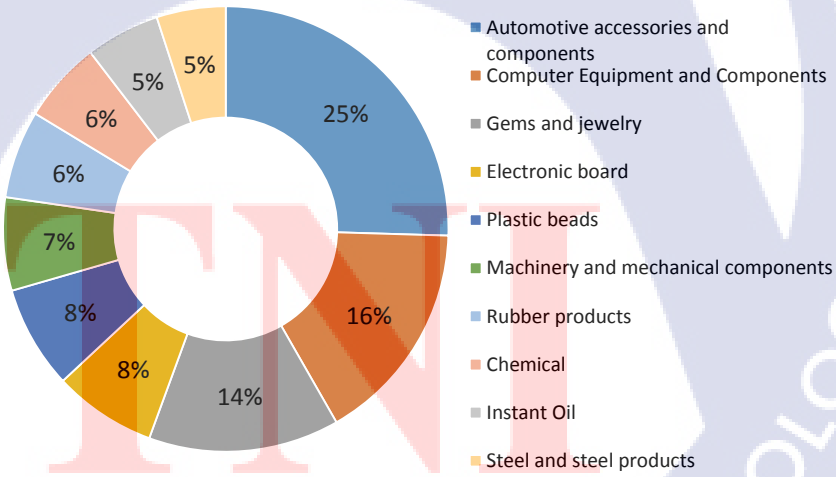
สารบัญรูป (ต่อ)

สารบัญรูป (ต่อ)

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมพลาสติกในประเทศไทยปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในปี พ.ศ. 2559 ประเทศไทยได้มีอันดับการส่งออกสินค้าประเภทอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ขึ้นมาเป็นอันดับหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 1.1 อันดับรองลงมาเป็นอุตสาหกรรมประเภทคอมพิวเตอร์และชิ้นส่วนประกอบ ซึ่งจากอุตสาหกรรมสองอันดับแรกที่ได้กล่าวมานี้มีการใช้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปมาจากชิ้นส่วนพลาสติกจำนวนมาก จากแนวโน้มในปี พ.ศ. 2559 กระบวนการขึ้นรูปของชิ้นส่วนพลาสติกก็ยังคงมีอัตราการผลิตสูงขึ้นเรื่อยๆ การพัฒนาคุณภาพหรือยกระดับของสินค้า (Value Added) ก็มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ผู้ประกอบการในประเทศเริ่มหันมาผลิตสินค้าพลาสติกที่มีนวัตกรรมและใช้เทคโนโลยีเพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของธุรกิจ รวมทั้งยังสามารถขยายกลุ่มลูกค้าไปสู่ระดับกลางและระดับพรีเมียมเพื่อให้สอดคล้องกับพฤติกรรมคนรุ่นใหม่ที่นิยมสินค้าที่ต้องการความหลากหลายมากขึ้น และรูปแบบการผลิตสินค้าย่อมแตกต่างกันไป สำหรับสินค้าที่มาจากการฉีดพลาสติกก็มีแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน



รูปที่ 1.1 อันดับสินค้าการส่งออกของประเทศไทยในปี 2559 ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ [1]

อุตสาหกรรมพลาสติกในโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และอิเล็กทรอนิกส์ได้เติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกจากแบบแม่พิมพ์ออกมาเป็นชิ้นงานสำเร็จรูปกลายเป็นวัสดุที่ทดแทนโลหะได้ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และอิเล็กทรอนิกส์ได้เป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นชิ้นส่วนประกอบตัวถังรถยนต์หรือแม้แต่ชิ้นส่วนตกแต่งภายในที่ต้องการความสวยงามจากชิ้นส่วนพลาสติกสำเร็จรูป ดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยรูปด้านขวามือชิ้นงานพลาสติกสำเร็จรูปจะมีความมันเงาซึ่งจะนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนประกอบได้ในทันทีแต่ด้านซ้ายมือชิ้นงานจะมีความมันเงาต่ำกว่าจำเป็นต้องทำการพ่นหรือเคลือบสีก่อนทำให้เสียเวลาในกระบวนผลิตและต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่มาจากกระบวนการฉีดพลาสติกด้วยเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อให้มีความมันเงานี้ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการเคลือบผิวชิ้นงานซ้ำ ทำให้เป็นการเพิ่มมูลค่าของสินค้าและลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตได้โดยตรง สามารถแสดงพื้นผิวชิ้นงานที่มีความมันเงาได้โดยตรงและนำไปใช้งานได้ในทันที ซึ่งสามารถวัดค่าด้วยอุปกรณ์การวัดตามเงื่อนไขมาตรฐานอุตสาหกรรม ASTM: D523 [2]

รูปที่ 1.2 ชิ้นงานฉีดพลาสติกที่มีความมันเงาสูง (ด้านซ้าย) และความมันเงาต่ำ (ด้านขวา) [3]

ปัจจัยที่มีผลต่อความมันเงาของชิ้นส่วนพลาสติกมีหลายปัจจัยอาทิเช่น ปัจจัยที่มาจากการออกแบบแม่พิมพ์ พื้นผิวแม่พิมพ์ของคอร์และคาวิตี้ วัสดุของพลาสติก ผู้ปฏิบัติงาน และการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์การฉีดของเครื่องฉีดพลาสติก ซึ่งส่วนใหญ่รอบการผลิตของการฉีดพลาสติกจะอยู่ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ ชิ้นงานที่ถูกปลดออกในส่วนที่แสดงพื้นผิวความสวยงามจะมีผลจากแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ ถ้าอุณหภูมิของแม่พิมพ์ต่ำจะทำให้ชิ้นงานออกมามีคุณภาพต่ำอาจจะเกิดเป็นข้อบกพร่องจากการฉีดไม่เต็มแบบ เนื่องจากน้ำพลาสติกหลอมเหลวมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับพื้นผิวแม่พิมพ์และเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นกึ่งของเหลวก่อนที่จะไหล

เข้าเต็มแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ ทั้งนี้อุณหภูมิแม่พิมพ์ก็ไม่สามารถรักษาการหล่อเย็นได้ตลอด เนื่องจากชิ้นงานจำเป็นต้องปลดออก อุณหภูมิที่ต้องทำให้แม่พิมพ์เย็นลงก็สำคัญ และสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นที่มีผลต่อความมันเงาของชิ้นงานและข้อบกพร่องอื่นๆ ในชิ้นงานฉีดพลาสติกอีกด้วย

จากปัญหาอิทธิพลของอุณหภูมิและการหล่อเย็นของกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกยังไม่มีความชัดเจนในการแก้ไขปัญหาเพื่อให้มีความมันเงาและความสวยงามของพื้นผิวในชิ้นส่วนพลาสติกสำหรับเป็นวัสดุที่ใช้ทดแทนโลหะได้ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และอิเล็กทรอนิกส์ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและการหล่อเย็นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ส่งผลต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก เพื่อสามารถออกแบบผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนพลาสติกที่ต้องการความมันเงาสูงในอนาคตได้ และลดกรรมวิธีในการผลิตและค่าใช้จ่ายด้านการตกแต่งผิวชิ้นงาน

1.2 ความสำคัญของการวิจัย

1.2.1 ลดข้อบกพร่องด้านคุณภาพของชิ้นส่วนพลาสติกสำเร็จรูปเช่น ลดรอยเชื่อมพลาสติก ลดรอยทางฉีด และลดปัญหาการฉีดไม่เต็มชิ้นงาน เป็นต้น

1.2.2 สามารถพัฒนาและลดขั้นตอนกระบวนการพ่นสีในกระบวนการผลิตจากชิ้นส่วนพลาสติกได้ ซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและการหล่อเย็นที่พื้นผิวของแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ในกระบวนการฉีดที่มีผลต่อความมันเงาของชิ้นส่วนพลาสติก

1.3.2 เพื่อหาพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดพลาสติกของวัสดุเอบีเอส (Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS) ที่เหมาะสมสำหรับความมันเงาของชิ้นส่วนพลาสติกด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ร่วมกับการออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite Design, CCD)

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้ใช้ระเบียบวิจัยเชิงทดลองในรูปแบบของกรณีศึกษาสำหรับข้อมูลเชิงคุณภาพ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานฉีดพลาสติกและเพิ่มมูลค่าของชิ้นงานฉีดพลาสติกเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการฉีดพลาสติกและสามารถพัฒนาต่อไปสู่อุตสาหกรรมการผลิตจริง ซึ่งเป็นการศึกษาข้อมูลและทฤษฎีเบื้องต้นของการกำหนดตัวแปรอิสระที่

ส่งผลต่อชิ้นงานที่มีความมันเงา อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย มีขอบเขตของการวิจัยดังต่อไปนี้

1.4.1 การออกแบบแม่พิมพ์และวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและการหล่อเย็นแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกของชิ้นงานฉีดพลาสติกสำหรับเครื่องฉีดพลาสติกแบบแนวนอน โดยใช้เทคนิคการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CAE) บนโปรแกรม Moldex3D R14 เพื่อหาอุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ในช่วงเวลาต่างๆ

1.4.2 การทดลองใช้วัสดุเอบีเอส (ABS) ของกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกสำหรับเครื่องฉีดพลาสติกแบบแนวนอนยี่ห้อโตชิบา (Toshiba) รุ่น EC100S ขนาด 100 ตัน และขนาดชิ้นงานพลาสติกประมาณ 34 กรัม ขนาด Mold Size: 250 x 400 x 300 มม. และใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature Controller) ในการควบคุมอุณหภูมิการหล่อเย็น

1.4.3 การศึกษาความมันเงาของชิ้นงานพลาสติกหลังการฉีดพลาสติกหลังการเซ็ตตัวแล้วจะตรวจสอบโดยอุปกรณ์วัดความมันเงา (Gloss Meter) ด้วยมาตรฐาน ASTM: D523 ของรุ่น NHG-268 และใช้วัดชิ้นงานที่มุม 60°

1.4.4 การทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดพลาสติกของวัสดุเอบีเอสที่เหมาะสมสำหรับความมันเงาของชิ้นส่วนพลาสติกด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองแบบร่วมกับออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต โดยใช้จุดกึ่งกลาง (Center Points) 5 จุด รวมทั้งหมด 19 การทดลอง โดยมีตัวแปรอิสระทั้งหมด 3 ตัวแปรได้แก่ อุณหภูมิของผิวแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ อุณหภูมิพลาสติกปลายหัวฉีด และความเร็วของการฉีดย้ำ แล้วทำการสรุปผลอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่สุดของชิ้นงานฉีดพลาสติกเอบีเอสที่มีความมันเงา โดยวัดจากเครื่องวัดความมันเงา แล้วนำข้อมูลของปัจจัยตัวแปรที่ได้กล่าวมากับระดับความมันเงา เพื่อหาอิทธิพลที่ทำให้ชิ้นงานมีความมันเงาที่แตกต่างกัน

1.4.5 ระยะเวลาในงานวิจัยนี้ดำเนินการตั้งแต่ เดือนกรกฎาคม พ.ศ 2560 ถึง มีนาคม พ.ศ.2561

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ชิ้นส่วนพลาสติกที่สามารถทดแทนการผลิตแบบดั้งเดิมได้และมีข้อบกพร่องน้อยลง

1.5.2 สามารถออกแบบผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนพลาสติกที่ต้องการความมันเงาสูงในอนาคตได้

1.5.3 ลดกรรมวิธีในการผลิตและลดค่าใช้จ่ายด้านการตกแต่งผิวชิ้นงาน

1.5.4 เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยและพัฒนาของกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกที่มีอิทธิพลต่อความมันเงา

0

1.6 แผนงานและระยะเวลาดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงานปี พ.ศ. 2560 – 2561

ขั้นตอนวิธีการดำเนินงาน	ปี พ.ศ.													
	2560											2561		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
1.ศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก														
2.สอบหัวข้อโครงร่างและอนุมัติ														
3.ออกแบบการทดลองและปรับแต่งแม่พิมพ์														
4.ออกแบบชิ้นส่วนและวิเคราะห์การไหลของพลาสติกด้วย CAE														
5.สร้างและประกอบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก														
6.เก็บข้อมูลและสรุปผลวิเคราะห์														
7.นำเสนอผลงานทางวิชาการ														
8.จัดทำวิทยานิพนธ์														
9.สอบวิทยานิพนธ์														

1.7 คำอธิบายศัพท์

1.7.1 **มาตรฐานอุตสาหกรรม ASTM: D523** มาตรฐาน ASTM International เป็นที่รู้จักกันในนาม สมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกันหรือ American Society for Testing and Materials (ASTM) ก่อตั้งขึ้นในปี 1898 โดยกลุ่มของวิศวกรและนักวิทยาศาสตร์ได้รวมตัวกันเพื่อแก้ปัญหารางรถไฟที่หักบ่อย งานของพวกเขาได้นำไปสู่การสร้างมาตรฐานของเหล็กที่ใช้ในการก่อสร้างรางรถไฟ ในส่วนของ ASTM: D523 นั้นเป็นมาตรเกี่ยวกับการวัดความมันเงาที่ครอบคลุมการวัดชิ้นงานมาตรฐานที่ไม่เป็นโลหะที่รองรับในมุมมาตรฐานคือ มุม 20° , 60° และ 85° โดยหน่วยที่วัดได้จะเป็นหน่วย GU บ่งบอกถึงระดับความมันเงาและความมัวของชิ้นงานได้ [2]

1.7.2 **เครื่องมือวัดความมันเงา (Gloss meter)** เป็นเครื่องวัดคุณสมบัติการสะท้อนแสงบนพื้นผิวของวัตถุ วัตถุที่ใช้ทดสอบมีหลากหลายประเภทซึ่งมีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น พลาสติก ชิ้นงานพ่นสีหรือเคลือบเงา อโลหะหรือโลหะ มีคุณสมบัติการสะท้อนมากเมื่อมุมในการวัดมากๆ ซึ่งวัดจากเส้นตั้งฉากกับวัตถุ วิธีการวัดความเงาจึงมีมุมที่แตกต่างกันไปตามประเภทวัตถุทดสอบ การประยุกต์ใช้งานเครื่องวัดความมันเงามีใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับควบคุมคุณภาพสินค้าในภาคอุตสาหกรรมเช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ ชิ้นส่วนพลาสติก สแตนเลส เป็นต้น สำหรับมุมที่ใช้วัดความมันเงาโดยทั่วไปแล้วมีอยู่ 3 มุม คือ 20° , 60° และ 85° ซึ่งการใช้งานที่แตกต่างกันไปตามความสามารถในการสะท้อนแสงของวัตถุ คุณสมบัติการสะท้อนแสงได้มากจมุมเล็กๆ ส่วนวัตถุที่สะท้อนแสงได้น้อยจะใช้มุมที่ใหญ่ในการวัดมากขึ้น

บทที่ 2
หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการพื้นฐาน

ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแม่พิมพ์พลาสติก การถ่ายเทความร้อนในแม่พิมพ์และอิทธิพลที่ส่งผลต่อความมันเงาของชิ้นส่วนพลาสติก โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อที่มาจากปัจจัยหลักๆ อาทิเช่น ปัจจัยที่มาจากการปรับตั้งพารามิเตอร์เครื่องฉีดหรือกระบวนการฉีด ปัจจัยที่มาจากแม่พิมพ์ ปัจจัยที่มาจากวัสดุที่ใช้ ปัจจัยที่มาจากผู้ปฏิบัติงานรวมถึงการแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องชิ้นงานเรื่องรอยเชื่อมพลาสติกอุณหภูมิแม่พิมพ์และอุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลว เป็นต้น การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

- การกระจายร้อนของแม่พิมพ์
- พารามิเตอร์ที่สำคัญในการฉีดพลาสติก
- อิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อคุณสมบัติของชิ้นงานฉีดพลาสติก
- หลักการของเครื่องวัดความมันเงา
- การออกแบบทดลอง (Design of Experiment, DOE)
- แบบจำลองการไหลในกระบวนการฉีดพลาสติก
- การทบทวนวรรณกรรม

2.2 การกระจายร้อนของแม่พิมพ์

ในทางกายภาพของรูปทรงชิ้นงานที่มาจากแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกจะมีปัญหาในเรื่องของการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ซับซ้อน ทางทฤษฎีแล้วสมการทางคณิตศาสตร์ถูกนำเข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าอุณหภูมิและเวลาในการฉีดพลาสติกซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อรอบการผลิต หลักการพื้นฐานของการฉีดพลาสติกในหนึ่งรอบคือ การนำพลาสติกหลอมเหลวไหลเข้ามาให้เต็มเต็มแม่พิมพ์ที่เย็นกว่า ตามทฤษฎีแล้วอุณหภูมิแม่พิมพ์จะใช้เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยไม่ได้ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่จุดใดจุดหนึ่งโดยเฉพาะอีกทั้งในความเป็นจริงแล้วเรายังต้องรักษาอุณหภูมิในแต่ละจุดให้คงที่อยู่ตลอดเวลาด้วย ในทางปฏิบัติถือเป็นเรื่องที่ทำได้ยากมากต้องอาศัยประสบการณ์หรือความชำนาญเข้ามาเพื่อช่วยในการคำนวณ

ปัญหาของการส่งถ่ายความร้อนส่วนใหญ่จะเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ที่สามารถสร้างเป็นสมการด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากค่าคงที่ของวัสดุพลาสติกและวัสดุแม่พิมพ์ โดยจะนับจากค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ต่างๆ นี้เมื่อรอบการผลิตอยู่ในสถานะคงที่แล้วจะเกิดเป็นสมการสมดุลความร้อน

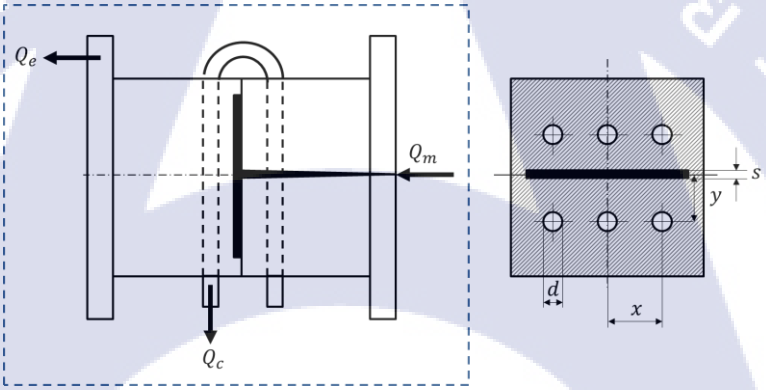
ฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทสู่แม่พิมพ์จะเท่ากับฟลักซ์ความร้อนที่ถูกถ่ายเทออกจากแม่พิมพ์หมายความว่า แม่พิมพ์จะอยู่ในสถานะสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 2.1 หลักการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก โดยเขียนเป็นสมการสมดุลความร้อนในสมการที่ 1 ได้ดังต่อไปนี้

$$\dot{Q}_m + \dot{Q}_c + \dot{Q}_e = 0 \tag{1}$$

โดยที่ $\dot{Q}_m$ คือ ฟลักซ์ความร้อนของพลาสติกหลอมเหลว (W/m^2.°C)

$\dot{Q}_c$ คือ ฟลักซ์ความร้อนของน้ำหล่อเย็น (W/m^2.°C)

$\dot{Q}_e$ คือ ฟลักซ์ลักซ์ความร้อนจากสภาพแวดล้อม (W/m^2.°C)



รูปที่ 2.1 หลักการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

ความร้อนจากพลาสติกหลอมเหลวจะถูกถ่ายเทออกไปโดยน้ำหล่อเย็นในทางหล่อเย็นและการถ่ายเทอากาศรอบๆ ผิวของแม่พิมพ์ เนื่องจากแม่พิมพ์มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจะมีการถ่ายเทความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ในทางปฏิบัติแล้วเราสามารถติดตั้งฉนวนกั้นความร้อนที่หน้าแปลนของเครื่องฉีดพลาสติกซึ่งจะทำให้ความร้อนไม่กระจายสู่ภายนอกและเป็นการรักษาสมดุลความร้อน จึงสามารถเขียนสมการสมดุลการแลกเปลี่ยนความร้อนใหม่ได้ดังสมการที่ 2

$$\dot{Q}_m + \dot{Q}_c = 0 \tag{2}$$

ฟลักซ์ความร้อนของพลาสติกหลอมเหลว สามารถเขียนในรูปแบบสมการที่ 3 ได้ดังนี้ [4]

$$\dot{Q}_m = 10^{-3}[C_p(T_M - T_E) + i_m]\rho\frac{S}{2}x \qquad (3)$$

โดยที่ C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะ (J/kg.°C)

i_m คือ ความร้อนแฝงของพลาสติก (kJ/kg)

ρ คือ ความหนาแน่นหลอมเหลวของพลาสติก (g/cm^3)

x คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรูหล่อเย็น (mm)

S คือ ความหนาของชิ้นงาน (mm)

T_M คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก (°C)

T_E คือ อุณหภูมิปลดชิ้นงาน (°C)

ฟลักซ์ความร้อนของน้ำหล่อเย็นที่สัมพันธ์กับเวลา สามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ ดังนี้ [5]

$$\dot{Q}_c = 10^{-3}\left(\frac{1}{2}t_f + t_c + \frac{1}{2}t_o\right)\left(\frac{1}{10^{-3}\alpha\pi d}^{-1}\frac{1}{k_{st}S_e}\right)^{-1}(\overline{T}_W - T_c) \qquad (4)$$

โดยที่ t_f คือ เวลาที่ใช้ในการฉีด (sec)

t_c คือ เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น (sec)

t_o คือ เวลาที่ใช้ในการเปิดปิดแม่พิมพ์ (sec)

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูหล่อเย็น (mm)

k_{st} คือ ค่าการนำความร้อนของแม่พิมพ์ (W/m.°C)

S_e คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของรูปทรงหน้าตัดรูหล่อเย็น

$\overline{T}_W$ คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ก่อนเริ่มหล่อเย็น (°C)

T_c คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการหล่อเย็น (°C)

สำหรับอิทธิพลของตำแหน่งรูหล่อเย็นในการนำความร้อนสามารถเขียนเป็นสมการสัมประสิทธ์ของรูปทรงหน้าตัดรูหล่อเย็น (Shape factor, S_e) ดังแสดงในสมการที่ 5 [4]ได้ดังนี้

$$S_e = \frac{2\pi}{ln\left[\frac{2x\sinh(2\pi y/x)}{\pi d}\right]} \tag{5}$$

ค่าสัมประสิทธ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient)ของน้ำหล่อเย็นสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 6 [4] ดังนี้

$$\alpha = \frac{31.395}{d} R_e^{0.8} \tag{6}$$

เมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) ได้จากสมการที่ 7 ดังนี้

$$R_e = \mathrm{u}\frac{d}{v} \tag{7}$$

โดยที่ u คือ ความเร็วของน้ำหล่อเย็น (m^2/s)

v คือ ความหนืดของน้ำหล่อเย็น (m/s)

เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นสำหรับชิ้นงานรูปทรงแผ่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8 ดังนี้ [4]

$$t_c = \frac{s^2}{\pi^2 a} ln\left[\frac{4}{\pi}\left(\frac{T_M - \bar{T}_W}{T_E - T_W}\right)\right] \tag{8}$$

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความร้อนและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อความมันเงาของชิ้นส่วนพลาสติกหลอมเหลวที่มีการสูญเสียความร้อนในช่องทางการไหลอาจจะทำให้เกิดปัญหาการฉีดไม่เต็มชิ้นงานได้ ปัจจุบันเทคโนโลยีการให้ความร้อนสูงแก่แม่พิมพ์มีการให้ความร้อนจากภายในและภายนอก ตัวอย่างเช่นการให้ความร้อนจากภายในจะเป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องทางการไหล

โดยไอน้ำ (Steam), น้ำร้อน (Hot Water) หรือฮีทเตอร์ (Heater) จะทำให้ได้อุณหภูมิที่ทั่วถึงกันทั้งแม่พิมพ์ แต่สำหรับความมันเงาของชิ้นงานจะเน้นที่ผิวแม่พิมพ์ การให้ความร้อนจากภายนอกจะให้ผลลัพธ์ที่ไวกว่า เพื่อให้มีการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุดและไม่สิ้นเปลืองพลังงาน การเลือกใช้วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์จำเป็นต้องเลือกวัสดุเหล็กทำแม่พิมพ์ที่เหมาะสมกับการทนทานความร้อนและการขยายตัวด้วย

2.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการฉีดพลาสติก [6]

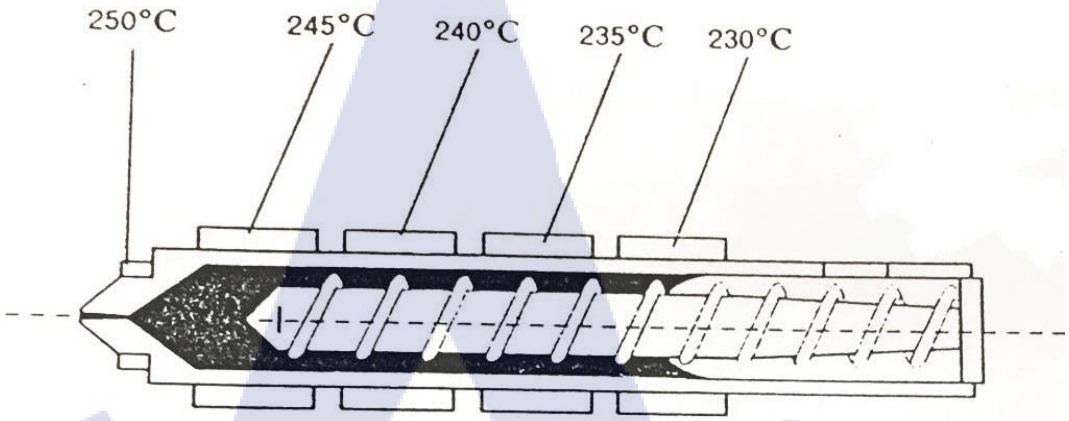
การฉีดพลาสติกเป็นงานที่ซับซ้อนที่อาจเกิดขึ้นจากการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ว่าถูกต้องหรือเหมาะสมกับลักษณะงานหรือไม่ ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานฉีดพลาสติกและมีอิทธิพลต่อเวลาการทำงาน ตลอดจนคุณภาพของชิ้นงานที่เกี่ยวข้องกับความมันเงานั้นมีอยู่ด้วยกัน 4 กลุ่มใหญ่ๆคือ

1.อุณหภูมิ (พลาสติกเหลว แม่พิมพ์)
2.เวลา (ฉีด ฉีดย้ำ หล่อเย็น และวงจรทำงาน)
3.ความดัน (ฉีด ฉีดย้ำ ต้านการถอยของเกลียวหนอน และในแม่พิมพ์)
4.ความเร็ว (ฉีด ปิด-เปิดแม่พิมพ์ ชุดเคลื่อนเข้า-ออก และรอบเกลียวหนอน)

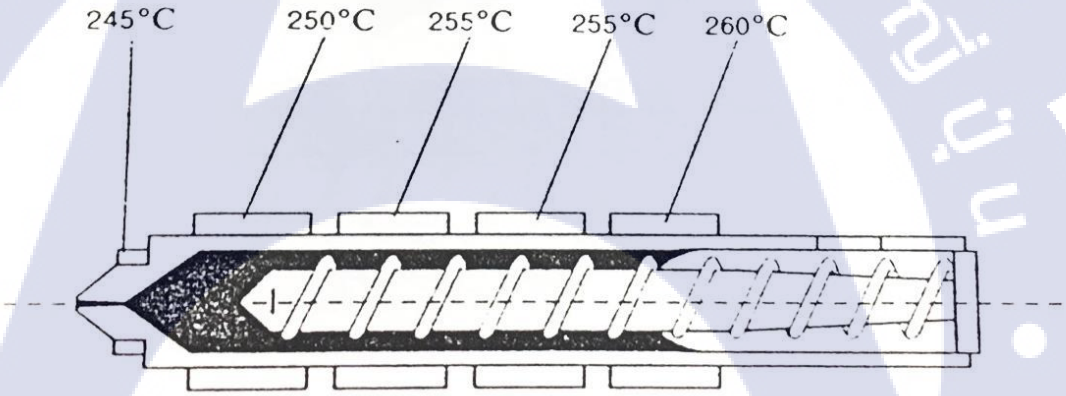
<u>2.3.1 อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว</u>

อุณหภูมิพลาสติกเป็นอุณหภูมิของพลาสติกเหลวที่ออกมาจากเครื่องฉีดพลาสติกโดยหัวฉีดขณะทำการฉีด ไม่ใช่อุณหภูมิที่แผ่นความร้อน แต่ในกรณีที่เราไม่มีเครื่องวัดอุณหภูมิ อาจใช้อุณหภูมิของแผ่นความร้อนที่หัวฉีดแทนได้ ในกรณีของงานวิจัยนี้ก็ใช้ค่าที่วัดแผ่นความร้อนที่หน้าจอของเครื่องฉีดพลาสติกโดยตรง อุณหภูมิของพลาสติกเหลวที่ใช้ในการฉีดพลาสติกนั้นขึ้นอยู่กับพลาสติกที่ใช้ ซึ่งโดยปกติสามารถสอบถามได้จากผู้ผลิตโดยตรงจากบริษัทผู้ผลิต ส่วนมากจะบอกเป็นช่วงกว้างๆ เช่น 230 – 280 องศาเซสเซียส การที่จะเลือกใช้อุณหภูมิสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแต่ละลักษณะงานด้วย การตั้งอุณหภูมิแผ่นความร้อนสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1.เริ่มจากอุณหภูมิต่ำๆและค่อยๆสูงขึ้น (จากกรวยเติมพลาสติกไปยังหัวฉีด) อุณหภูมิพลาสติกเหลวที่ต้องการ 250 องศาเซสเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.2
2.เริ่มจากอุณหภูมิสูงและค่อยๆต่ำลง (จากหัวฉีดไปยังกรวยเติมพลาสติก) อุณหภูมิพลาสติกเหลวที่ต้องการ 250 องศาเซสเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การตั้งอุณหภูมิของกระบอกฉีดจากต่ำไปหาสูง [6]



รูปที่ 2.3 การตั้งอุณหภูมิของกระบอกฉีดจากสูงไปหาต่ำ [6]

วิธีที่นิยมใช้กันมากคือใช้อุณหภูมิต่ำและค่อยๆสูงขึ้น ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันพลาสติกตรงตำแหน่งใต้กรวยเติมพลาสติกอาจเกิดการหลอมเหลวจนเกิดการอุดตันได้ และก็ต้องคอยระวังอย่าใช้อุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไป โดยเฉพาะที่หัวฉีดซึ่งถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปพลาสติกหลอมเหลวจะไหลเยิ้มออกมาที่หัวฉีดได้ แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปอุณหภูมิอาจจะตกลงเนื่องจากเวลาที่หัวฉีดเข้าชิดแม่พิมพ์และค้างอยู่กับที่จะมีการสูญเสียความร้อนให้กับแม่พิมพ์ แต่จุดประสงค์ที่สำคัญในการเลือกใช้

อุณหภูมิต่ำๆและค่อยๆสูงขึ้น ก็เพื่อป้องกันไม่มีพลาสติกเหลวอุณหภูมิสูงเกินไปจนทำให้ตัวพลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพได้

2.3.2 อุณหภูมิของแม่พิมพ์

แม่พิมพ์สามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของน้ำหรือน้ำมันที่ไหลเข้าหมุนเวียนอยู่ในแม่พิมพ์ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ทำการปรับตั้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก คือ ถ้าเป็นพลาสติกประเภทอะมอร์ฟัส (amorphous thermoplastics) เราจะใช้อุณหภูมิต่ำ ส่วนพาร์เชียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติก (Partial crytalline thermoplastics) จะใช้อุณหภูมิสูงกว่า ในกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ เราก็ต้องอาศัยวิธีการปรับปริมาณและความเร็วของน้ำเข้าหรือออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งต้องใช้ประสบการณ์มากและต้องใช้เวลามากพอสมควรกว่าจะได้อุณหภูมิของแม่พิมพ์คงที่ กล่าวคือถ้าต้องการอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำเราสามารถเปิดน้ำเข้าแม่พิมพ์ไปพร้อมๆกับการฉีดได้เลย แล้วค่อยๆปรับปริมาณและความเร็วของน้ำให้มากขึ้น เพื่อชดเชยอุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากพลาสติกหลอมเหลว จนได้อุณหภูมิแม่พิมพ์คงที่ แต่ถ้าต้องการอุณหภูมิสูงจะต้องปิดน้ำไว้ก่อน หลังจากทำการฉีดไปได้สักระยะหนึ่งจนอุณหภูมิแม่พิมพ์สูงขึ้นตามที่ต้องการแล้วจึงค่อยเปิดน้ำให้ไหลผ่านแม่พิมพ์ แล้วทำการปรับปรมาณและความของน้ำจนได้อุณหภูมิแม่พิมพ์คงที่

2.3.3 เวลาในการฉีด

เวลาในการฉีดพลาสติกเหลวพิมพ์นั้นเราสามารถปรับตั้งค่าได้โดยตรงที่เครื่องฉีด ซึ่งการฉีดจริงจะสัมพันธ์กับความเร็วในการฉีดหรือการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของเกลียวหนอน และระยะทางของพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอน

2.3.4 เวลาในการฉีดย้ำรักษาความดัน

เวลาในช่วงนี้มีบทบาทมากต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีดพลาสิตก เพราะถ้าใช้เวลาในการฉีดย้ำเพื่อรักษาความดันนี้น้อยเกินไป ชิ้นงานก็จะเกิดรอยยุบที่ผิวได้ แต่ถ้าใช้นานเกินไปก็อาจเกิดความดันเค้นภายในเนื้อชิ้นงานได้

2.3.5 เวลาในการหล่อเย็น

เวลาในการหล่อเย็นที่เกิดขึ้นในการฉีดพลาสติกมีอยู่ 2 ช่วงคือ ช่วงแรกเป็นเวลาในการหล่อเย็นที่สามารถปรับตั้งกับเครื่องได้ ซึ่งเวลาในการฉีดแต่ละครั้ง เวลาในการหล่อเย็นที่ทำการปรับตั้งจะนานแค่ไหนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของชิ้นงานที่อยู่ในแม่พิมพ์ที่ต้องการหรือลดลงพอที่จะปลด

ชิ้นงานออกจากโพรงแบบโดยไม่เสียรูปทรง ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวแม่พิมพ์และความหนาชิ้นงาน ส่วนเวลาหล่อเย็นในส่วนที่สองเป็นเวลาหล่อเย็นทั้งวงจรคือ เป็นเวลาในการลดอุณหภูมิทั้งหมดของชิ้นงานตั้งแต่เริ่มฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ ทำการย้ำรักษาความดันและรวมกับเวลาในการหล่อเย็นที่ปรับตั้งจนกระทั่งแม่พิมพ์เริ่มเปิด

การหล่อเย็นสามารถแบ่งออกตามอัตราการการลดอุณหภูมิลงต่อหน่วยเวลาจากอุณหภูมิของพลาสติกเหลวไปสู่อุณหภูมิของชิ้นงานที่อยู่ในแม่พิมพ์หรืออุณหภูมิที่ผิวด้านในของแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นความเร็วในการหล่อเย็นที่สัมพันธ์กับเวลาในการหล่อเย็น แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

การหล่อเย็นเร็ว หมายถึง อัตราในการถ่ายเทความร้อนออกจากพลาสติกเหลวสู่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่อหน่วยมาก นั่นคือการใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำและอุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลวสูง

การหล่อเย็นช้า หมายถึง อัตราในการถ่ายเทความร้อนออกจากพลาสติกเหลวสู่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่อหน่วยน้อย ซึ่งใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงและอุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลวต่ำ ในขณะที่ใช้เวลาหล่อเย็นเท่าเดิม

ความเร็วในการหล่อเย็นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแม่พิมพ์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งการหล่อเย็นเร็วสามารถทำได้กับพลาสติกที่ไม่มีผลึก ส่วนการหล่อเย็นช้าจำเป็นต้องใช้กับพลาสติกที่มีผลึกเพื่อให้การเกาะผลึกเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ขนาดของผลึกที่ได้จะมีขนาดใหญ่และชิ้นงานจะมีความแข็งแรง ส่วนงานวิจัยนี้ใช้พลาสติกประเภทเอบีเอสซึ่งเป็นพลาสติกที่ไม่มีผลึก ส่วนการคำนวณเวลาในการหล่อเย็นจะอยู่ในส่วนของภาคผนวก

2.3.6 เวลาในการทำงานทั้งวงจร

เวลาในการทำงานทั้งวงจรเป็นเวลารวมที่ใช้ทั้งหมดตั้งแต่แม่พิมพ์เริ่มเคลื่อนที่เข้าและปิดจนกระทั่งเสร็จสิ้นการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เวลานี้ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับเวลาในการย้ำรักษาความดันและเวลาในการหล่อเย็นที่ปรับตั้ง การคิดคำนวณราคางานฉีดก็จะใช้เวลาในการทำงานทั้งวงจรนี้มาเป็นปัจจัยในการคำนวณตัวหนึ่งเช่นกัน

2.3.7 ความดันฉีด

ความดันฉีดเป็นความดันที่เกิดขึ้นกับพลาสติกที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอน โดยการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของเกลียวหนอน เนื่องจากความดันของน้ำมันไฮดรอลิกที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบไฮดรอลิก ความดันนี้เองที่เป็นตัวทำให้พลาสติกลหอมเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอนเคลื่อนที่เข้าไปในแม่พิมพ์และจะไหลเข้าเต็มแม่พิมพ์หรือไม่ก็ขึ้นอยู่กับความดันฉีดนี้เหมือนกัน ความดันนี้สามารถปรับได้โดยตรงที่เครื่องฉีดพลาสติก

2.3.8 ความดันฉีดย้ำ

ความดันฉีดย้ำเป็นความดันที่เกิดขึ้นกับพลาสติกหลมเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอนเหมือนกันความดันฉีดทุกประการ แต่แตกต่างกันที่ขนาดของความดันฉีดย้ำนี้จะน้อยกว่าโดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 30 – 70 เปอร์เซ็นต์ของความดันฉีด (ความดันของพลาสติกหลอวเหลวหน้าปลายเกลียวหนอนที่ปรับตั้ง) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกด้วย เช่น พลาสติกชนิดที่มีความหนิดสุงก็จะใช้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของความดันฉีด แต่ถ้าพลาสติกชนิดใดที่มีความหนืดต่ำจะใช้ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของความดันฉีด ความดันฉีดย้ำบางครั้งเรียกว่า ความดันฉีดจังหวะสอง ความดันนี้มีอิทธิพลต่อคุณภาพชิ้นงานโดยตรง เช่น การหดตัวของพลาสติก ความเค้นภายใน น้ำหนักชองชิ้นงานและการยุบตัวที่ผิวชิ้นงาน ด้วยเหตุนี้จึงต้องลเอกใช้ค่าความดันฉีดย้ำนี้ให้เหมาะสมด้วย

2.3.9 ความดันต้านการถอยหลังกลับของเกลียวหนอน

ความดันต้านการถอยหลังของเกลียวหนอนเป้นความดันที่เกิดขึ้นตรงตำแหน่งด้านท้ายของเกลียวหนอน เนื่องความดันของน้ำมันไฮดรอลิกเหมือนกับความดันฉีดและความดันฉีดย้ำ เพื่อต้านทานการถอยหลังกลับของเกลียวหนอนเนื่องจากความดันที่เกิดขึ้นของพลาสติกหลอมเหลวงที่อยู่ปลายเกลียวในจังหวะที่ทำการหลอมเหลวและป้อนพลาสติก ความดันเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยให้เกลียวหนอนถอยหลังกลับอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการหลอมเหลวและการผสมกันของวัสดุพลาสติก โดยเฉพาะที่ต้องมีสารผสมสี (Pigments) ลงไปด้วยแล้วจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีความดันนี้ช่วยเพื่อให้การกระจายตัวของสีเป็นไปอย่างวสม่ำเสมอ แต่ถ้าเป็นการฉีดที่ไม่ต้องการคุณภาพมากนักก็ไม่จำเป็นต้องใช้ความดันนี้ต่ำๆก็ได้ เพื่อให้การทำงานเร็วขึ้นหรือป้องกันไม่ให้พลาสติกหลอมเหลวไหลออกมาจากกระบอกฉีด ความดันนี้โดยปกติจะใช้ประมาณ 50 -150 บาร์ (ความดันด้านท้ายเกลียวหนอน) หรือ 5 -15 (ความดันไฮดรอลิก)

2.3.10 ความดันในแม่พิมพ์

ความดันในแม่พิมพ์เป็นความดันที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ เนื่องจากการไหลของพลาสติกเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์เนื่องจากความดันฉีด ความดันจะมีค่าสูงสุดเมื่อพลาสติกเริ่มเต็มแม่พิมพ์และจะเป็นตัวก่อให้เกิดแรงกระทำภายในแม่พิมพ์ทำให้แม่พิมพ์เผยอออกถ้ามีความดันภายในแม่พิมพ์มากเกินไปหรือแรงปิดแม่พิมพ์ไม่เพียงพอ

2.3.11 ความดันในการค้างหัวฉีดไว้ที่แม่พิมพ์

ความดันในการค้างหัวฉีดไว้ที่แม่พิมพ์นี้จะคอยต้านแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการฉีด ถ้าแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความดันนี้น้อยกว่าแรงที่เกิดขึ้นจากความดันฉีด พลาสติกหลอมเหลวจะมีโอกาสทะลักออกมาที่หัวฉีดได้แทนที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์

2.3.12 ความเร็วในการฉีด

ความเร็วในการฉีดเป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของเกลียวหนอนเพื่อดันพลาสติกหลอมเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอนให้ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ ต้นกำลังขับได้มาจากไฮดรอลิก ความเร็วในการฉีดจะเกิดควบคู่ไปกับความดันฉีดเพราะต้นกำลังขับมาจากจุดเดียวกัน ความเร็วในการแดจะเป้นตัวควบคุมความดันฉีด กล่าวคือถ้าเราใช้ความเร็วฉีดสูงขึ้นความดันฉีดก็จะสูงมากขึ้นตาม แต่จะไม่เกินค่าสูงสุดที่เราตั้งไว้ให้กับเครื่องฉีด เครื่องฉีดแบบเก่าจะมีอยู่ความเร็วเดียว แต่ถ้าเป็นเครื่องฉีดสมัยใหม่ความเร็วในการฉีดสามารถปรับตั้งได้มากกว่า 10 ขั้นความเร็ว ซึ่งจะช่วยแก้ไขปัญหาให้กับงานฉีดให้มากขึ้น จากเหตุผลดังกล่าวความเร็วฉีดจึงมีการกล่าวถึงมากกว่าความดันฉีด

2.3.13 ความเร็วในการปิด-เปิดแม่พิมพ์

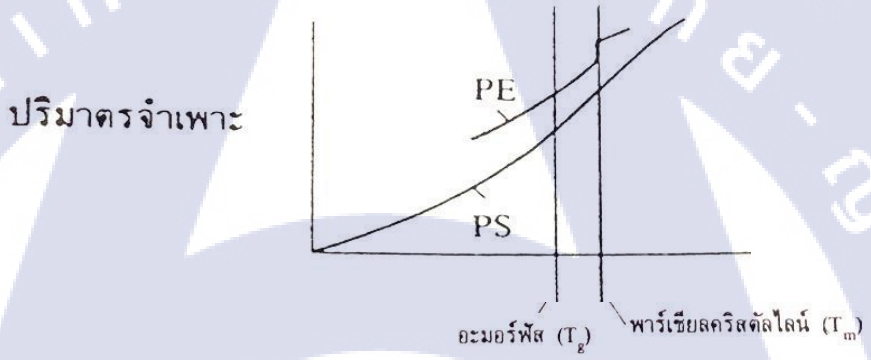
เวลาในการทำงานทั้งวงจรจะมากหรือน้อยบขึ้นอยู่กับความเร็วในการปิด-เปิดเหมือนกัน ความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์จะไม่ค่อยมีอิทธิพลมากนีกต่อแม่พิมพ์ (ยกเว้นแม่พิมพ์แบบใช้สลักเอียง) แต่จะมีผลต่อชิ้นงานฉีดคือ ในกรณีที่แม่พิมพ์ด้านอยู่กับที่เป็นเบ้าลึก การเปิดแม่พิมพ์จะต้องค่อยๆ เปิดมิฉะนั้นผิวชิ้นงานจะถูกครูดเป็นรอย ส่วนความเร็วในการปิดแม่พิมพ์ต้องคอยระวังอย่าให้สูงเกินไปเพราะแม่พิมพ์อาจจะถูกกระแทกกันได้ระหว่างปิดแม่พิมพ์ ทำให้แม่พิมพ์เสื่อมสภาพเร็วหรือเกิดการเสียหายได้ ความเร็วในการปิด-เปิดแม่พิมพ์ โดยทั่วไปจะมีอยู่ 3 ขั้นความเร็วสำหรับเครื่องฉีดแบบใหม่และมีช่วงป้องกันแม่พิมพ์ (Mold protection) ด้วย โดยช่วงนี้สามารถปรับตั้งค่าความเร็วในการเลื่อนปิดได้ ในกรณีที่ชิ้นงานเกิดค้างติดอยู่ที่แม่พิมพ์ โดยเฉพาะชิ้นงานพลาสติกที่แข็งซึ่งถ้าเราใช้ความเร็วในการเลื่อนแม่พิมพ์เข้าปิดสูงที่มีชิ้นงานแข็งค้างอยู่ แม่พิมพ์ทั้งสองฝั่งอาจเกิดความเสียหายได้ ด้วยเหตุนี้จึงควรใช้ความเร็วและช้าในขณะที่แม่พิมพ์เริ่มเปิดและปิดให้เหมาะสม

2.4 อิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อคุณสมบัติของชิ้นงานฉีดพลาสติก [6]

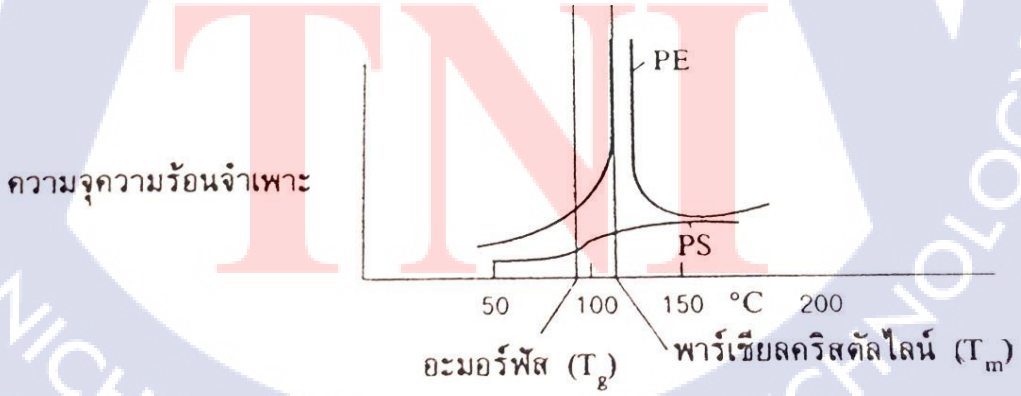
2.4.1 อิทธิพลของวัสดุพลาสติก

เนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่ที่ใช้ทำการฉีดจะเป็นกลุ่มของเทอร์โมพลาสติก ดังนั้นจึงขออธิบายเปรียบเทียบเฉพาะคุณสมบัติของพลาสติกประเภทอะมอร์ฟัสและพาร์เชียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติกเท่านั้น คุณสมบัติบางประการที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความร้อน ซึ่งปริมาตร

จำเพาะและพลังงานจำเพาะที่ใช้ของวัสดุประเภทพาร์เชียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติกจะมีค่ามากกว่าอะมอร์ฟัสเทอร์โมพลาสติก โดยที่จุด T_m ซึ่งเป็นจุดที่ส่วนที่เป็นผลึกเริ่มหลอมละลายออกค่าปริมาตรจำเพาะและพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนคุณสมบัติในการนำความร้อนและความจุความร้อนจำเพาะของพาร์เชียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติกก็ยังมีบทบาทมากเช่นเคย คือความสามารถในการนำความร้อนจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเข้าใกล้จุด T_m และจะเพิ่มขึ้นในทันทีทันใดที่จุดนี้ ส่วนค่าความจุความร้อนจำเพาะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้จุด T_m และจะเพิ่มขึ้นอย่างอย่างรวดเร็วที่จุดนี้ด้วย หลังจากสิ้นสุดช่วง T_m ค่านี้จะลดลงอย่างรวดเร็วด้วยเช่นกัน จะเห็นได้ว่าที่จุด T_m นี้ พลาสติกต้องการพลังงานความร้อนเพื่อช่วยในการหลอมละลายของผลึก ทำให้ความสามารถในการนำความร้อนลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ

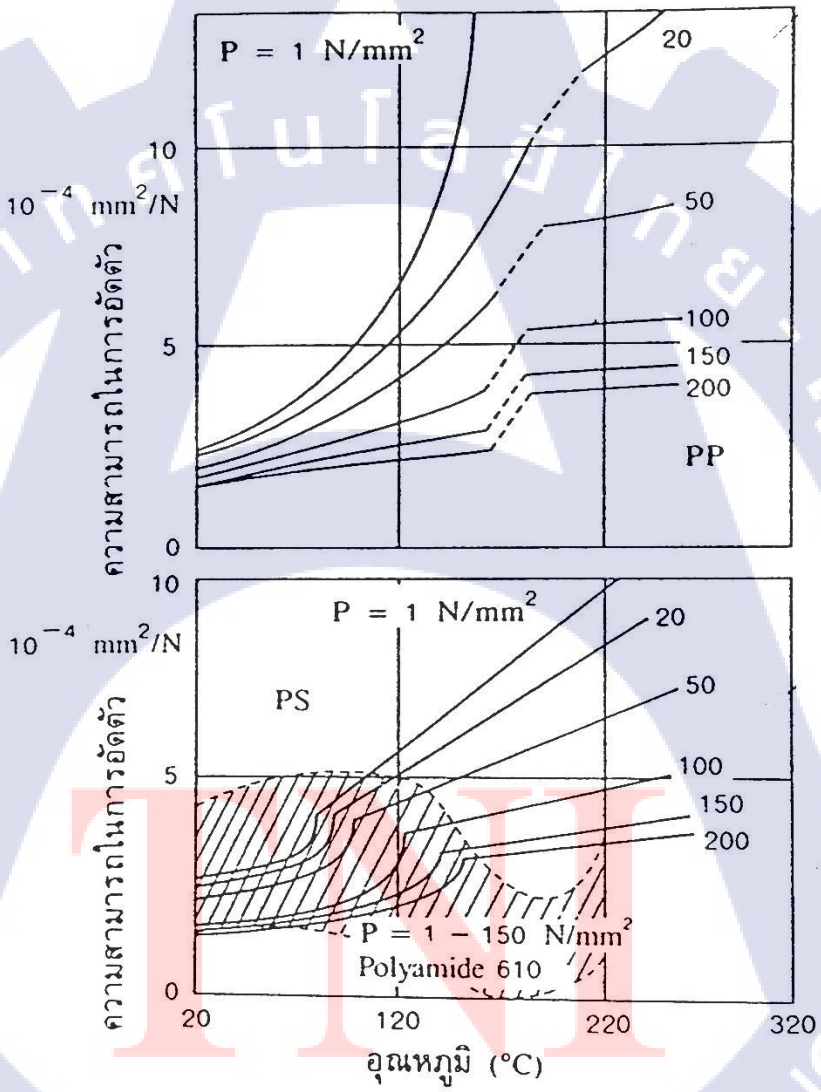


รูปที่ 2.4 ตัวอย่างคุณสมบัติของปริมาตรจำเพาะของอะมอร์ฟัสเทอร์โมพลาสติกและพาร์เชียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติก [6]



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างคุณสมบัติของความจุความร้อนจำเพาะของอะมอร์ฟัสเทอร์โมพลาสติกและพาร์เชียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติก [6]

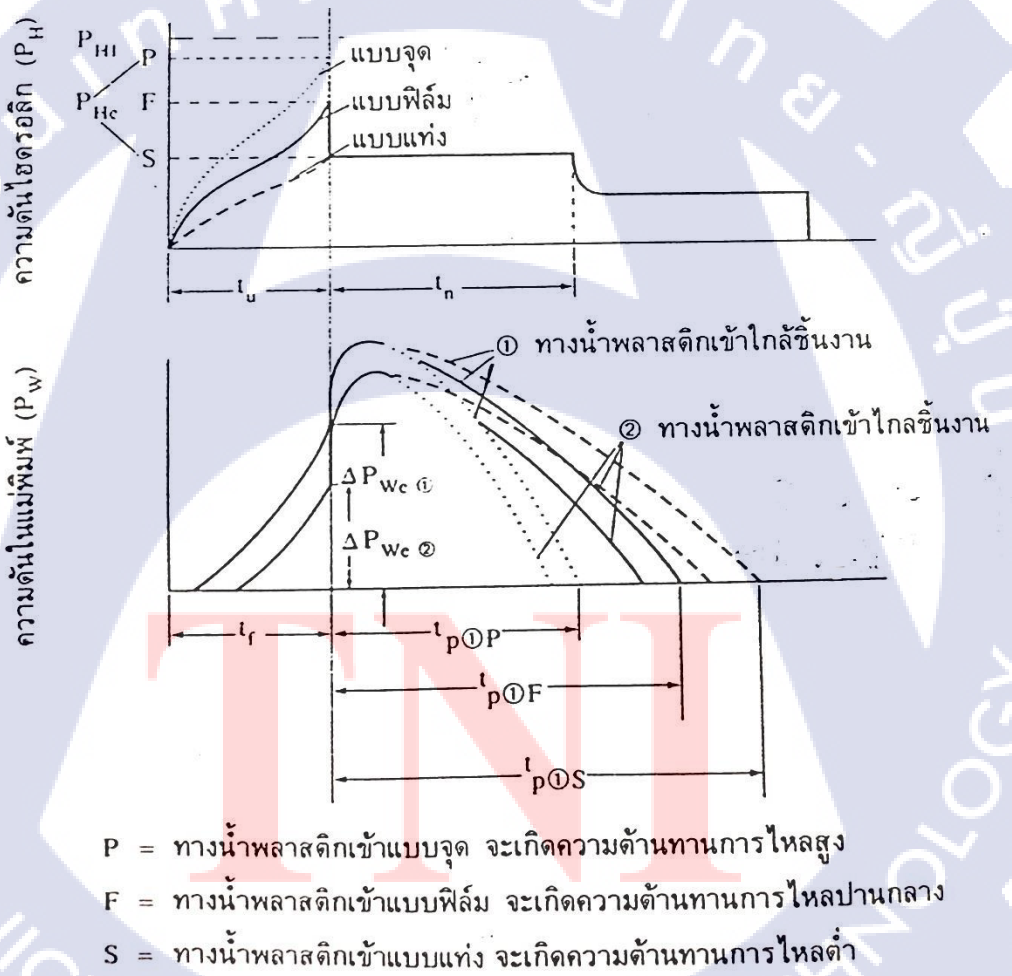
คุณสมบัติบางประการของเทอร์โมพลาสติกทั้งสองประเภทอาจจะไม่เด่นชัดในช่วงจังหวะฉีด เพราะต้องใช้เวลาในการให้ความดัน เช่น ความสามารถในการอัดตัวและความดันในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นในรูปที่ 2.6 ความสามารถในการอัดตัวของพาร์เชียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติกจะน้อยกว่าของอะมอร์ฟัสเทอร์โมพลาสติก เพราะว่าปริมาตรจำเพาะที่เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนมีค่ามากกว่าแต่ความดันในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นจะอยู่นานกว่า



รูปที่ 2.6 ความสามารถในการอัดตัวของพลาสติกเนื่องจากอุณหภูมิและความร้อน [6]

2.4.2 อิทธิพลของระบบทางน้ำพลาสติก

ลักษณะและรูปร่างของรูเข้าของน้ำพลาสติกหลอมเหลว (Gate) ตลอดจนระยะทางวิ่งของน้ำพลาสติกหลอมเหลว (Runner) ก็มีผลกระทบต่อคุณภาพชิ้นงานฉีดเช่นกัน ซึ่งสามารถดูได้จากค่าความดันในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากความต้านทานการไหลของพลาสติกในระบบแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าลักษณธของรูเข้าพลาสติกเป็นแบบจุด (Point gate) จะเกิดความดันของระบบสูงกว่าแบบฟิล์ม (Film gate) และแบบแท่ง (Pin gate) หขตามลำดับ ซึ่งใช้ความดันและความดันในการฉีดคงที่ ส่วนทางวิ่งของน้ำพลาสติกที่ใกล้กับตัวชิ้นงานจะให้ความดันในแม่พิมพ์ที่สูงกว่าเนื่องจากการต้านทานการไหลของพลาสติกมีน้อยกว่า แต่การไหลตัวไม่ดีของพลาสติกหลอมเหลวสามารถเพิ่มได้จากการเพิ่มความดันและความเร็วในการฉีดให้สูงขึ้นได้



P = ทางน้ำพลาสติกเข้าแบบจุด จะเกิดความต้านทานการไหลสูง

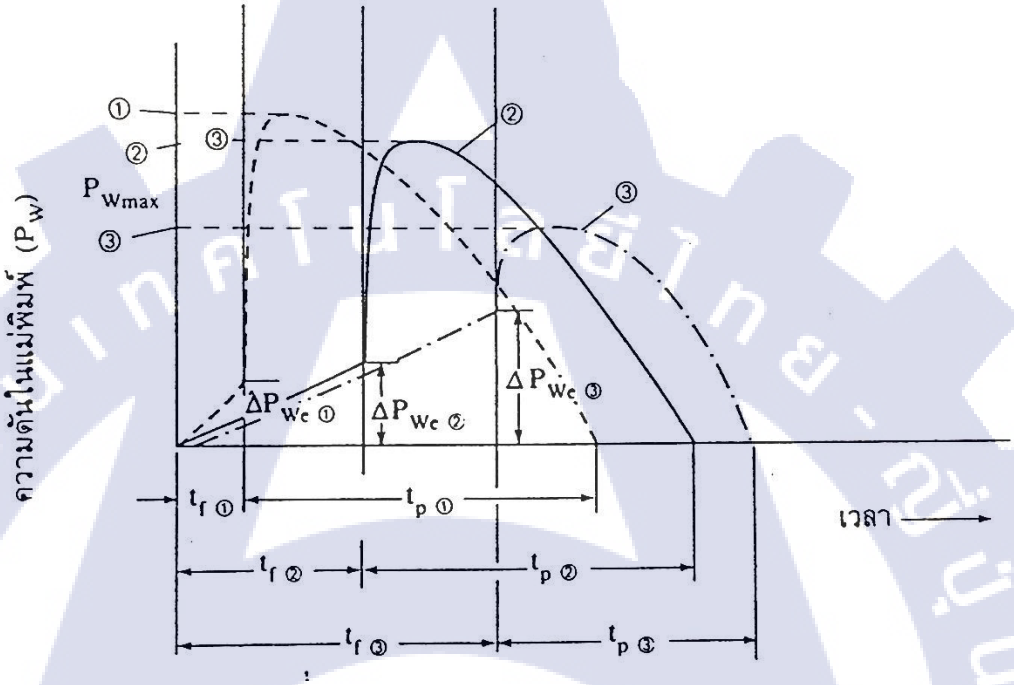
F = ทางน้ำพลาสติกเข้าแบบฟิล์ม จะเกิดความต้านทานการไหลปานกลาง

S = ทางน้ำพลาสติกเข้าแบบแท่ง จะเกิดความต้านทานการไหลต่ำ

รูปที่ 2.7 อิทธิพลของระบบทางวิ่งของพลาสติกหลอมเหลวที่มีผลต่อความดันในแม่พิมพ์ [6]

2.4.3 อิทธิพลของความเร็วในการฉีด

ความเร็วในการฉีดจะอิทธิพลมากต่อความดันในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.8 ถ้าความเร็วในการฉีดสูงขึ้น ความดันที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ก็จะสูงขึ้นตามและใช้เวลาในการสร้างความดันเร็วกว่าด้วย เนื่องมาจากพลาสติกหลอมเหลวถูกเติมในแม่พิมพ์ในระยะเวลาที่สั้นกว่า

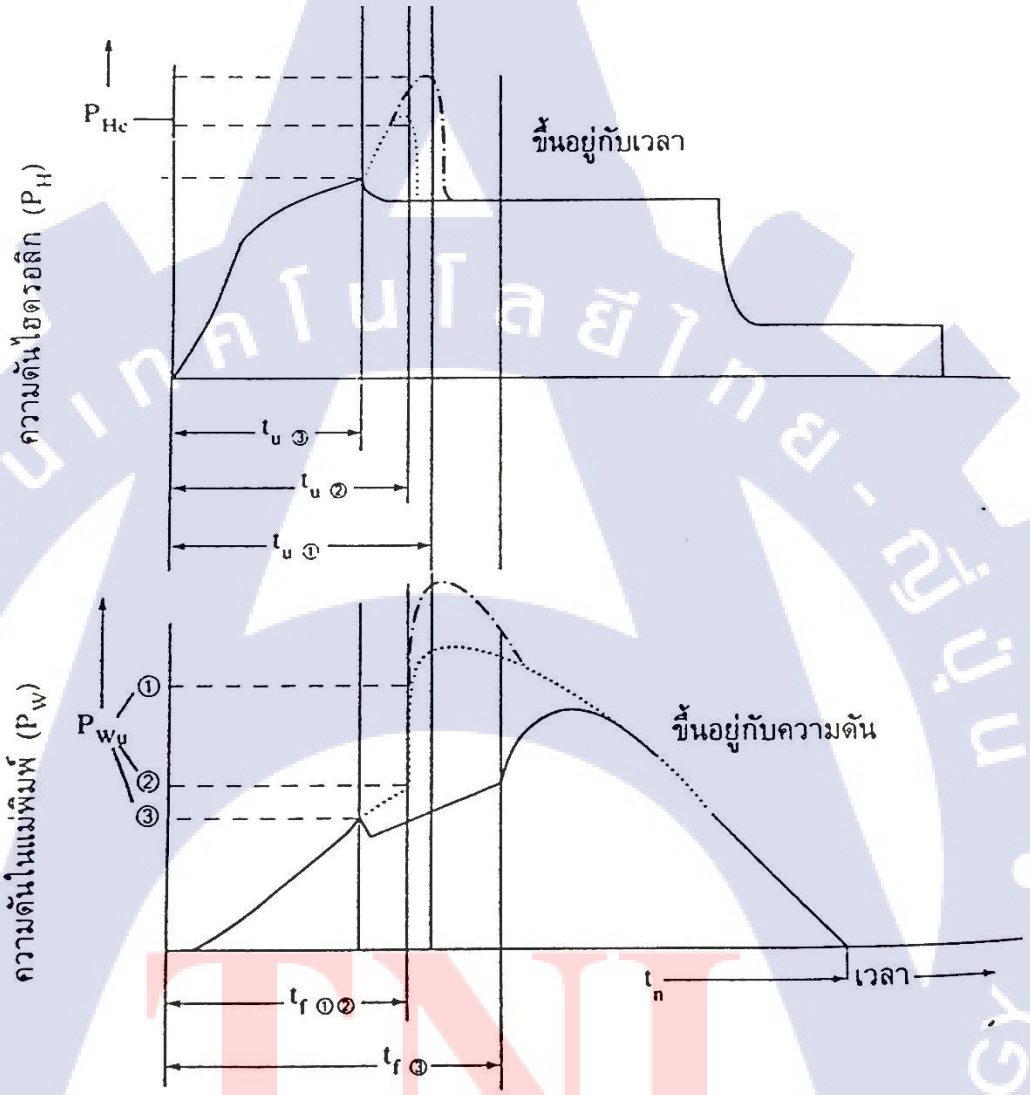


รูปที่ 2.8 อิทธิพลของความเร็วในการฉีด [6]

2.4.4 อิทธิพลของการสับเปลี่ยนจากจังหวะฉีดเข้าสู่จังหวะรักษาความดัน

การสับเปลี่ยนจังหวะนี้อาจจะถือเอาเวลาในการฉีด ระยะทางในการฉีดและความดันในแม่พิมพ์ในการฉีดเป็นตัวกำหนดว่าจะเริ่มทำการฉีดย้ำรักษาความดัน แต่ความเป็นจริงแล้วทั้งเวลาระยะทางและความดันนั้นใช้ร่วมกัน เพียงแต่ว่าจะยึดถือตัวใดเป็นตัวหลักในการทำงาน ซึ่งเครื่องสมัยเก่าจะนิยมใช้ระยะทางเป็นหลัก (ปริมาณเนื้อพลาสติกที่ใช้ในจังหวะฉีด) หรือจะเหลือปริมาณเนื้อพลาสติกเอาไว้รักษาความดันเท่าไร โดยสามารถตั้งเวลาและความดันในการฉีดได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าตั้งเวลาในการฉีดน้อย เกลียวหนอนอาจจะเคลื่อนที่ไม่ได้ตามแนวแกนในระยะที่กำหนด เกลียวหนอนจะหยุดแช่อยู่ตรงระยะทางทำให้เครื่องหยุดทำงาน ดังนั้นจึงต้องเพิ่มเวลาฉีดให้มากขึ้น แต่ถ้าใช้เวลาในการฉีดมาก เกลียวหนอนก็จะหยุดแช่ตรงที่ระยะทางที่กำหนดนานขึ้น ทำให้เสียรอบเวลาในการฉีด ด้วยเหตุนี้เครื่องฉีดสมัยใหม่จึงใช้ทั้งเวลาและระยะทางในการฉีดเป็นตัวกำหนดแทน นั่นก็คือความเร็ว

ในการฉีด (ระยะทาง/เวลา) ขึ้นอยู่กับความดันไฮดรอลิกด้วย ถ้าใช้ความเร็วฉีดสูง ความดันที่ใช้ฉีดจะสูงตามไปด้วย ซึ่งตัวอย่างอิทธิพลของการสับเปลี่ยนจากจังหวะฉีดเข้าสู่จังหวะรักษาความดัน แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 อิทธิพลของการสับเปลี่ยนจากจังหวะฉีดเข้าสู่จังหวะรักษาความดัน [6]

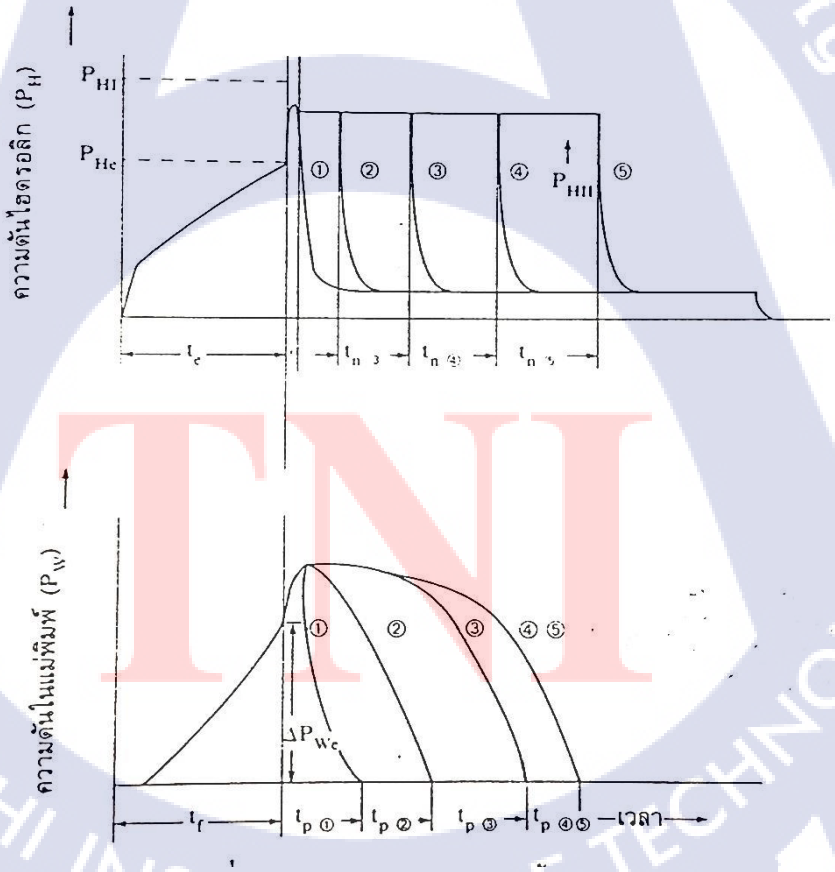
กรณีที่ 1 การสับเปลี่ยนช้า เนื่องจากระยะทางในการฉีดมาก เวลาที่ใช้จึงต้องนานขึ้น ความดันก็จำเป็นต้องใช้สูงขึ้นและความดันในแม่พิมพ์ก็มีโอกาสเกิดสูงขึ้นตาม จึงควรระวังการฉีดเกินซึ่งทำให้ชิ้นงานเกิดครีบได้

กรณีที่ 2 การสับเปลี่ยนค่อนข้างเร็ว คือจะสับเปลี่ยนเข้าสู่จังหวะฉีดย้ำรักษาความดันทันทีที่พลาสติกเต็มในโพรงแม่พิมพ์ ความดันในแม่พิมพ์จึงไม่สูงเกินไป

กรณีที่ 3 การสับเปลี่ยนเร็วเกินไปทำให้ความดันในแม่พิมพ์ต่ำเกินไปจนพลาสติกไม่เต็มแม่พิมพ์ในจังหวะฉีด

2.4.5 อิทธิพลของเวลาในการฉีดย้ำรักษาความดัน

การเป็นไปของความดันในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นในช่วงจังหวะฉีดย้ำรักษาความดันมีอิทธิพลต่อคุณภาพชิ้นงานฉีด โดยเฉพาะความเที่ยงตรงของขนาดของชิ้นงาน ส่วนเวลานี้ถ้าน้อยเกินไปความดันในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นก็คงคงสภาพอยู่ไม่นานพอที่จะทำให้เนื้อพลาสติกแน่นเต็มในแม่พิมพ์ แต่ถ้านานเกินไปความดันในแม่พิมพ์จะอยู่นานเกินไปทำให้พลาสติกถูกอัดแน่นเป็นเวลานานจนอาจเกิดความเสียหายแก่ชิ้นงานและอายุของแม่พิมพ์อีกด้วย ลักษณะของความดันในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นในช่วงจังหวะของการใช้เวลาในการย้ำรักษาความดันสามารถดูได้จากรูปที่ 2.10 ซึ่งเวลาที่เหมาะสมคือเวลาที่ $t_{n,④}$



รูปที่ 2.10 อิทธิพลของเวลาในการรักษาความดัน [6]

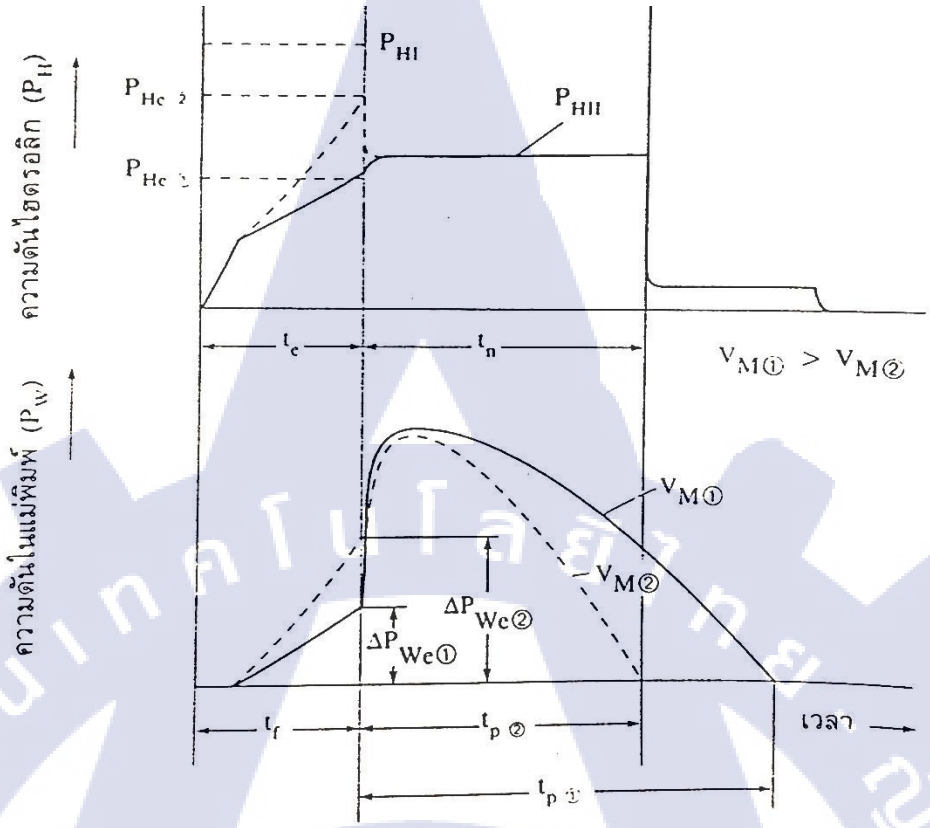
2.4.5 อิทธิพลของเวลาในการฉีดย้ำรักษาความดัน

เวลาในการหล่อเย็นไม่มีอิทธิพลต่อความดันในแม่พิมพ์ แต่จะมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิของชิ้นงานที่อยู่ในแม่พิมพ์ เพราะถ้าใช้เวลาในการหล่อเย็นน้อยเกินไปอุณหภูมิของชิ้นงานในแม่พิมพ์จะยังไม่ต่ำพอที่จะปลดออกจากแม่พิมพ์ได้ เพราะถ้าทำการปลดออกจากแม่พิมพ์ก็จะทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายได้ และถ้าใช้เวลาในการหล่อเย็นมากเกินไป เวลาในการทำงานทั้งวงจรก็จะมากเกินความจำเป็น ดังนั้นจึงใช้วิธีคำนวณหาเวลาในการหล่อเย็นช่วยแล้วปรับแต่งเวลานี้อีกเล็กน้อยเพื่อให้เหมาะสมกับการทำงานจริงในทางปฏิบัติ ซึ่งการคำนวณเวลาในการหล่อเย็นจะอยู่ในส่วนของภาคผนวก

2.4.6 อิทธิพลของอุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว

เมื่ออุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลวเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้คุณสมบัติของพลาสติกเปลี่ยนไปด้วย เช่น ความหนืด เอนทัลปี ปริมาตรจำเพาะ กล่าวคือถ้าอุณหภูมิพลาสติกเหลวเพิ่มขึ้นความหนืดก็จะลดลง นั่นก็หมายถึงในช่วงจังหวะฉีดสามารถใช้ความดันที่ต่ำลงมาเล็กน้อยได้ โดยยังใช้ความเร็วในการฉีดเท่าเดิม เพราะว่าพลาสติกเหลวไหลได้ดีและทำให้ความดันที่ใช้ฉีดเติมเข้าแม่พิมพ์ต่ำลงได้อีกด้วย รูปที่ 2.11 ตลอดทั้งความดันในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นในช่วงจังหวะฉีดย้ำรักษาความดันก็จะดีขึ้นด้วย คือความดันสูงขึ้นและเกิดขึ้นเป็นเวลาที่ยาวนานกว่าการใช้อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลวต่ำ

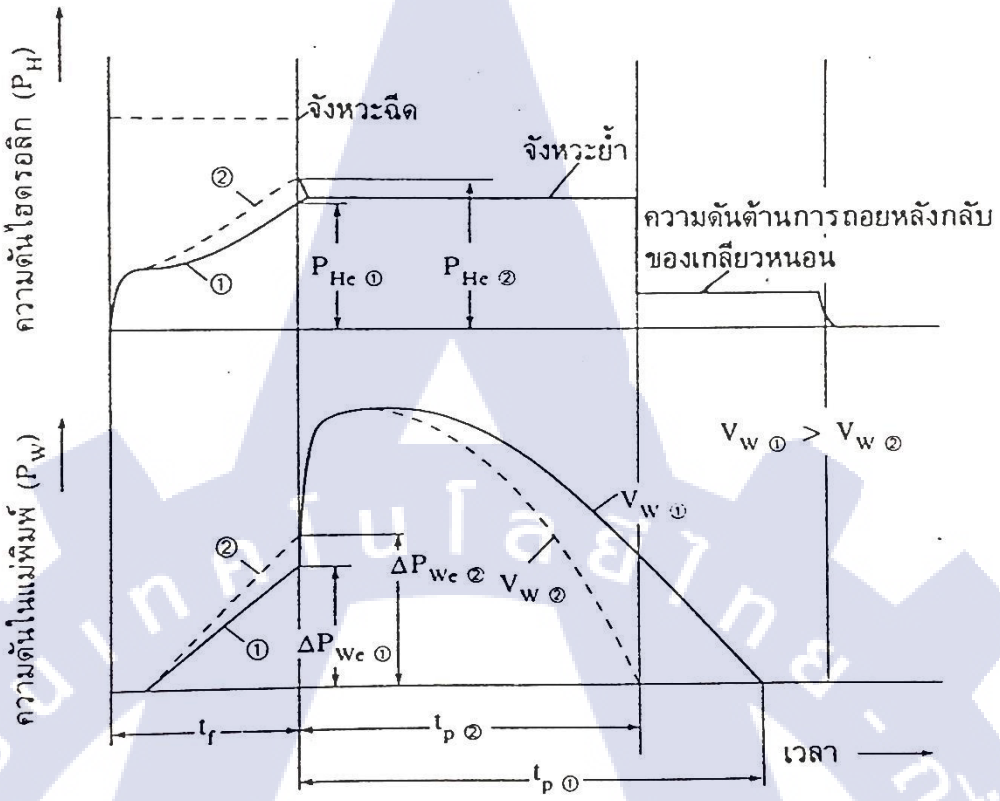
นอกจากนี้เส้นโค้งการเย็นตัวของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย รวมทั้งเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นก็จะเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะถ้าใช้อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลวสูงเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นก็จะนานขึ้น



รูปที่ 2.11 อิทธิพลของอุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลวที่มีต่อความดันในแม่พิมพ์ [6]

<u>2.4.7 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์</u>

การเปลี่ยนแปลงไปของอุณหภูมิแม่พิมพ์จะมีอิทธิพลต่อความดันในแม่พิมพ์คล้ายกับอิทธิพลของอุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว กล่าวคือในระหว่างจังหวะการฉีด ความหนืดของพลาสติกเหลวที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากอุณหภูมิของแม่พิมพ์จะไม่ค่อยมีผลกระทบต่อชิ้นงานที่มีความหนา แต่จะกระทบต่อชิ้นงานที่บางและมีระยะทางในการไหลของพลาสติกที่ยาว และเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ต่ำ ความดันที่เกิดขึ้นในจังหวะฉีดเพื่อเติมพลาสติกเหลวเข้าจนเต็มในแม่พิมพ์ก็จะสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และเส้นโค้งแสดงความดันในแม่พิมพ์ก็จะเกิดขึ้นเป็นเวลาที่สั้นลง

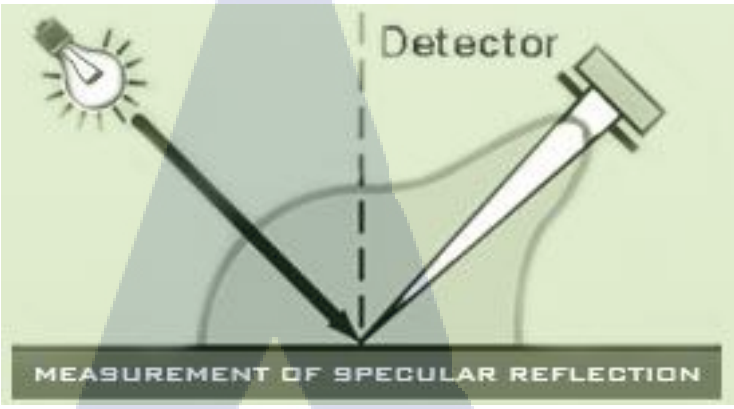


รูปที่ 2.12 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความดัน [6]

2.5 หลักการของเครื่องวัดความมันเงา

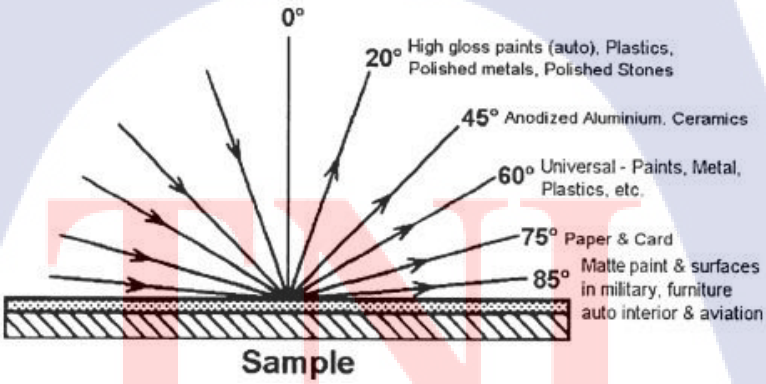
เครื่องวัดความมันเงา (Gloss Meter) คือ เครื่องวัดคุณสมบัติการสะท้อนแสงบนพื้นผิวของวัตถุ วัตถุที่ใช้ทดสอบมีหลากหลายประเภทซึ่งมีคุณลักษณะที่แตกต่างกันเช่น อโลหะ (Non-metal) มีคุณสมบัติการสะท้อนมากเมื่อมุมในการวัดมาก ๆ (วัดจากเส้นตั้งฉากวัตถุ) หรือ โลหะ (Metal) มีคุณสมบัติการสะท้อนแสงได้มากที่มุมเล็ก ๆ เห็นได้ว่าวิธีการวัดความมันเงาจึงมีมุมที่แตกต่างกันไปตามประเภทวัตถุทดสอบการประยุกต์ใช้งานของเครื่องวัดความมันเงาที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการควบคุมคุณภาพสินค้าในภาคอุตสาหกรรมเช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

ส่วนประกอบของเครื่องวัดความมันเงาโดยทั่วไปแล้ว เครื่องวัดความมันเงา จะมีส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 2.13 ได้แก่ 1. หลอดไฟ (Lamp) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงฉายลงบนผิวทดสอบ โดยแสงจากหลอดไฟนั้นต้องผ่านเลนส์ 2 ชั้นเพื่อควบคุมลักษณะแสงที่ตกกระทบผิวทดสอบให้เป็นเส้นขนาน 2. Filter Detector ทำหน้าที่ตรวจวัดแสงที่สะท้อนจากผิวชิ้นงาน



รูปที่ 2.13 หลักการของการวัดความมันเงา [7]

หน่วยการวัดความมันเงาจะใช้สัญลักษณ์ GU (Gloss Unit) ในอุตสาหกรรมมีที่วัดความเงาในช่วง 0-100 GU ได้แก่ อุตสาหกรรมพลาสติกเคลือบสี (Non-metallic Coating) ส่วนอุตสาหกรรมที่วัดความเงาวัสดุที่มีความเงาสูงกว่าเช่น กระจกเงา ต้องใช้เครื่องวัดที่มีย่านการวัดความเงาสูงถึง 2000 GU หากวัสดุที่มีความเงาสูงกว่า 2000 GU เช่น วัสดุโปร่งใส จะไม่ใช้หน่วยวัด GU แต่จะใช้เป็น ค่าเปอร์เซ็นต์ของแสงที่ตกกระทบ ซึ่งแต่ละมุมองศาจะสามารถใช้วัดความมันเงาตามคุณสมบัติของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 มุมที่ใช้วัดความเงา (*Gloss* angle) [7]

จากรูปที่ 2.14 มุมที่ใช้วัดความเงาโดยทั่วไปแล้วมีอยู่ 3 มุม คือ 20° , 60° และ 85° ซึ่งการใช้งานที่แตกต่างกันไปตามความสามารถในการสะท้อนแสงของวัตถุ โดยมุมขนาดเล็ก 20° จะใช้วัดชิ้นงานที่มีความมันสูงหรือชิ้นงานเคลือบสีหรือขัดมาเป็นอย่างดี ส่วนใหญ่จะมีค่าความมันเงาอยู่ที่มากกว่า 70 GU ส่วนชิ้นงานที่มีความมันเงาต่ำจะใช้มุมวัดที่ใหญ่ขึ้นที่ 85° ค่าความมันเงาอยู่ต่ำกว่า

10 GU ซึ่งหมายความว่าแสงสามารถลอดผ่านได้น้อยจึงต้องทำให้มุมกว้างขึ้น ส่วนมุมวัดขนาด 45° จะใช้วัดชิ้นงานประเภทเซรามิคหนัก สิ่งทอหรืออลูมิเนียมและมุม 75° จะใช้วัดในชิ้นงานประเภทกระดาษหรือสิ่งพิมพ์ต่างๆ

ในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับความมันเงาของชิ้นส่วนพลาสติก โดยศึกษาระดับของความมันเงาที่แตกต่างกันจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดที่รองรับมุมวัดที่หลากหลายด้วย จากการศึกษาพบว่าเครื่องวัดความมันเงาชองชิ้นงานมาตรฐาน ASTM: D523 มีความสามารถเพียงพอที่จะวัดชิ้นงานที่มุม 20°, 60° และ 85° ซึ่งเหมาะสมกับชิ้นงานพลาสติกฉีดหรือพลาสติกพ่นสี ซึ่งสามารถวัดได้พร้อมกัน 3 มุมได้ในเวลาเดียวกัน

2.6 การออกแบบทดลอง (Design of Experiment, DOE**)**

การออกแบบการทดลองเป็นเทคนิคทางสถิติชั้นสูงที่ใช้ในการปรับสภาวะของกระบวนการเพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่เราต้องการซึ่งข้อแตกต่างระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคการออกแบบการทดลองคือ การลองผิดลองถูกหรือการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One-Factor-at-a-Time, OFAT) ส่วนใหญ่จะอาศัยความชำนาญในทางปฏิบัติมากกว่าซึ่งสำหรับผู้ที่ไม่มีประสบการณ์จะทำให้ได้ผลตอบสนองที่เข้าจุดค่าเป้าหมายได้อย่างช้ามากและสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์รวมถึงยังต้องเก็บข้อมูลจำนวนมาก อีกทั้งยังไม่เหมาะกับกระบวนการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหลายตัวด้วย

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบวิธีพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งจะมีขั้นตอนการออกแบบโดยเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัย เพื่อมากำหนดลักษณะเฉพาะทางของความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระต่างๆ ตรวจสอบว่ามีความลู่เข้าการตอบสนองเพื่อความแม่นยำของระบบร่วมกับการออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตเพื่อลดจำนวนตัวอย่างในการทดลอง โดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการตัดสินความถูกต้องซึ่งสามารถบอกได้ว่าปัจจัยมีผลต่อความมันเงาของการฉีดพลาสติก

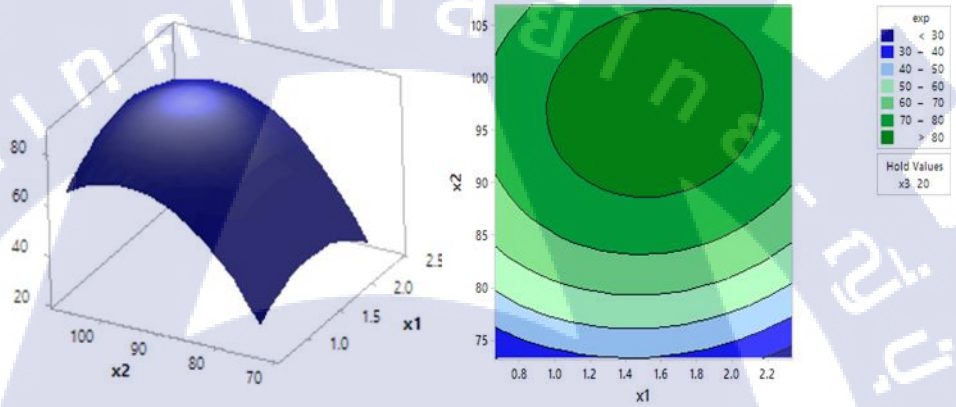
<u>2.6.1 วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)</u>

วิธีพื้นผิวตอบสนอง เป็นวิธีการรวบรวมเอาหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติมาสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหา โดยผลตอบสนองที่เราสนใจจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งผู้ทดลองมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการตอบสนอง ยกตัวอย่างสำหรับตัวแปรตามของผลตอบสนอง y เป็นฟังก์ชั่นของตัวแปรต้น x_1 และ x_2 จะสามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ดังสมการที่ 9 ดังนี้

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \tag{9}$$

โดยที่ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนอง y ที่มีผลมาจากการทดลอง

โดยส่วนมากแล้วจะแสดงผลตอบสนองของพื้นผิวเป็นรูปกราฟฟิกโดยที่สมการผลตอบสนอง y จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อให้แสดงเห็นถึงรูปร่างของพื้นผิวตอบสนอง (Surface Plot) ให้เข้าใจได้ง่ายจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) โดยการฉายภาพ แบบ Top view ลงมาที่พื้นระนาบดังแสดงในรูป 2-5 ในการสร้างเส้นโครงร่างนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบสนองคงที่จะถูกวาดบนระนาบ x_1 และ x_2 โดยแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวตอบสนองทีเท่ากันค่าหนึ่ง



รูปที่ 2.15 รูปพื้นผิวตอบสนอง (ด้านซ้าย) และเส้นโครงร่าง (ด้านขวา) ของสมการพื้นผิวตอบสนอง

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวตอบสนองโดยส่วนมากจะไม่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองและตัวแปรอิสระหลายตัว เนื่องจากตัวแปรไม่ได้มีเพียงหนึ่งถึงสองตัวที่เกี่ยวข้องกัน ดังนั้นขั้นแรกเราจำเป็นต้องหาตัวประมาณการที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนเบื้องต้นสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างผลตอบสนอง y และตัวแปรอิสระ x_1 , x_2 ,x_3 , ... , x_n ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์พหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ภายใต้ที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์บางส่วนของตัวแปรอิสระ x ถ้าแบบจำลองของผลตอบสนองเป็นรูปแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ก็จะสามารถประมาณค่าได้ไม่ยาก เนื่องจากไม่มีความสัมพันธ์ที่ทับซ้อนกันระหว่างตัวแปรอิสระด้วยกัน สำหรับแบบจำลองพหุนามกำลังหนึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 10

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \varepsilon \tag{10}$$

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เชิงเส้นหรือรูปแบบกราฟมีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบฟังก์ชั่นพหุนามที่ใช้จะมีอันดับที่สูงขึ้น เพื่อให้แบบจำลองได้รูปทรงใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น สมการที่ 11 แสดงสมการพหุนามอันดับสอง

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{k} \beta_{ij}\, x_i x_j + \varepsilon \qquad (11)$$

โดยที่ β_0 คือ ค่าสัมประสิทธ์สมการอนุพันธ์

x_i คือ ค่าแทนของตัวแปรอิสระ i

x_j คือ ค่าแทนของตัวแปรอิสระ j

β_i คือ ค่าสัมประสิทธ์ความสัมพันธ์หลักอันดับหนึ่งของตัวแปร i

β_{ii} คือ ค่าสัมประสิทธ์ความสัมพันธ์หลักอันดับสองของตัวแปร i

β_{ij} คือ ค่าสัมประสิทธ์ความสัมพันธ์ร่วมของตัวแปร i *และ* j

k คือ จำนวนตัวแปรอิสระ

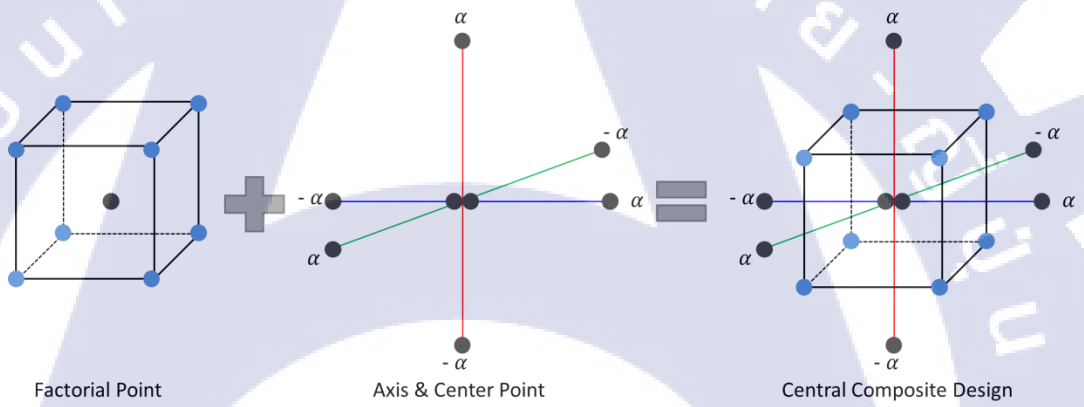
สมการปัญหาพื้นผิวส่วนมากจะใช้แบบจำลองอันดับที่หนึ่งและสอง แต่ถ้าพื้นผิวตอบสนองที่สนใจมีขนาดใหญ่มากขึ้น จำเป็นต้องใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์มาช่วยคำนวณสำหรับอันดับที่สูงขึ้น ในการวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม Minitab เข้ามาเพื่อช่วยในการคำนวณ

2.6.2 การออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite Design, CCD)

การออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตเป็นการออกแบบการทดลองโดยแบ่งระดับออกเป็น 3 ระดับในแต่ละตำแหน่งแบ่งได้เป็น -1 , 0 , 1 เพื่อที่จะศึกษาในตัวแปรอิสระต่างๆ แทนที่จะปรับตัวแปรที่จะศึกษาไปจนครบแบบของแบบจำลองแฟกทอเรียลเต็ม (Full Factorial Model) หรือใช้ตัวอย่างทั้งหมด 3^n ตัวอย่าง ซึ่งถ้าศึกษาตัวแปรทั้งหมด 3 ตัวแปร จะใช้ตัวอย่างทั้งสิ้น $3^3 = 27$ ตัวอย่าง ถ้าศึกษาตัวแปร 4 ตัว ก็ต้องใช้ $3^4 = 81$ ตัวอย่าง และหากต้องการศึกษา 5 ตัวแปรก็ต้องใช้ทั้งสิ้น $3^5 = 243$ ตัวอย่าง แนวทางของการทดลองจำนวนมากนี้ไม่เหมาะสมต่อการดำเนินการในแนวอุตสาหกรรมซึ่งทำให้เสียเวลาการผลิต ทรัพยากรที่ใช้รวมถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น ทางออกของปัญหาที่มีตัวอย่างการทดลองจำนวนมากนี้จะน้อยลงหากใช้เลือกบางตัวอย่างหรือบางสภาวะการทดลองที่จำเป็นเท่านั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการทดลองสร้างแบบจำลองทางสถิติที่ได้จะยังคงมีทั้งความสัมพันธ์ของตัวแปรหลัก (Main Effect) ความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกัน (Interaction Effect) และ

ความสัมพันธ์แบบกำลังสองหรือรูปแบบที่มีส่วนโค้ง (Quadratic Terms) โดยใช้ทรัพยากรไม่มากจนเกินไป

สำหรับการศึกษาการออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตโดยมีตัวแปรอิสระทั้งหมด 3 ตัวแปรจะประกอบไปด้วย 3 ส่วน ได้แก่ 1. จุดแฟกทอเรียล (Factorial Points) เป็นการนำปัจจัยระดับสองแบบแฟกทอเรียลเต็ม (Two-Level Full Factorial) มาเป็นส่วนหนึ่งของการทดลอง (2^3 = 8 ตัวอย่าง) 2. จุดแกน (Axial Points) เป็นการปรับค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งในขณะที่ค่าตัวแปรอื่นๆ มีตำแหน่งอยู่ที่ค่ากลาง (หรือค่า 0) และ 3. จุดกึ่งกลาง (Center Points) เป็นการปรับค่าของตัวแปรที่ค่ากลาง (หรือค่า 0) ดังแสดงรูปที่ 2-6 โดยค่า α คือ ระยะจากจุดแฟกทอเรียลไปยังจุดกึ่งกลาง และค่า α = 1.68 คือ ระยะจากจุดแกนไปยังจุดกึ่งกลางของการศึกษาทั้งหมด 3 ตัวแปร ของแต่ละตัวแปรที่กำหนดไว้จากตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.16 การออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตสำหรับตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร

ตารางที่ 2.1 จำนวนของตัวอย่างและตำแหน่งต่างๆที่ขึ้นกับจำนวนตัวแปรอิสระ [8]

	Point	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
CCD	Factorial points (2^n)	4	8	16	32
	Star points (*2n*)	4	6	8	10
	Center points(varies)	5	5	6	6
	Total	13	19	30	48
Choice of α	Spherical design ($\alpha = \sqrt{k}$)	1.4	1.73	2	2.24
	Rotatable design ($\alpha = \left(n_f^{\frac{1}{4}}\right)$)	1.4	1.68	2	2.38

2.7 แบบจำลองการไหลในกระบวนการฉีดพลาสติก

ในช่วงทศรรวษที่ผ่านมาการเข้ามาของคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบและวิเคราะห์ในทางวิศวกรรมของกระบวนการผลิตของแม่พิมพ์และขั้นตอนการฉีดพลาสติก สามารถทำนายคุณภาพของชิ้นงานก่อนการฉีดจริงและป้องกันปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในระหว่างการผลิตตั้งแต่การออกแบบแม่พิมพ์ การนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบและวิเคราะห์ในทางวิศวกรรมเข้ามาใช้งานยังช่วยให้ลดเวลาการทำงาน ลดค่าใช้จ่ายและสามารถปรับตั้งค่าที่เหมาะสมที่สุดทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ ในงานวิจัยนี้โปรแกรมที่นำมาใช้จะใช้โปรแกรม Moldex3D R14 ในการจำลองอุณหภูมิต่างๆ ที่ผิวของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกฝั่งคาวิตี้เปรียบเทียบกับชิ้นงานจริง แล้วสรุปผลออกมาเป็นค่าความผิดพลาดเพื่อใช้ในการกำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์พื้นฐานในการปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติกสำหรับงานวิจัยถัดไป

สำหรับโปรแกรม Moldex3D R14 เป็นโปรแกรมที่จำลองรูปแบบการไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์เพื่อช่วยในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในโปรแกรมก่อนฉีดจริงอาทิเช่น การเติมเนื้อพลาสติก ความดัน ความดันย้ำ เวลาการหล่อเย็น เป็นต้น สำหรับการลดเวลาในการตั้งค่าที่เครื่องฉีดพลาสติกจริงอีกครั้ง ในส่วนนี้จะสามารถจำลองการไหลของชิ้นงานและตรวจสอบว่าพลาสติกหลอมเหลวไหลเต็มแม่พิมพ์หรือไม่ ตรวจสอบตำแหน่งรอยเชื่อมที่เกิดขึ้น และอุณหภูมิที่จุดต่างๆขณะฉีด ดังนี้แสดงในรูปที่ 2.17

รูปที่ 2.17 การจำลองการไหลของพลาสติกในโปรแกรม *Moldex3D R*14 [9]

2.8 การทบทวนวรรณกรรม

การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้ทำการหาข้อมูลในฐานข้อมูลมาตรฐานต่างๆอาทิเช่น www.sciencedirect.com และบทความต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานแม่พิมพ์พลาสติก เทคนิคการผลิตของการฉีดพลาสติก เป็นต้น โดยได้พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้ ดังสรุปในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลำดับที่	ผู้เขียน	ปีที่ตีพิมพ์	หัวข้องานวิจัยที่นำเสนอ
1	D. Eric *et al.* [10]	1999	ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องฉีดพลาสติกที่ส่งผลต่อสีและความมันเงา
2	L. Shiying *et al.* [11]	2009	การประเมินค่าความแม่นยำจากผลกระทบของการสะท้อนที่ส่งผลต่อสีสันและความมันเงาของชิ้นงาน
3	W. Yu *et al.* [12]	2011	การออกแบบอัตโนมัติของท่อหล่อเย็นแบบโครงข่ายอย่างรวดเร็ว
4	A. Alban *et al.* [13]	2012	การออกแบบรูหล่อเย็นของเครื่องฉีดพลาสติกที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้พื้นฐานจากหลักสมการความร้อนที่พื้นผิว
5	H.S. Park *et al.* [14]	2012	การพัฒนาการฉีดพลาสติกยานยนต์ของชิ้นส่วนบังโคลนล้อหน้าในรถยนต์เพื่อสิ่งแวดล้อม
7	M. Packianather *et al.* [15]	2013	ศึกษาหลักการออกแบบการทดลองที่มีความเหมาะสมที่สุดของการฉีดพลาสติกระดับไมครอน
8	W. Gui-long *et al.* [16]	2013	การออกแบบท่อให้ความร้อนและความเย็นในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกของชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยวิธีการเร่งความร้อนแม่พิมพ์
9	Z. Shayfull *et al.* [17]	2013	การออกแบบท่อหล่อเย็นแบบตามรูปทรงหน้าตัดเหลี่ยมในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ลำดับที่	ผู้เขียน	ปีที่ตีพิมพ์	หัวข้องานวิจัยที่นำเสนอ
10	D. P. Gruber. *et al.* [18]	2013	การวัดรอยยุบของชิ้นงานฉีดพลาสติกด้วยวิธีการมองเห็นจากขั้นตอนใหม่ที่รวดเร็ว
11	N. Shih-Chih *et al.* [19]	2014	การควบคุมการโก่งงอของชิ้นงานฉีดพลาสติกที่มีผนังบางโดยใช้หลักการพื้นฐานของอุณหภูมิพิมพ์
12	E. Kunnayut and W. Kittinat [20]	2015	ระบบหล่อเย็นแบบฟองน้ำของแม่พิมพ์ที่สร้างจากการสะสมของชั้นเหล็ก

จากตารางที่ 2.2 D. Eric และคณะ [10] ได้ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อสีสันและความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก พารามิเตอร์ที่ส่งผลหลักต่อชิ้นงานคือ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (ความเย็น)และอุณหภูมิของหม้อหลอมพลาสติก (ความร้อน) ที่ส่งผลมากที่สุด และปัจจัยรองลงมาคือ ค่าความเร็วในการฉีดและความดันกลับ

Y. Shiying และคณะ [11] ศึกษาการกระจายของอิทธิพลที่มีผลต่อความมันเงาจากการตกกระทบของแสงที่ตรวจสอบได้จากรุ)ภาพ โดยจำลองการแพร่กระจายของความยาวคลื่นในแต่ละเฉดสีและการวัดจริง ซึ่งผลที่ได้รับจากการคำนวณและการวัดจริงให้ผลแตกต่างกันออกไปในแต่ละความยาวคลื่นของแต่ละเฉดสี เพื่อศึกษาความมันเงาของชิ้นงานโดยเป็นแนวทางในการวิจัยสำหรับชิ้นงานที่มีความซับซ้อนของรูปทรงในการออกแบบในอนาคต

W. Yu และคณะ [12] ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อความมันเงาของแม่พิมพ์ในเชิงความร้อนและความเย็นทำให้มีการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการที่ทำให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิต่ำโดยทั่วถึงพร้อมกันในแม่พิมพ์ โดยงานวิจัยนี้จะนำเสนอรูปแบบการหล่อเย็นตามรูปทรงแบบโครงข่ายซึ่งได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจและสร้างรูปแบบเครื่องมือที่สามารถออกแบบรูหล่อเย็นได้อัตโนมัติทำให้สะดวกต่อการใช้งานได้ในทันทียิ่งขึ้น แต่ก็ยังไม่ดีเทียบเท่าการหล่อเย็นแบบตามรูปทรงชิ้นงานเนื่องจากการไหลของน้ำหล่อเย็นมีการไหลทับซ้อนกันอยู่ในแต่ละโครงข่าย

A. Alban และคณะ [13] ได้ออกแบบรูหล่อเย็นจากโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ของการถ่ายเทความร้อนออกจากแม่พิมพ์สำหรับชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อน โดยคำนวณจากฟลักซ์ความร้อนที่เข้าและออกภายในแม่พิมพ์ และออกแบบในโปรแกรมเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการปรับปรุงและแก้ไขแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกในอนาคตต่อไป

H.S. Park และคณะ [14] ได้ปรับปรุงวัสดุของชิ้นส่วนยานยนต์จากโลหะเป็นพลาสติกเสริมเส้นใยเพื่อเพิ่มความแข็งแรงทางกายภาพเมื่อเทียบเท่ากับวัสดุเดิมและยังสามารถลดน้ำหนักมวลรวมของยานยนต์ได้อีกทั้งยังลดค่าใช้จ่ายในส่วนการผลิต รวมถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเชิงอุตสาหกรรมเชิงเศรษฐศาสตร์

M. Packianather และคณะ [15] ได้ศึกษาวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE) แบบวิธีการของทากูชิทั้งหมดหกพารามิเตอร์และแบ่งระดับเป็นสองระดับในวัสดุทั้งหมดสามประเภทเพื่อหาข้อมูลเชิงสถิติและทำการคัดเลือกปัจจัยที่ศึกษาและทำการออกแบบการทดสอบเพื่อให้ได้ค่าปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติกหรือพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมาะสมที่สุด

W. Gui-long และคณะ [16] ได้ศึกษาเทคโนโลยี การเร่งความร้อนแก่ผิวแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกฝั่งคาวิตี้เพื่อให้เกิดความร้อนสูงสัมพันธ์กับอุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลวไหลเข้ามาทำให้เกิดความมันเงาสูงได้ขณะสัมผัสกับแม่พิมพ์ที่ร้อนและเย็นตัวลงสำหรับชิ้นงานพลาสติกที่ต้องการความมันเงาในอุตสาหกรรมในชิ้นส่วนยานยนต์สำหรับตกแต่งภายในหรือเพิ่มมูลค่าหรือคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานพลาสติก

Z. Shayfull และคณะ [17] ได้ศึกษาอิทธิพลของการหล่อเย็นตามรูปทรงชิ้นงานของชิ้นงานฉีดพลาสติกซึ่งผลลัพธ์จากรูหล่อเย็นที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมให้ประสิทธิภาพให้การถ่ายเทความร้อนในแม่พิมพ์ได้ดีกว่าแบบหน้าตัดรูปทรงวงกลม และสามารถลดเวลาการหล่อเย็นของวัฏจักรการฉีดได้ 64.83 % รวมถึงการหดตัวโดยรวมของของชิ้นงานฉีดพลาสติกได้ 13.94 ถึง 54 % เหมาะกับการออกแบบชิ้นงานแบบแผ่นเรียบซึ่งทำให้ออกแบบแม่พิมพ์และรูหล่อเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

D. P. Gruber และคณะ [18] ศึกษารูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้พยากรณ์การหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก จากวิธีการตรวจสอบอย่างรวดเร็วโดยกล้องวัดโดยตรงกับชิ้นงนทันที ผลลัพธ์แสดงรอยยุบที่เกิดขึ้นส่งผลต่อความมันเงาที่ลดลงเนื่องจากการสะท้อนแสงที่ตกกระทบบนชิ้นงานกระจายออกไปอย่างไร้ทิศทาง ในงานวิจัยนี้สามารถใช้ตรวจสอบคุณสมบัติของรอยยุบชิ้นงานในอนาคตด้วยการตรวจสอบผ่านกล้องวัดได้บนพื้นฐานของโมเดลคณิตศาสตร์

N. Shih-Chih และคณะ [19] ศึกษาเรื่องการควบคุมการโก่งงอของชิ้นงานฉีดพลาสติกที่มีผนังบางโดยใช้หลักการพื้นฐานของอุณหภูมิแม่พิมพ์ โดยศึกษาบนพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง ผลสรุปยังไม่มีความชัดเจนเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาการโก่งงอ

E. Kunnayut และ W. Kittinat [20] ได้สร้างแม่พิมพ์จากการเชื่อมพอกสะสมของชั้นเหล็กโดยออกแบบให้รูหล่อเย็นแบบปกติ และแบบตามรูปทรงชิ้นงาน หลังจากนั้นทำการแปรรูผิวแม่พิมพ์ฝั่งคอร์และคาวิตี้ให้ได้ขนาดและนำไปประกอบเป็นแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ซึ่งผลที่ได้สามารถลดเวลาของวัฏจักรในการฉีดได้ เนื่องจากรูหล่อเย็นที่ออกแบบตามรูปทรงชิ้นงานอยู่ใกล้กับผนังคอร์และ

คาวิตี้ การแพร่กระจายความร้อนที่เกิดขึ้น และคุณภาพของชิ้นงานจะดีกว่าการออกแบบรูหล่อเย็นแบบปกติ

แต่อย่างไรก็ตามจากผลงานวิจัยที่ได้กล่าวมาก็ยังไม่มีการนำมาใช้เกี่ยวกับการศึกษาอิทธิพลการฉีดพลาสติกที่ส่งผลต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกประเภทวัสดุเอบีเอส ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ในระดับปัจจัยต่างๆ โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองมาสรุปอิทธิพลของตัวแปรอิสระ และใช้ร่วมกับการออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตในการปรับตั้งเครื่องจักรให้มีความมันเงาที่เหมาะสมที่สุด

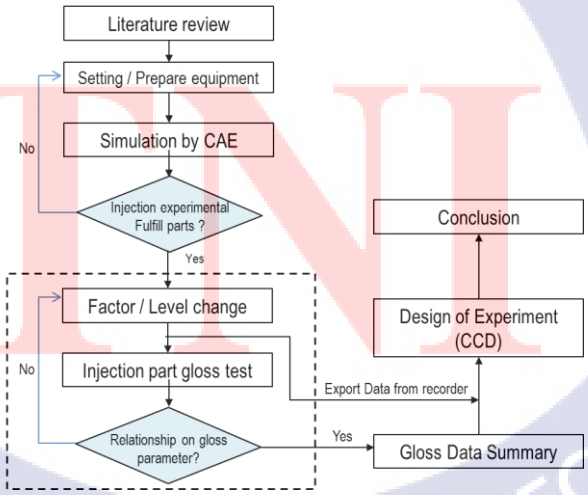
บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

วิธีดำเนินการวิจัยในการศึกษาครั้งนี้ใช้ระเบียบวิจัยเชิงทดลองในรูปแบบของกรณีศึกษาสำหรับข้อมูลเชิงคุณภาพ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานฉีดพลาสติก ทั้งยังสามารถลดขั้นตอนการดำเนินการผลิตและค่าใช้จ่ายในการผลิตได้ เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการฉีดพลาสติกและสามารถพัฒนาต่อยอดไปสู่อุตสาหกรรมการผลิตจริงได้ ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการตามขั้นตอนปฏิบัติดังต่อไปนี้

- บทนำ
- อุปกรณ์และเครื่องมือการวิจัย
- กระบวนการวิจัย
- การทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล
- การดำเนินการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม
- การตั้งค่าพารามิเตอร์ในการฉีดพลาสติก
- วิธีดำเนินการวัดความมันเงาของชิ้นงาน
- ผลการดำเนินการวัดค่าความมันเงา

สามารถเขียนเป็นลำดับขั้นตอนทำวิจัยครั้งนี้ได้ ดังนี้



รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความมันเงาของชิ้นงาน

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือการวิจัย

3.2.1 โปรแกรมที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1.1 โปรแกรม Moldex3D R14 และโปรแกรม CADoctor สำหรับจำลองการประมวลผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการสร้างรวมถึงปรับแต่งแก้ไขเมช (mesh)

3.2.1.2 โปรแกรม Minitab สำหรับคำนวณข้อมูลทางสถิติและพล็อตกราฟพื้นผิวตอบสนองและเส้นโครงร่างของวิธีพื้นผิวตอบสนอง

3.2.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

เม็ดพลาสติก ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) ของบริษัท Thai Toray Synthetics Company Limited Ltd. รหัสเกรด Toyolac 700-314 คุณสมบัติของเม็ดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัยแสดงค่าความหนาแน่น (Density) อัตราการไหลของมวลหลอมเหลว (Melt mass flow rate) ระดับความมันเงา (Glossiness) ที่วัดโดยบริษัทผู้ผลิต อุณหภูมิของแนะนำสำหรับการหลอมเหลว (Melt temperature) และอุณหภูมิปลดชิ้นงาน (Ejection temperature) และคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเม็ดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย

คุณสมบัติทางกายภาพ	หน่วย	ค่าที่กำหนด
ความหนาแน่น	กิโลกรัม^{3}เมตร/	1040
ความมันเงา (วัดด้วยมุม 60° ของบริษัท Toray)	เปอร์เซ็นต์	94
อัตราการไหลของมวลหลอมเหลว (220° C)	กรัม10/นาที	23
อุณหภูมิการสะท้อนภายใต้ภาระ	องศาเซสเซียส	82
การทดสอบแรงแบบชาร์ปี้	กิโลจูล^{2}เมตร/	17
ความเค้นแรงดึง	เมกะปาสคาล	54
การยืดตัวพลาสติก	เปอร์เซ็นต์	>10
โมดูลัสแรงดึง	เมกะปาสคาล	2700
โมดูลัสความยืดหยุ่น	เมกะปาสคาล	2460
อุณหภูมิหลอมเหลว	องศาเซสเซียส	260 – 220
อุณหภูมิปลดชิ้นงาน	องศาเซสเซียส	96.85
อุณหภูมิพลาสติกแข็งตัว	องศาเซสเซียส	116.85

<u>3.2.3 เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย</u>

3.2.3.1 เครื่องฉีดพลาสติกชนิดฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding machine) ของบริษัท Toshiba รุ่น EC100S ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และตารางที่ 3.2

รูปที่ 3.2 เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย

รายการ	หน่วย	ค่าที่กำหนด
แรงปิดแม่พิมพ์	ตัน	100
ระยะไทด์บาร์)กว้าง x ยาว(	มิลลิเมตร	460 x 410
ขนาดแผ่นแม่พิมพ์) กว้าง x ยาว(	มิลลิเมตร	660 x 610
ระยะปิดแม่พิมพ์	มิลลิเมตร	350
ความสูงแม่พิมพ์	มิลลิเมตร	180 ~ 550
แรงกระทุ้งแม่พิมพ์	ตัน	3
ระยะกระทุ้งแม่พิมพ์	มิลลิเมตร	90
ความดันในการฉีด	เมกะปาสคาล	158~287
อัตราการฉีด	เซนติเมตร^3/วินาที	76 ~ 557
ความเร็วในการฉีด	มิลลิเมตร/วินาที	200 ~ 350

3.2.3.2 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์เป็นวัสดุ S50C แสดงดังตารางที่ 3.3 สำหรับการคำนวณขนาดของแม่พิมพ์จะใส่เนื้อหาไว้ในส่วนของภาคผนวก

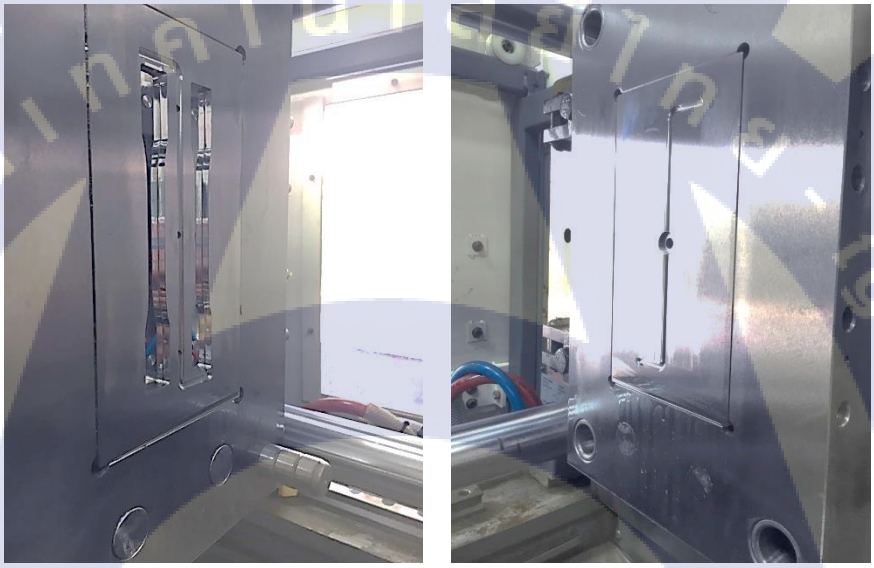
3.2.3.3 แม่พิมพ์อินเสิร์ทสำหรับชิ้นงานมาตรฐานสำหรับทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) สำหรับฝั่งคอร์และคาวิตี้ คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์เป็นวัสดุ P20 แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

คุณสมบัติทางกายภาพ	หน่วย	อุณหภูมิ (°C)		
		20	100	200
ความหนาแน่น	กรัม/เซนติเมตร^3	7.8	-	-
การนำความร้อน	วัตต์/เมตรองศาเซสเซียส.	42.5	38.5	34.2
ความจุความร้อนจำเพาะ	จูล/กิโลกรัมองศาเซสเซียส.	0.48	-	-
โมดูลัสของการยืดหยุ่น	10^{3}นิวตัน^{2}มิลลิเมตร/	210	-	-

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพของแม่พิมพ์อินเสิร์ท

คุณสมบัติทางกายภาพ	**หน่วย**	**อุณหภูมิ (°C)**	
		20	**200**
ความหนาแน่น	กรัม/เซนติเมตร^3	7.8	7.75
การนำความร้อน	วัตต์/เมตรองศาเซสเซียส.	29	29.5
ความจุความร้อนจำเพาะ	จูล/กิโลกรัมองศาเซสเซียส.	-	0.127
โมดูลัสของการยืดหยุ่น	10^{3}นิวตัน^{2}มิลลิเมตร/	250	200



รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์อินเสิร์ทฝั่งคาวิตี้ (ซ้าย) และคอร์ (ขวา)

3.2.3.4 เครื่องควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ (Temperature Controller Unit) รุ่นของบริษัท Shini รุ่น STM6090 ใช้น้ำมันเป็นตัวให้ความร้อน

รูปที่ 3.4 เครื่องควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ Shini STM

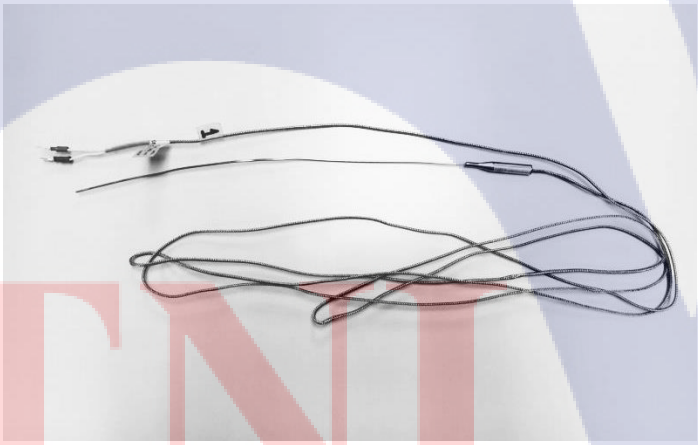
3.2.3.5 เครื่องวัดความมันเงา (Gloss meter) ของบริษัท SHENZHEN 3NH TECHNOLOGY CO., LTD. รุ่น NHG-268

รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความมันเงาชองชิ้นงานมาตรฐาน ASTM:D523 รุ่น NHG-268

3.2.3.6 เครื่องบันทึกข้อมูล (Recorder measurement unit) อุณหภูมิและความต่างศักย์ของบริษัท Keyence รุ่น TR-W1050

รูปที่ 3.6 เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิของแม่พิมพ์ Keyence รุ่น TR-W1050

3.2.3.7 เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดแท่ง ไทป์ เจ (Type J) ตามมาตรฐาน IEC 60584 จำนวน 4 แท่ง



รูปที่ 3.7 เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดแท่ง ไทป์ เจ (Type J)

3.3 กระบวนการวิจัย

กระบวนการวิจัยของการศึกษาอิทธิพลของผลกระทบเรื่องความมันเงาของชิ้นส่วนพลาสติกมีระเบียบวิธีการวิจัย ดังแสดงหัวข้อต่อไปนี้

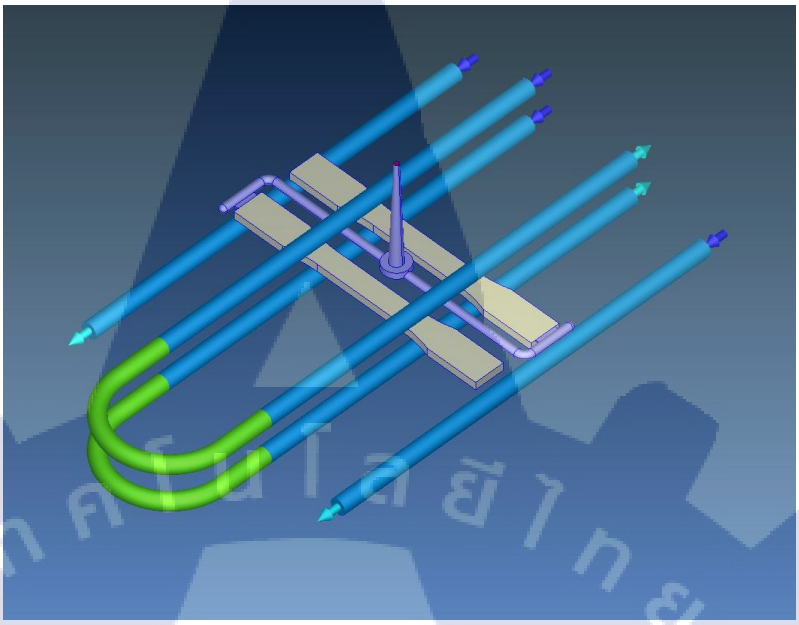
3.3.1 กระบวนการเตรียมการฉีดพลาสติก

3.3.1.1 การเตรียมเม็ดพลาสติกชนิดเอบีเอสประเภทที่ใช้ทำการทอลอง จำเป็นต้องมีการอบไล่ความชื้นเป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 80 °C เพื่อกำจัดความชื้นให้หมดไปจากเม็ดพลาสติก

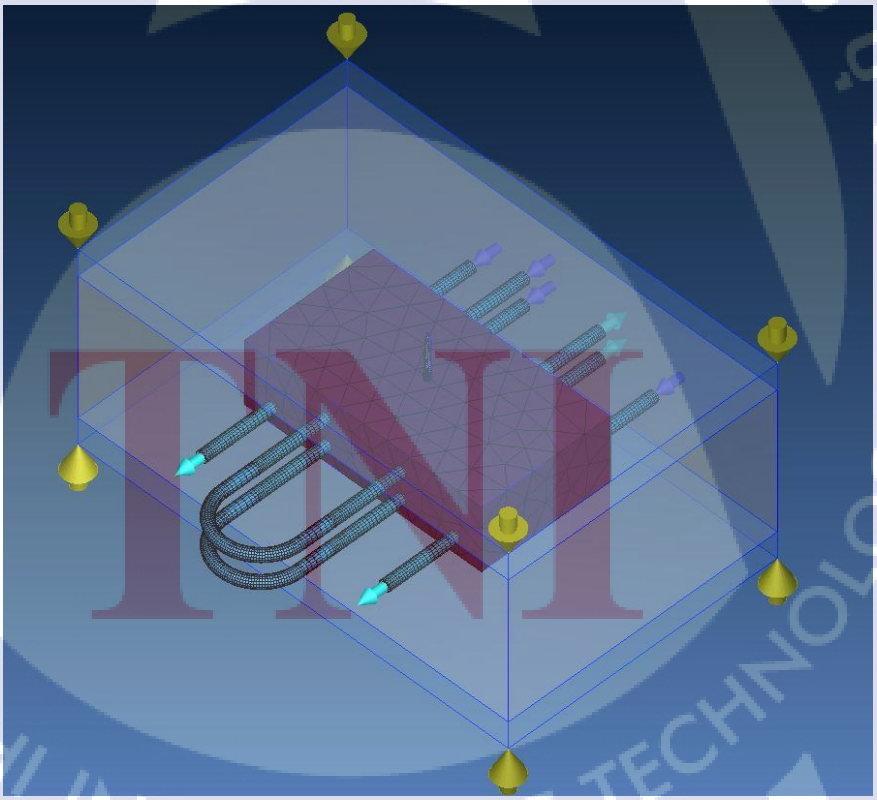
3.3.1.2 ติดตั้งแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเข้ากับเครื่องฉีดพลาสติกและติดตั้งปลั๊กสำหรับรูหล่อเย็นที่ฝั่งคอร์และรูจ่ายความร้อน และตรวจสอบให้มั่นใจว่าไม่มีจุดรอยรั่วของของไหลออกจากแม่พิมพ์เพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานและความปลอดภัย

3.3.1.3 ศึกษาวิธีการวัดค่าโดยอุปกรณ์การวัดเทอร์โมคัปเปิลและเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์โดยให้ความร้อนติดตั้งไว้ที่แม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ เพื่อทำการอุ่นแม่พิมพ์จนได้อุณหภูมิที่ต้องการและทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิแม่พิมพ์ในการฉีดชิ้นงานทุกครั้ง ในตำแหน่งของจุดที่เทอร์โมคัปเปิลและรูที่ให้ความร้อนจะอธิบายในส่วนของบทถัดไปและภาคผนวก

สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกได้ใช้กระบวนจำลองการฉีดด้วยโปรแกรมทางวิศวกรรมศาสตร์ที่มีชื่อว่า Moldex3D ในบทนี้จะอธิบายในส่วนของการออกแบบและการติดตั้งท่อให้ความร้อนและความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิชองแม่พิมพ์ ดังแสดงดังรูปด้านล่างโดยมีแม่พิมพ์ที่เป็นอินเสิร์ชอยู่ด้านในทั้งด้านฝั่งคาวิตี้และคอร์ และแสดงการสร้างเมซ (Mesh) ใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าการไหลของพลาสติกหลอมเหลวเพื่อตรวจสอบว่าพลาสติกสามารถไหลเต็มแม่พิมพ์หรือไม่ ปัญหาเรื่องคุณภาพของการโก่งงอเกิดขึ้นที่ชิ้นงานในช่วงที่ยอมรับได้หรือไม่ การออกแบบทางเข้าต้องตรวจสอบความเค้นในการปลดชิ้นงานอีกด้วย ส่วนรายละเอียดผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมจะเสนอนำในบทถัดไป



รูปที่ 3.8 การจำลองการออกแบบท่อให้ความร้อนและหล่อเย็นในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก



รูปที่ 3.9 การจำลองการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและอินเสิร์ท

<u>3.3.2 กระบวนการข้อมูลทางสถิติศาสตร์ของการวัดความมันเงา</u>

3.3.2.1 กำหนดรูปแบบการออกแบบการทดลองโดยวิธีการพื้นผิวตอบสนองร่วมกับการออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตโดยใช้จุดกึ่งกลาง 5 จุด โดยมีตัวแปรอิสระทั้งหมด 19 ตัวแปรได้แก่ อุณหภูมิของผิวแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ อุณหภูมิพลาสติกปลายหัวฉีด และความดันของการฉีด ซึ่งแต่ละตัวแปรอิสระจะแบ่งเป็น 5 ระดับ (Level) ได้แก่ $-\alpha$, -1 , 0 , 1 , α ซึ่งแต่ละตำแหน่งการทดลองจะใช้ค่าเฉลี่ยของการวัดความมันเงาทั้งหมด 10 ตัวอย่างต่อหนึ่งการทดลอง

โดยค่าที่ระดับ -1 , 0 , 1 สำหรับการออกแบบที่ตำแหน่งจุดแฟกทอเรียล ค่าที่ระดับ $-\alpha$, 0, α สำหรับการออกแบบที่ตำแหน่งจุดแกนและค่าระดับ 0 สำหรับการออกแบบที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางเท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 3-5 ซึ่งค่าของ $-\alpha$ และ α ในกรณีศึกษาของพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ตัวแปรจะใช้แบบ Rotatable design ซึ่งมีค่าเท่ากับ -1.68 และ 1.68 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรและระดับของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

พารามิเตอร์	หน่วย	ระดับ				
		–α	-1	0	1	**α**
อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ [1]	องศาเซสเซียส	43.18	50	60	70	76.82
อุณหภูมิที่ปลายหัวฉีด [1]	องศาเซสเซียส	223.18	230	240	250	256.82
ความเร็วฉีดย้ำ [1,*]	มิลลิเมตร/วินาที	133.18	140	150	160	166.82

หมายเหตุ [1] ออกแบบพารามิเตอร์จากคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุพลาสติกและแม่พิมพ์

* ออกแบบพารามิเตอร์จากเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง [9]

3.3.2.2 ปรับค่าพารามิเตอร์ของทั้งสามตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์โดยการเร่งให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ที่อุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการฉีด อุณหภูมิการฉีดที่ปลายหัวฉีด โดยไล่อุณหภูมิตั้งแต่ต้นหม้อหลอม (Barrel) จากอุณหภูมิน้อยไปหามากที่สุดที่ปลายหัวฉีด และปรับค่าความดันในการฉีดพลาสติกจากหน้าจอมอนิเตอร์ของเครื่องฉีดพลาสติก เพื่อให้เกิดความมันเงาสูงของชิ้นงานที่วัดโดยเครื่องวัดความมันเงามีค่าไม่ต่ำกว่า 70 GU ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3.3.2.3 ทำตารางการสรุปผลการตั้งค่าพารามิเตอร์การฉีดที่เหมาะสมที่สุดของชิ้นส่วนฉีดพลาสติกประเภทเอบีเอส ที่ส่งผลต่อความมันเงาด้วยการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองและเซ็นทรัลคอมโพสิต ดังตารางที่ 3.6 และตารางที่ 3.7 โดยมีการทำซ้ำที่จุดกึ่งกลางทั้งหมด 5 ครั้ง รวมทั้งสิ้น 19 ตัวอย่างการทดลอง

ตารางที่ 3.6 การออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต 19 ตัวอย่างการทดลองและมีการทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง 5 ครั้ง

การออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต	การทดสอบที่	อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ (°C)	อุณหภูมิปลายหัวฉีด (°C)	ความเร็วฉีดย้ำ (mm/sec)	ระดับความมันเงา (GU)
จุดแฟกทอเรียล	1	-1	-1	-1	X_1
	2	1	-1	-1	X_2
	3	-1	1	-1	X_3
	4	1	1	-1	X_4
	5	-1	-1	1	X_5
	6	1	-1	1	X_6
	7	-1	1	1	X_7
	8	1	1	1	X_8
จุดแกน	9	$-\alpha$	0	0	X_9
	10	α	0	0	X_{10}
	11	0	$-\alpha$	0	X_{11}
	12	0	α	0	X_{12}
	13	0	0	$-\alpha$	X_{13}
	14	0	0	α	X_{14}
จุดกึ่งกลาง	15	0	0	0	X_{15}
	16	0	0	0	X_{16}
	17	0	0	0	X_{17}
	18	0	0	0	X_{18}
	19	0	0	0	X_{19}

หมายเหตุ : มีการทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง 5 ครั้ง เนื่องจากสามารถตอบสนองอิทธิพลจากพารามิเตอร์ที่ออกแบบในจุดแฟกทอเรียลและจุดแกนได้เพียงพอ

ตารางที่ 3.7 กำหนดค่าการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต 19 ตัวอย่างการทดลองและมีการทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง 5 ครั้ง

การออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต	การทดสอบที่	อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ (°C)	อุณหภูมิปลายหัวฉีด (°C)	ความเร็วฉีดย้ำ (mm/sec)	ระดับความมันเงา (GU)
จุดแฟกทอเรียล	1	50	230	140	X_1
	2	70	230	140	X_2
	3	50	250	140	X_3
	4	70	250	140	X_4
	5	50	230	160	X_5
	6	70	230	160	X_6
	7	50	250	160	X_7
	8	70	250	160	X_8
จุดแกน	9	43.18	240	150	X_9
	10	76.82	240	150	X_{10}
	11	60	223.18	150	X_{11}
	12	60	256.82	150	X_{12}
	13	60	240	133.18	X_{13}
	14	60	240	166.82	X_{14}
จุดกึ่งกลาง	15	60	240	150	X_{15}
	16	60	240	150	X_{16}
	17	60	240	150	X_{17}
	18	60	240	150	X_{18}
	19	60	240	150	X_{19}

หมายเหตุ : มีการทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง 5 ครั้ง เนื่องจากสามารถตอบสนองอิทธิพลจากพารามิเตอร์ที่ออกแบบในจุดแฟกทอเรียลและจุดแกนได้เพียงพอ

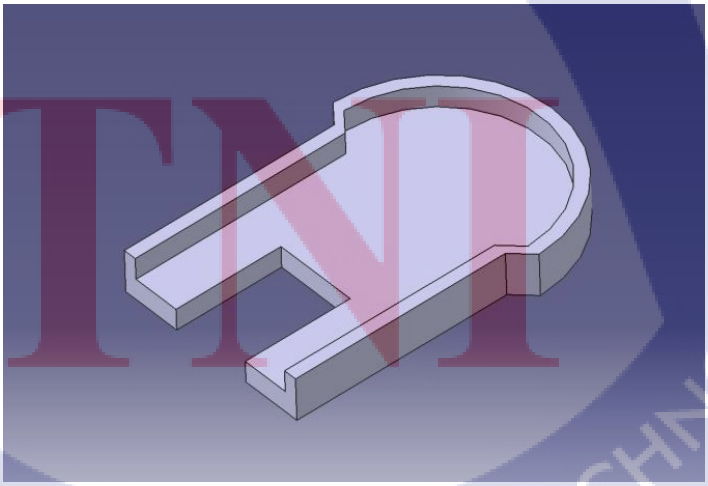
3.3.2.4 ทำการจัดเก็บชิ้นงานฉีดงานพลาสติก โดยกำกับไว้ในแต่ละตัวอย่างการทดลองอย่างชัดเจนเพื่อป้องกันการสับสน และระมัดระวังไม่ให้ผิวหน้าสัมผัสที่ต้องการวัดความมันเงาเกิดรอย

หรือการขูดขีดของชิ้นงานด้วยกัน ทำการปล่อยชิ้นงานให้แข็งตัวและเซ็ตตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาหนึ่งคืนก่อนทำการวัดชิ้นงาน

3.4 การทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยมาจากการเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งหมดสี่ปัจจัยจากการเตรียมอุปกรณ์ติดตั้งของเครื่องจักรและทำการวัดอุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์ทุกครั้งด้วยเทอร์โมคัปเปิลผ่านเครื่องบันทึกข้อมูล (Touch Panel Recorder) ก่อนการทดลองฉีดทุกครั้งงานวิจัยชิ้นนี้ใช้เครื่องบันทึกข้อมูลของ Keyence รุ่น TR-W1050 สามารถบันทึกข้อมูลได้พร้อมกันสำหรับอุณหภูมิที่ปลายหัวฉีด (Injection Temperature) อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ (Mold temperature) โดยวัดจากเทอร์โมคัปเปิลที่บันทึกผ่านเครื่องบันทึกข้อมูลที่ตำแหน่งห่างจากผิวแม่พิมพ์ 10 มิลลิเมตรและความดันฉีดของเครื่องฉีดพลาสติกจะควบคุมด้วยการปรับที่มอนิเตอร์ของเครื่องจักร

ด้านปัจจัยของผิวแม่พิมพ์จะมีการขัดเงาละเอียดสูงด้านแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ ทำการฉีดชิ้นงานในแต่ละระดับของการทดลองและนำข้อมูลทั้งหมดแต่ละมาเปรียบเทียบความมันเงาจากเครื่องวัดความมันเงาจากบริษัท SHENZHEN 3NH TECHNOLOGY CO., LTD. รุ่น NHG-268 ที่สามารถใช้วัดมุมแสงที่องศาต่างๆได้ (20°, 60° และ 85°) นำข้อมูลของปัจจัยที่กล่าวมาสรุปกับระดับความมันเงาเพื่อหาอิทธิพลที่ทำให้ชิ้นงานมีความมันเงาที่แตกต่างกัน ส่วนตำแหน่งการวัดของชิ้นงานจะมีการทำฟิกเจอร์ (Fixture) สำหรับจับยึดชิ้นงานกับเครื่องวัดความมันเงาเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ตรงกันในแต่ละชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยตำแหน่งของชิ้นงานจะอธิบายในส่วนของบทถัดไป

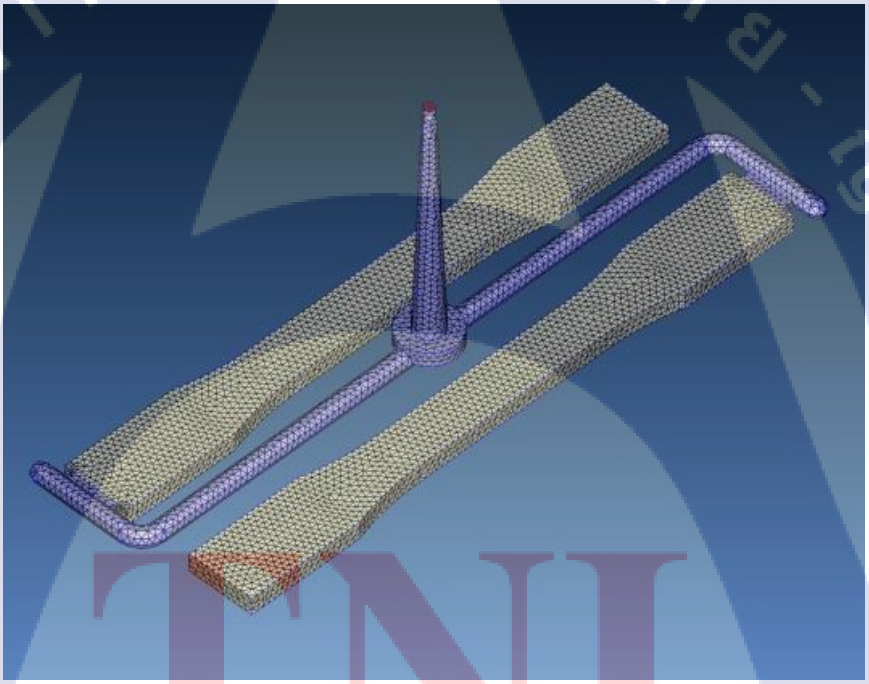


รูปที่ 3.10 รูปฟิกเจอร์สำหรับยึดชิ้นงานในการวัดความมันเงา

3.5 การดำเนินการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

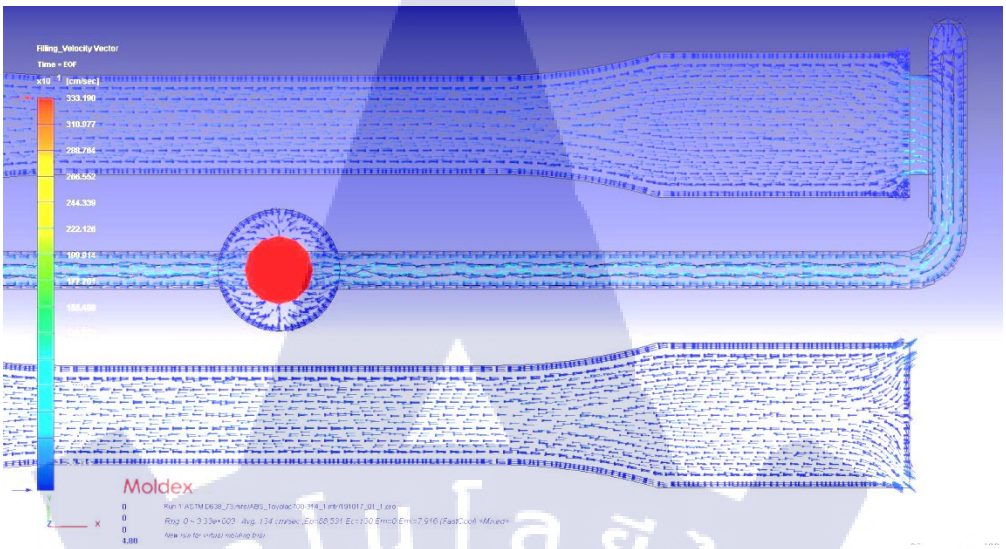
จากการออกแบบชิ้นงานจะเห็นได้ว่าแม่พิมพ์ฝั่งเคลื่อนที่ (Moveable side) มีชิ้นงานทั้งหมด 2 คาวิตี้เป็นชิ้นงานมาตรฐานสำหรับทดสอบแรงดึง (Tensile strenght) โดยมีทางวิ่ง (Runner) อยู่ระหว่างชิ้นงานทั้งสองและทางเข้า (Gate) เป็นแบบพัด (Fan gate) ที่ปลายของชิ้นงานและมีตำแหน่งปลดกระทุ้งทั้งสองด้าน ในการออกแบบแม่พิมพ์นี้คำนึงถึงตำแหน่งที่ปลดชิ้นงานนั้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อการวัดความมันเงาและตำแหน่งระยะเกจที่ใช้วัดทดสอบแรงดึงในงานวิจัยถัดไปอีกด้วย

จากรูปที่ 3.11 แสดงชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ออกแบบในโปรแกรม CAD ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม CATIA ในส่วนของการคำนวณ และจำลองการสร้างเมซด้วยโปรแกรม Moldex3D R14 สำหรับรายละเอียดการออกแบบและภาพร่างจะใส่ในไว้ภาคผนวก



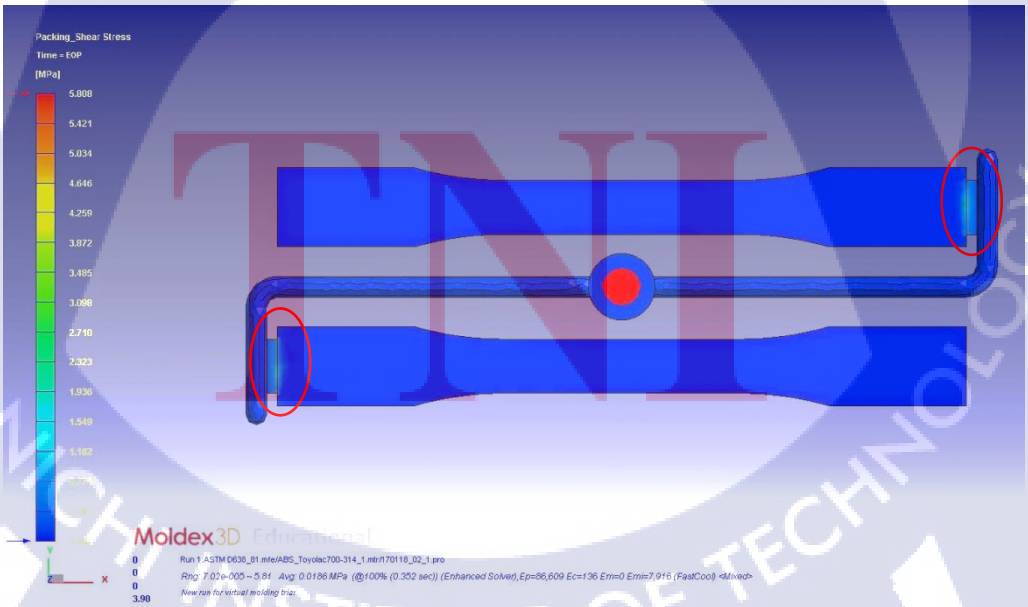
รูปที่ 3.11 ชิ้นงานจากการออกแบบโดยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์

แม่พิมพ์ที่ติดตั้งบนเครื่องฉีดพลาสติกก่อนที่จะทำการฉีดจริง ผู้วิจัยได้ทำการจำลองการฉีดด้วยโปรแกรมจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CAE) ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Moldex3D R14 เพื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพในการไหลของพลาสติกหลอมเหลวว่าสามารถไหลได้เต็มเบ้าคาวิตี้หรือไม่ รวมถึงลักษณะทิศทางของการไหลที่ส่งผลต่อพื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะไม่ยอมรับให้เกิดรอยฉีดหรือรอยเชื่อมพลาสติกในชิ้นงานเกิดขึ้นได้ แสดงในรูปที่ 3.12



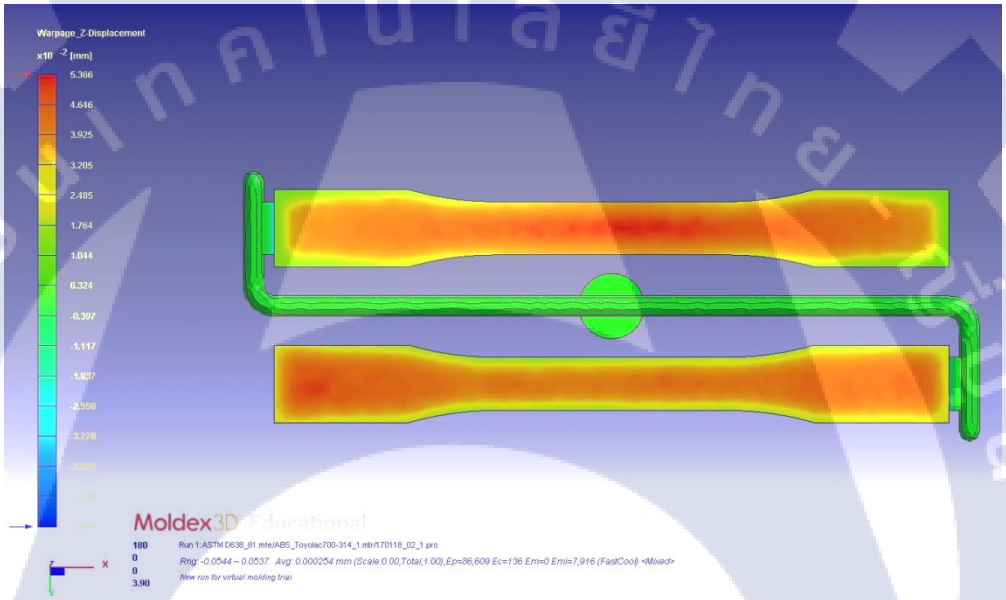
รูปที่ 3.12 ทิศทางการไหลของพลาสติกหลอมเหลวในชิ้นงาน

การออกแบบได้ออกแบบให้ฉีดเต็มชิ้นงานได้อย่างง่าย โดยให้เกิดการสูญเสียความดันในการฉีดน้อยที่สุดและใช้เวลาในการฉีดน้อยที่สุดด้วย สำหรับเหตุผลหลักนี้จะคำนึงถึงวิธีการหักทางเข้าของชิ้นงานออกจากตัวชิ้นงานหลังปลดชิ้นงานให้สะดวกเช่นกัน จากภาพที่ 3.13 แสดงค่าความเค้นที่สูงกว่า ณ ตำแหน่งรูเข้า(สีฟ้าอ่อน) ทั้งสองชิ้นงานเมื่อเทียบกับตัวชิ้นงานและทางวิ่ง (สีน้ำเงิน) ส่งผลให้การหักชิ้นงานออกจากทางเข้าทำได้โดยง่าย



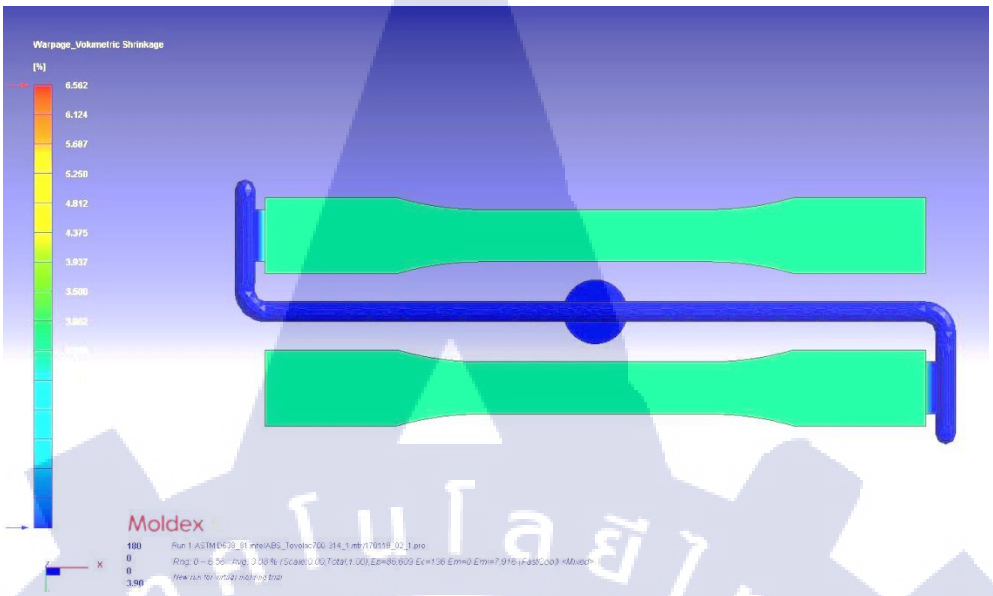
รูปที่ 3.13 ความเค้นที่สูงที่ตำแหน่งรูเข้า (Gate) ชิ้นงาน

จากที่กล่าวไว้ในบทที่แล้วว่าความโก่งงอของชิ้นงานมีผลกระทบต่อการวัดระดับความมันเงาของชิ้นงาน เนื่องจากจุดแสงตกกระทบและสะท้อนมีความคลาดเคลื่อนไปทำให้เครื่องมือวัดอ่านค่าได้ไม่ตรงกับค่าที่ควรจะเป็น แต่ในการทดลองฉีดจริงและลักษณะทางกายภาพของพลาสติกประเภทเอบีเอสที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นพลาสติกที่มีโครงสร้างแบบอะมอร์ฟัส จะมีการหดตัวของชิ้นงานและเกิดความเค้นภายในชิ้นงานจนทำให้ชิ้นงานเกิดการโก่งงอได้ การจำลองด้วยโปรแกรม Moldex3D ในรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานจะโก่งงอในแนวระดับไปประมาณ 0.05 มิลลิเมตร ในทิศทางในแนวแกน Z ซึ่งจากการจำลองสามารถปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในการฉีดนี้กับเครื่องฉีดพลาสติกจริง เพื่อให้ค่าความโก่งงอนี้ไม่มีผลต่อการวัดค่าความมันเงาของชิ้นงาน



รูปที่ 3.14 ค่าความโก่งงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก

สำหรับการหดตัวตามแนวชิ้นงานจากโปรแกรมจำลองจะมีการหดตัวหลังพลาสติกเย็นตัวลดแล้วประมาณ 1.7 – 2.6 % สำหรับวัสดุที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งชิ้นงานมีความหนาทำให้มีการหดตัวมากตามสัดส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก

3.7 การตั้งค่าพารามิเตอร์ในการฉีดพลาสติก

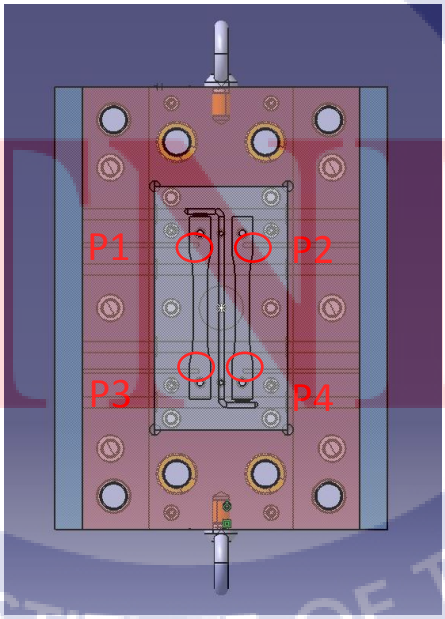
หลังจากตรวจสอบการจำลองการฉีดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในเพื่อลดเวลาในการตั้งค่าการฉีดจริงแล้ว ผู้วิจัยได้นำค่าเหล่านั้นมาปรับตั้งค่าการฉีดจริงที่หน้าเครื่องฉีดพลาสติกโดยสามารถใช้ค่าจากโปรแกรมจำลองได้โดยตรง ซึ่งค่าที่ปรับตั้งมีค่าใกล้เคียงกับงานฉีดจริง ดังแสดงในตารางที่ 3.8 ในตารางค่าพารามิเตอร์ที่แสดงเป็นช่วงระยะจะเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาโดยแปรผันในแต่ละการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าความมันเงาที่สูงที่สุด ส่วนค่าที่มีเพียงค่าเดียวเป็นปัจจัยคงที่ที่มีอิทธิพลของความมันเงารองลงมาจึงตั้งเป็นค่าคงที่

สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้คงที่ในแต่ละวัฏจักรมีความสำคัญอย่างยิ่งในงานวิจัยนี้ ทางผู้วิจัยได้ออกแบบแม่พิมพ์ให้มีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตรทั้งหมดจำนวน 4 รู โดยทำการเจาะผ่านแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ทะลุไปจนถึงแม่พิมพ์อินเสิร์ทอีก 40 มิลลิเมตร ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ชนิด เจ เข้าไปในตำแหน่ง P1 – P4 แล้วยึดด้วยสายรัดเพื่อป้องกันตำแหน่งการวัดเคลื่อนที่ ซึ่งตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิจะอยู่ห่างจากผิวของแม่พิมพ์ 10 มิลลิเมตรซึ่งจะตรงกับตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงานใกล้เคียงกับจุดที่จะต้องทำการวัดค่าความมันเงาดังแสดงในรูปที่ 3.16

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์การทดลองกระบวนการฉีด

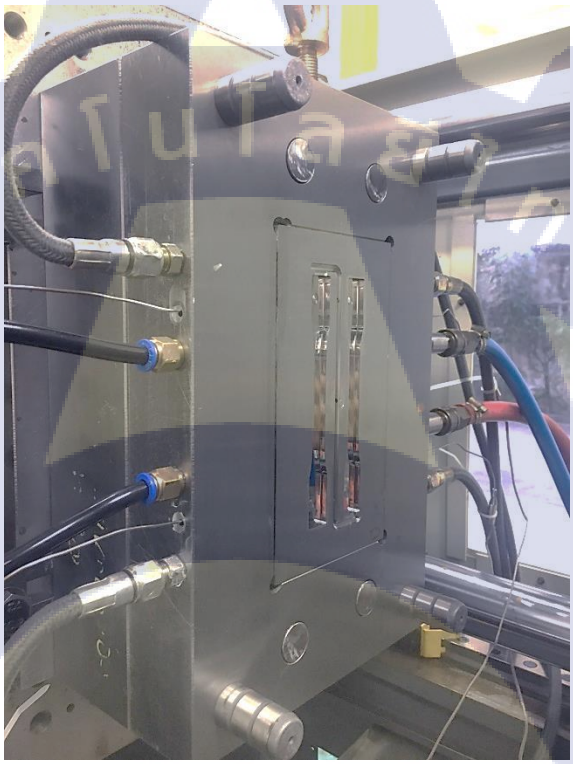
พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ฉีด
เวลาการฉีดเต็มแบบ (วินาที)	0.5
ตำแหน่งเปลี่ยนความดันฉีดย้ำ (วินาที)	32.5
ความดันฉีด (เมกะปาสคาล)	33
เวลาการฉีดย้ำ (วินาที)	3
ความเร็วฉีด (มิลลิเมตร/วินาที)	32.5
เวลาหล่อเย็น (วินาที)	20 - 35
ความดันฉีดย้ำ (เมกะปาสคาล)	150
อุณหภูมิที่ปลายหัวฉีด (องศาเซสเซียส)	43.18 – 76.82
ความเร็วฉีดย้ำ (มิลลิเมตร/วินาที)	133.18 – 166.81
อุณหภูมิแม่พิมพ์ (องศาเซสเซียส)	223.18 – 256.81

หลังจากได้พารามิเตอร์ในการปรับตั้งค่าการฉีดเบื้องต้นจากโปรแกรม Moldex3D เรียบร้อยแล้วจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ปลั๊กและท่อให้ความร้อนและเย็นกับแม่พิมพ์ รูปที่ 3.17 แสดงรูปแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้การติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อนจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิและ รูปที่ 3.18 แสดงแม่พิมพ์ฝั่งคอร์ที่ติดตั้งท่อน้ำสำหรับหล่อเย็นแก่แม่พิมพ์ในแต่ละวัฏจักร

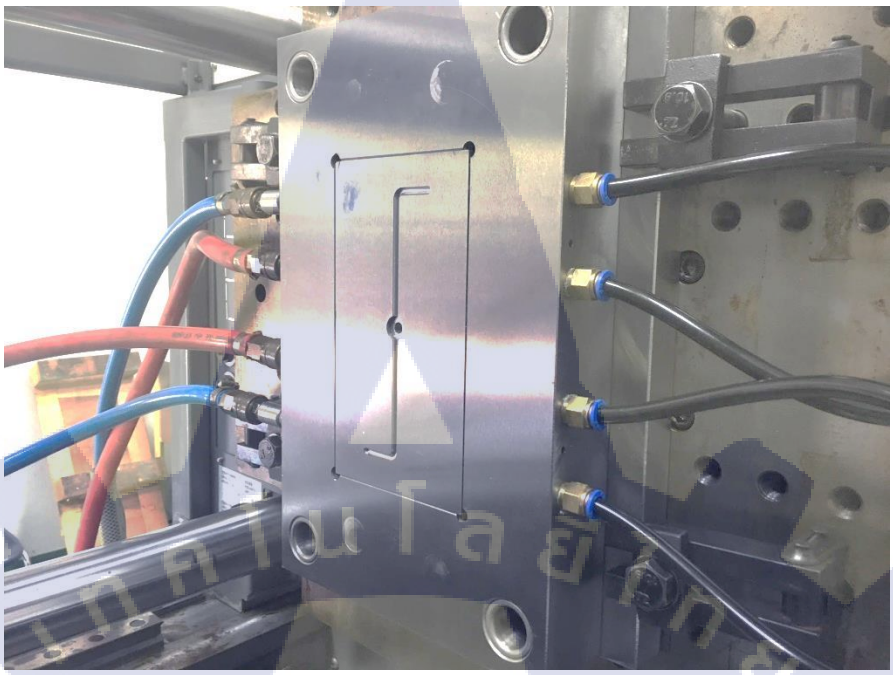


รูปที่ 3.16 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์คัปเปิลลงในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

สำหรับความเรียบผิวของแม่พิมพ์ในรูปที่ 3.17 ทางผู้วิจัยได้ทำการแมชชีนนิ่งด้วยตัวเอง หลังจากนั้นจึงส่งไปขัดผิวฝั่งคาวิตี้และประกอบเป็นแม่พิมพ์พร้อมใช้งาน ทำให้ไม่สามารถวัดค่าความเรียบผิวได้โดยตรง แต่จากความมันเงาบนแม่พิมพ์ที่สามารถสะท้อนให้เห็นแบบวัสดุประเภทกระจกเงาดังรูปแล้ว ในทางทฤษฎีและอุตสาหกรรมการผลิตจริงจะมีค่าความเรียบผิวอยู่ที่ต่ำกว่า 1.6 ไมครอน เป็นค่าที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ [36] ซึ่งเป็นค่าความมันเงาที่ผู้วิจัยใช้เป็นค่าคงที่ในการศึกษาอิทธิพลของความเรียบผิวส่งผลต่อค่าความมันเงาของชิ้นงานได้ ผู้วิจัยจึงสามารถนำมาใช้ฉีดได้โดยทันที

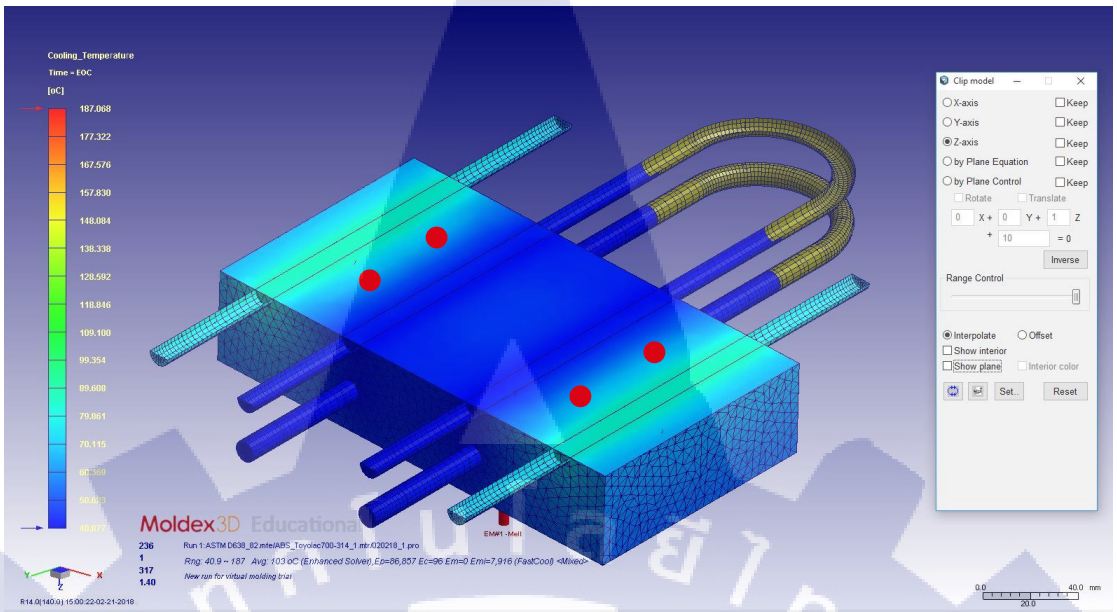


รูปที่ 3.17 การติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อนและหล่อเย็นในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก (ฝั่งคาวิตี้)



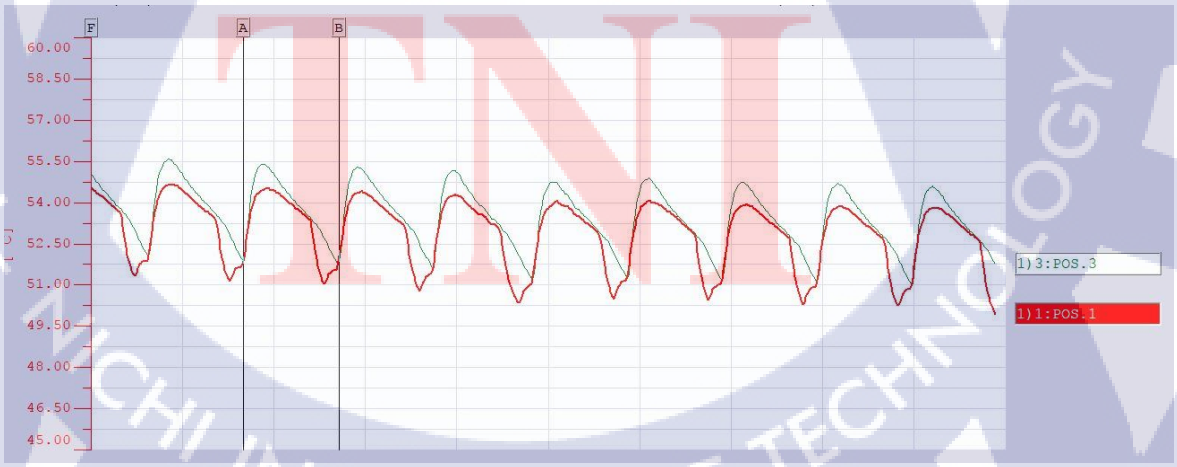
รูปที่ 3.18 การติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อนและหล่อเย็นในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก (ฝั่งคอร์)

จากรูปที่ 3.19 แสดงภาพจำลองการวัดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ตำแหน่งระยะห่างแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ 10 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใส่เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเจเพื่อวัดอุณหภูมิในตำแหน่งที่ออกแบบไว้ตั้งแต่ ดังแสดงในวงกลมจากรูปจะเห็นเป็นสีน้ำเงินอ่อน บ่งบอกอุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์ที่จุดประมาณ 50 องศาเซสเซียส หลังจากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆไปตั้งค่าบนแม่พิมพ์ฉีดจริง เพื่อควบคุมอุณหภูมิในแต่ละวัฏจักรให้คงที่ เนื่องจากโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองนั้นมีข้อจำกัดในการเลือกตำแหน่งของแม่พิมพ์อินเสริ็ท ผู้วิจัยจึงนำเสนอเป็นช่วงอุณหภูมิในตำแหน่งที่วงกลมสีแดงในรูปภาพแทน ซึ่งจากการจำลองการฉีดทั้งหมดนั้นสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางการการตั้งค่าฉีดจริงและควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ได้



รูปที่ 3.19 ภาพแสดงการฉีดชิ้นงานที่ควบคุมอุณหภูมิในแต่ละรอบการฉีดให้คงที่โดยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์

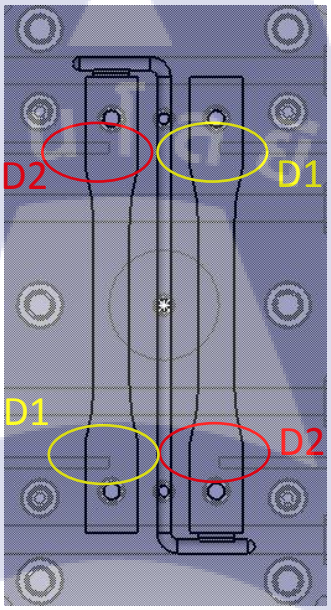
สำหรับการควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์นี้จะแสดงเป็นแผนภาพวัฏจักรในการฉีดซึ่งเก็บข้อมูลด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลยี่ห้อ Keyence แสดงในรูปที่ 3.20 จะเห็นได้ว่าแผนภาพในแต่ละตำแหน่งที่วัดมีถูกควบคุมให้เท่าๆกันในทุกการฉีดพลาสติก ซึ่งในงานวิจัยนี้การออกแบบการทดลองที่แต่ละอุณหภูมิแม่พิมพ์หรืออุณหภูมิที่ปลายหัวฉีดจะต้องควบคุมให้ใกล้เคียงเพื่อคุณภาพของชิ้นงาน ในรูปจะแสดงการฉีดที่อุณหภูมิแม่พิมพ์คงที่ที่ 50 องศาเซสเซียส



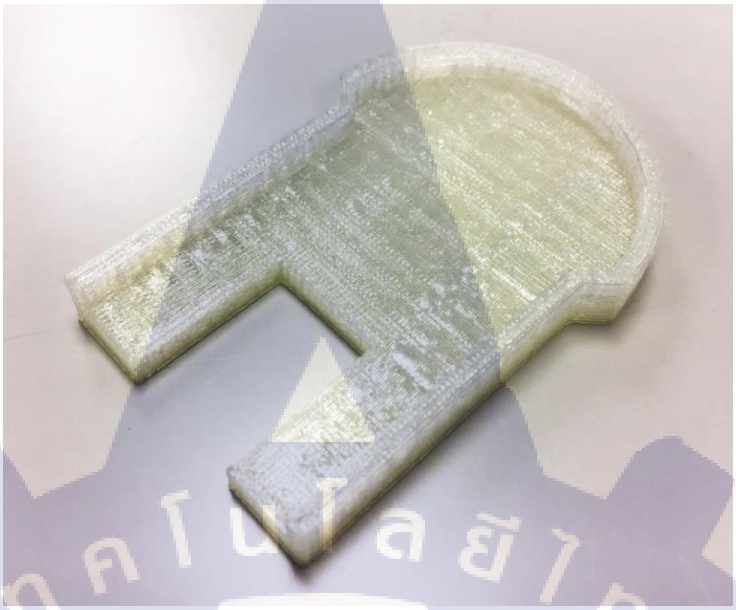
รูปที่ 3.20 ภาพแสดงการฉีดชิ้นงานที่ควบคุมอุณหภูมิในแต่ละรอบการฉีดให้คงที่

3.8 วิธีการวัดความมันเงาของชิ้นงาน

หลังจากทำการฉีดชิ้นงานทั้งหมด 19 ตัวอย่างการทดลองแล้วปล่อยให้พลาสติกมีคงหดตัวคงที่ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลาหนึ่งคืนแล้ว การวัดตำแหน่งจุดของชิ้นงานให้ตรงกันในทุกครั้งเป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างยิ่งในรูปที่ 3.20 แสดงตำแหน่งการวัดของชิ้นงานซึ่งจะอยู่ที่ปลายระยะเกจดึงชิ้นงานซึ่งจะไม่ได้รับอิทธิพลจากรอยกระทุ้งที่มีโอกาสทำให้ค่าความมันเงาผิดพลาดได้ โดยจะกำหนดให้ด้านที่ไม่ติดทางเข้าเป็นตำแหน่ง D1 และตำแหน่งที่ติดทางเข้าชิ้นงานเป็นตำแหน่ง D2 ในแต่ละตัวอย่างทดลองนั้นๆ

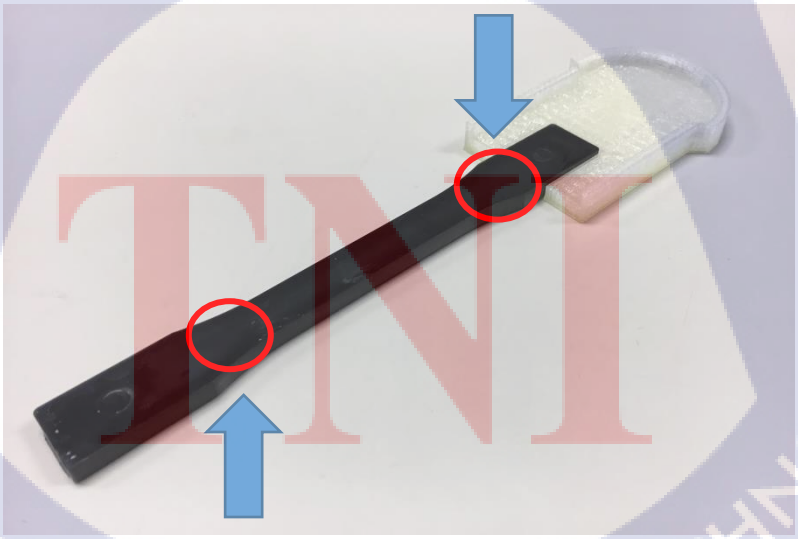


รูปที่ 3.21 ตำแหน่งการวัดความมันเงาของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.22 ฟิกเจอร์ที่ผลิตด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

รูปที่ 3.21 แสดงฟิกเจอร์ในการยึดจับชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรมสามมิติในบทที่แล้ว ซึ่งสร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติให้มีขนาดที่สามารถจับยึดชิ้นงานในตำแหน่งแต่ละด้านในระยะการวัดที่ตรงกันในทุกๆครั้ง

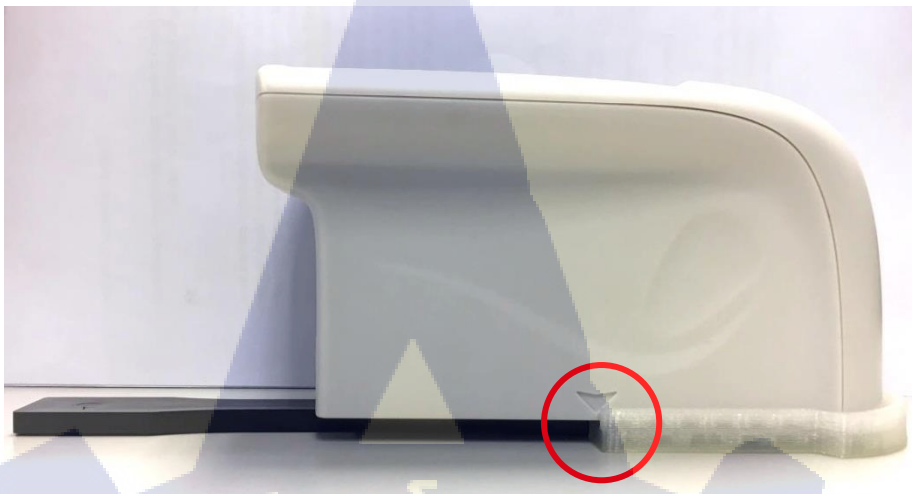


รูปที่ 3.23 การยึดจับชิ้นงานด้วยฟิกเจอร์

รูปที่ 3.22 แสดงการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกเจอร์ที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติ โดยวัดด้วยเครื่องวัดความมันเงาตามมาตรฐาน ASTM : D523 หลังจากนั้นติดตั้งเครื่องวัดลงบนฟิกเจอร์จะได้ระนาบระดับเดียวกันกับชิ้นงาน ในการวัดจะใช้โหมดคำนวณทางสถิติ (Statical mode) ซึ่งจะทำการวัดที่ตำแหน่งนั้นทั้งหมด 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของจุดนั้นๆ และหมุนชิ้นงานมาวัดตำแหน่งในด้านตรงข้ามอีกจุดหนึ่ง เพื่อหาค่าความมันเงาตลอดชิ้นงาน ทำอย่างนี้ซ้ำกันทั้งหมด 10 ชิ้นงานต่อหนึ่งตัวอย่างการทดลองจนครบ 19 ตัวอย่างการทดลอง

หลังจากติดตั้งเครื่องวัดความมันเงาแล้วจะแสดงในรูปที่ 3.23 และ 3.24 จะเห็นได้ว่าการวัดที่ชิ้นงานในแต่ละครั้งสะดวกยิ่งขึ้นและสามารถมั่นใจได้ว่าตำแหน่งที่วัดจะตรงกันในทุกๆครั้งเนื่องจากการนำอุปกรณ์จับยึดมาใช้งาน ในรูปด้านล่างจะแสดงมุมมองการวัดแบบไอโซเมตริกและมุมมองด้านข้าง

รูปที่ 3.24 การวัดชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความมันเงา (มุมมองสามมิติ)



รูปที่ 3.25 การวัดชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความมันเงา (มุมมองด้านข้าง)

3.8 ผลการดำเนินการวัดค่าความมันเงา

หลังจากทำการวัดชิ้นงานในหัวข้อที่ผ่านมาจะสรุปหาค่าเฉลี่ยในแต่ละการทดลองและจะสรุปลงในตารางที่ 3.9 ซึ่งหลักการออกแบบการทดลองในทฤษฎีในบทที่ผ่านมาจะออกแบบโดยใช้วิธีการออกแบบคอมโพสิตมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด 3 ตัวแปร แบ่งออกเป็นจุดแฟกทอเรียล 8 ตัวอย่าง ตำแหน่งจุดแกน 6 ตัวอย่างและทำทำซ้ำที่จุดกึ่งกลางทั้งหมด 5 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3.9 ค่าวัดความมันเงาจากการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต 19 ตัวอย่างการทดลองและมีการทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง 5 ครั้ง

การออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต	การทดสอบที่	**อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ (°C)**	**อุณหภูมิปลายหัวฉีด (°C)**	**ความเร็วฉีดย้ำ (mm/sec)**	**ระดับความมันเงา (GU)**
จุดแฟกทอเรียล	1	50	230	140	55.09
	2	70	230	140	67.41
	3	50	250	140	39.64
	4	70	250	140	58.07
	5	50	230	160	60.80
	6	70	230	160	68.90
	7	50	250	160	39.29
	8	70	250	160	54.38
จุดแกน	9	43.18	240	150	39.19
	10	76.82	240	150	53.41
	11	60	223.18	150	72.73
	12	60	256.81	150	37.65
	13	60	240	133.18	39.68
	14	60	240	166.81	40.15
จุดกึ่งกลาง	15	60	240	150	40.32
	16	60	240	150	43.97
	17	60	240	150	40.64
	18	60	240	150	43.18
	19	60	240	150	42.58

จากการวัดค่าความมันเงาแจกแจงในตารางที่ 3.9 นั้นไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าปัจจัยหรือตัวแปรใดมีอิทธิพลที่ส่งผลต่อความมันเงาได้อย่างมีนัยสำคัญทางคณิตศาสตร์ ในบทถัดไปจะนำเสนอการสรุปงานวิจัยด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม Minitab R17 โดยจะอธิบาย

ผลลัพธ์ด้วยรูปพื้นผิวตอบสนองและกราฟโครงร่าง รวมถึงการหาจุดเหมาะสมที่สุดในปัจจัยตัวแปรต่างๆที่ทำให้ชิ้นงานฉีดพลาสติกมีความมันเงาที่สุด

หลังจากสรุปผลลัพธ์ของการทดลองแล้ว ในเชิงคณิตศาสตร์สามารถสร้างสมการพยากรณ์ความมันเงาได้ เพื่อเปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อน (% Error) กับค่าการทดลองที่วัดจริงได้และใช้เป็นแนวทางในการพยากรณ์ค่าความมันเงาในอนาคตได้อีกด้วย ในส่วนสุดท้ายจะแสดงชิ้นงานฉีดพลาสติกโดยเปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานฉีดปกติและชิ้นงานฉีดที่มีความมันเงาสูง

รูปที่ 3.26 เปรียบเทียบน้ำหนักชิ้นงานจากโปรแกรมคำนวณและค่าที่วัดจริง

จากรูปที่ 3.25 สามาชั่งน้ำหนักของชิ้นงานในการฉีดหนึ่งครั้งได้ประมาณ 33 กรัม เมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณในส่วนภาคผนวกที่มีค่าเท่ากับ 34.62 กรัม จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน มีส่วนคลาดเคลื่อนประมาณ 4.7% เนื่องมาจากการคำนวณไม่แม่นยำจากการออกแบบชิ้นงานที่เป็นส่วนโค้งและความละเอียดในการวัดของเครื่องชั่งชิ้นงานนี้ด้วย

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากการดำเนินกระบวนการวิจัยและติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกแล้ว ก่อนที่จะทำการฉีดชิ้นงานจริงเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการตั้งค่างานฉีดพลาสติก ผู้วิจัยได้จำลองการฉีดพลาสติกด้วยโปรแกรมจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CAE) บนโปรแกรม Moldex3D R14 เพื่อหาเวลาในการฉีด ความดันฉีด เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น ลักษณะการไหลของพลาสติกหลอมเหลว การโก่งงอของชิ้นงานรวมถึงอุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ในช่วงเวลาต่างๆ

ในบทนี้เป็นการอภิปรายผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิและการหล่อเย็นที่มีต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองและการออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต โดยใช้เครื่องวัดความมันเงาด้วยมาตรฐาน ASTM : D523 ซึ่งวัดความมันเงาในโหมดสถิติในแต่ละตำแหน่งวัดทั้งหมด 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย ณ จุดวัดนั้นๆ จากนั้นแจกแจงออกมาเป็นตารางสำหรับใช้ในการสรุปและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ Minitab R17 ซึ่งอภิปรายผลตามหัวข้อดังต่อไปนี้

- การตรวจสอบแนวโน้มค่าเฉลี่ยของการออกแบบการทดลอง
- การตรวจสอบค่าความถูกต้องของแบบจำลอง
- การตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจและวิเคราะห์ความแปรปรวน
- สมการการพยากรณ์ค่าความมันเงาของชิ้นงาน
- แผนภาพพื้นผิวตอบสนองของความมันเงาและวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการดำเนินการ
- การหาค่าปัจจัยการฉีดที่เหมาะสมที่สุด

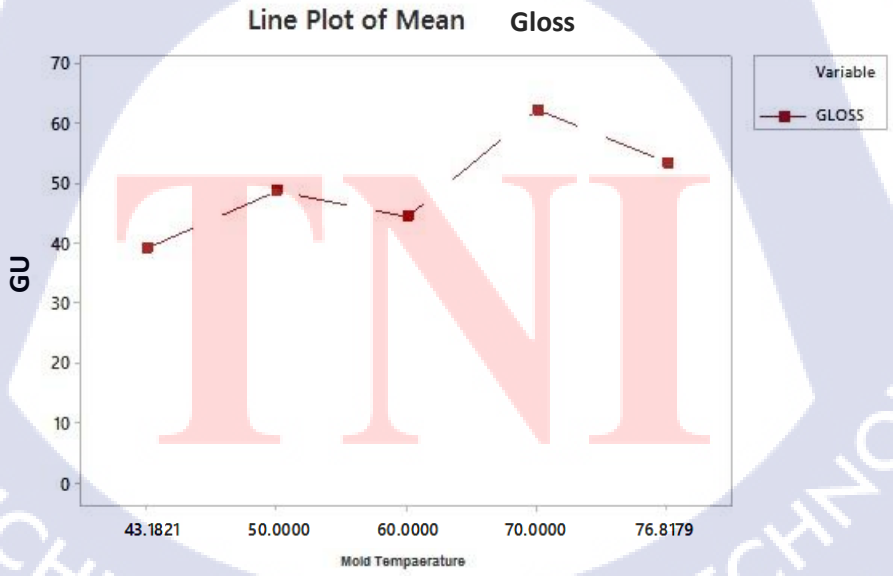
โดยทำการวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิการให้ความร้อน (ก่อนฉีด) และการหล่อเย็น (หลังฉีด) แก่แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกฝั่งคาวิตี้ที่มีผลต่อความมันเงาของชิ้นงานพลาสติกและคัดเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ของรอบเวลาการฉีดที่สัมพันธ์กับความมันเงาและรอยเชื่อมของพลาสติกด้วยการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของ DOE ผ่านความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระทั้งหมด 3 ตัวแปรตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นและนำเสนอในรูปแบบตารางและกราฟโครงร่าง (Contour Plot) สำหรับการซิมูเลชั่นในโปรแกรมช่วยจำลองการไหลจะเปรียบเทียบกับการทดลองจริงเพื่อหาค่าผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน ณ อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์จุดต่างๆ รวมถึงการลดการปรับตั้งเครื่องจักรในการวิจัยครั้งต่อไป

การสรุปผลข้อมูลจะสามารถสร้างสมการการทำนายของระดับความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกได้ การวิจัยนี้จะมีการเปรียบเทียบความถูกต้องระหว่างค่าที่วัดจริงและค่าที่ได้จากสมการทำนายระดับความมันเงา โดยอภิปรายเป็นตารางค่าความคาดเคลื่อน (% Error)

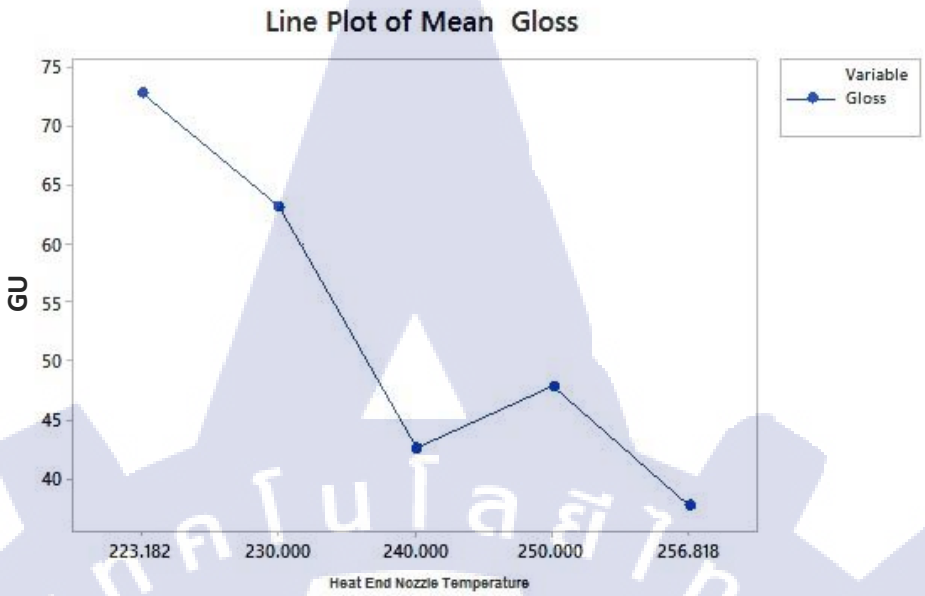
4.1 การตรวจสอบแนวโน้มค่าเฉลี่ยของการออกแบบการทดลอง

จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมคำนวณทางสถิติศาสตร์ที่ได้ข้อมูลการวัดค่าความมันเงาในบทที่แล้ว จากรูปที่ 4.1 แสดงแผนภาพแนวโน้มระหว่างค่าความมันเงาและอุณหภูมิแม่พิมพ์ โดยกำหนดให้ตัวแปรอุณหภูมิปลายหัวฉีดเป็นตำแหน่งจุดกึ่งกลาง จะเห็นว่าตำแหน่งการออกแบบที่ α = -1.68 จะมีค่าความมันเงาต่ำที่สุด และค่อยๆสูงขึ้นเมื่อเลื่อนไปทางด้านขวาในตำแหน่งการออกแบบที่ α = 1.68 กล่าวคือ ค่าความมันเงามีแนวโน้มค่อยๆสูงขึ้นจากอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่สูงขึ้น

ในรูปที่ 4.2 แสดงแผนภาพแนวโน้มระหว่างค่าความมันเงาและอุณหภูมิปลายหัวฉีด โดยกำหนดให้ตัวแปรอุณหภูมิแม่พิมพ์เป็นตำแหน่งจุดกึ่งกลาง จะเห็นว่าตำแหน่งการออกแบบที่ α = -1.68 จะมีค่าความมันเงาสูงที่สุด และค่อยๆต่ำขึ้นเมื่อเลื่อนไปทางด้านขวาในตำแหน่งการออกแบบที่ α = 1.68 กล่าวคือ ค่าความมันเงามีแนวโน้มค่อยๆลดลงจากอุณหภูมิปลายหัวฉีดที่สูงขึ้น เนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปของพลาสติกหลอมเหลวทำให้ตัววัสดุมีความเค้นภายในที่สูงและเกิดการเสื่อมสภาพจนเกิดการหดตัวของชิ้นงาน ค่าความมันเงาที่วัดได้จึงลดลงอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงค่าระหว่างความมันเงาและระดับของอุณหภูมิแม่พิมพ์



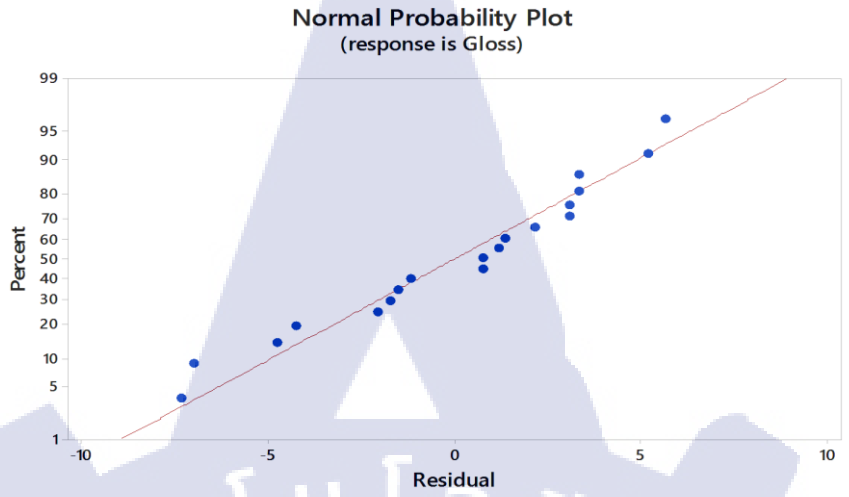
รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงค่าระหว่างความมันเงาและระดับของอุณหภูมิปลายหัวฉีด

4.2 การตรวจสอบค่าความถูกต้องของแบบจำลอง

ในการตรวจสอบค่าความมันเงาจากชิ้นงานฉีดพลาสติกทั้ง 19 ตัวอย่างการทดลอง แล้วจึงนำผลการทดลองที่ได้มาตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ด้วยการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง หากข้อมูลมีความเหมาะสมจึงนำมาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-square : R-Sq) และตรวจวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Anova) การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลมี 3 ขั้นตอน คือ การตรวจสอบการกระจายแบบปกติ การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการตรวจสอบเสถียรภาพของความแปรปรวน ในการวิจัยนี้ทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

<u>4.2.1 การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ</u>

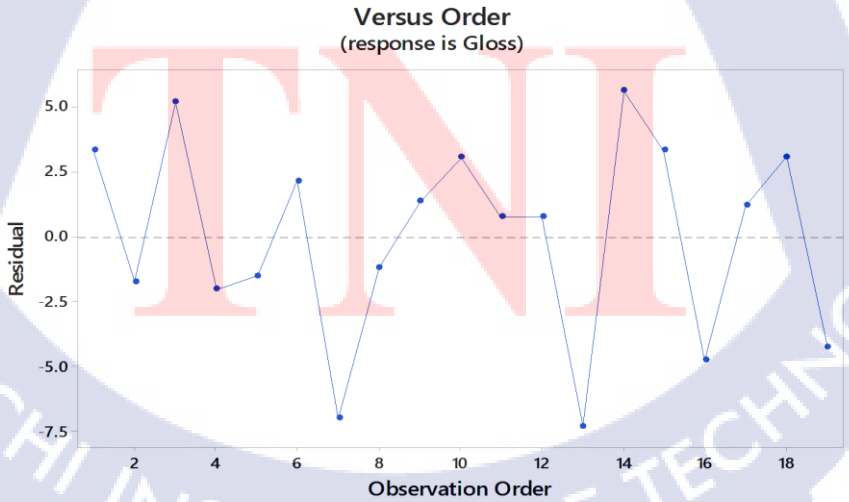
การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติเป็นการตรวจสอบส่วนตกค้างของข้อมูลว่ามีการกระจายแบบปกติหรือไม่ จากการพิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้างในรูปที่ 4.3 พบว่ามีการกระจายตัวเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างของค่าความมันเงาไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็นมากนัก จุดสีน้ำเงินจะเกาะกลุ่มตามเส้นค่าเฉลี่ยจึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างนี้เป็นการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.3 แผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง

<u>4.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล</u>

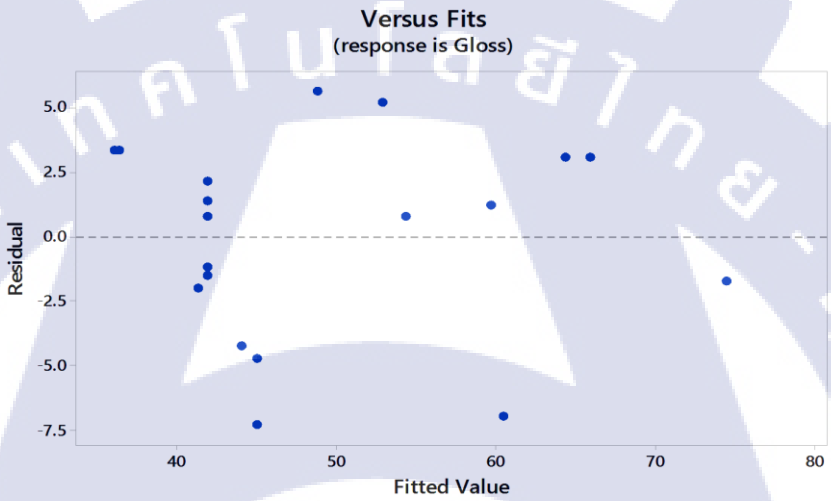
การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้างโดยใช้แผนภูมิการกระจายเพื่อสังเกตุลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลลงลนแผนภูมิว่ามีรูปแบบอิสระหรือไม่ จากการพิจารณาในรูปที่ 4.4 พบว่า ส่วนตกค้างของผลการวัดค่าความมันเงาไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนของการกระจายได้ กล่าวคือมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ (ไม่มีจุดที่ขึ้นหรือลงต่อเนื่องกัน 5 จุด) แสดงว่าข้อมูลค่าความมันเงามีความเป็นอิสระ



รูปที่ 4.4 แผนภาพการกระจายของส่วนตกค้างในแต่ละช่วงข้อมูล

4.2.3 การตรวจสอบเสถียรภาพของความแปรปรวน

การตรวจสอบเสถียรภาพของความแปรปรวนจะใช้แผนภาพการกระจายแต่ละระดับของปัจจัย เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.5 พบว่าส่วนตกค้างของค่าความมันเงาที่วัดได้มีการกระจายค่อนไปทางด้านซ้ายมากกว่าด้านขวาก็จริง แต่เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วยังอยู่ในช่วงที่พอรับได้จากเหตุผลที่ช่วงการทดสอบมีระยะที่กว้างทำให้ปัจจัยของอุณหภูมิที่ปลายหัวฉีดที่จุดแกนขอบล่างมีอิทธิพลในการแปรปรวนของแผนภาพการกระจายส่วนตกค้างนี้ จึงถือว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนเล็กน้อย



รูปที่ 4.5 แผนภาพการกระจายส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัย

จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่า ค่าส่วนตกค้างของข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ คือ ส่วนตกค้างมีการกระจายแบบแจกแจงปกติ ค่าส่วนตกค้างความเป็นอิสระต่อกัน และค่าความแปรปรวนของข้อมูลมีเสถียรภาพ จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลชุดที่ได้จากการวัดมีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจและวิเคราะห์ความแปรปรวน แต่การกระจายในแผนภาพของส่วนตกค้างก็ยังมีความผิดพลาดของการวิเคราะห์เล็กน้อย เนื่องมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่ปลายหัวฉีดมาช่วงการออกแบบที่กว้าง แต่ข้อมูลตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองสามารถเชื่อถือได้ในระดับที่น่าพอใจ

4.3 การตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจและวิเคราะห์ความแปรปรวน

4.3.1 การตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ

การตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Sq) เป็นค่าที่ใช้บอกร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระในสมการถดถอย จากผลการวิเคราะห์ค่าประมาณของค่าสัมประสิทธิ์เชิงถดถอยมีค่าเท่ากับ 0.8914 หมายความว่า ตัวแปรอิสระ (อุณหภูมิของแม่พิมพ์, อุณหภูมิปที่ปลายหัวฉีด และความเร็วฉีดย้ำ) สามารถอธิบายความผันแปรหรือการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม (ค่าความมันเงาที่วัดได้) ได้ร้อยละ 89.14 แสดงว่าแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้สร้างสมการการทำนายเพื่อหาค่าผลตอบได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 4.1

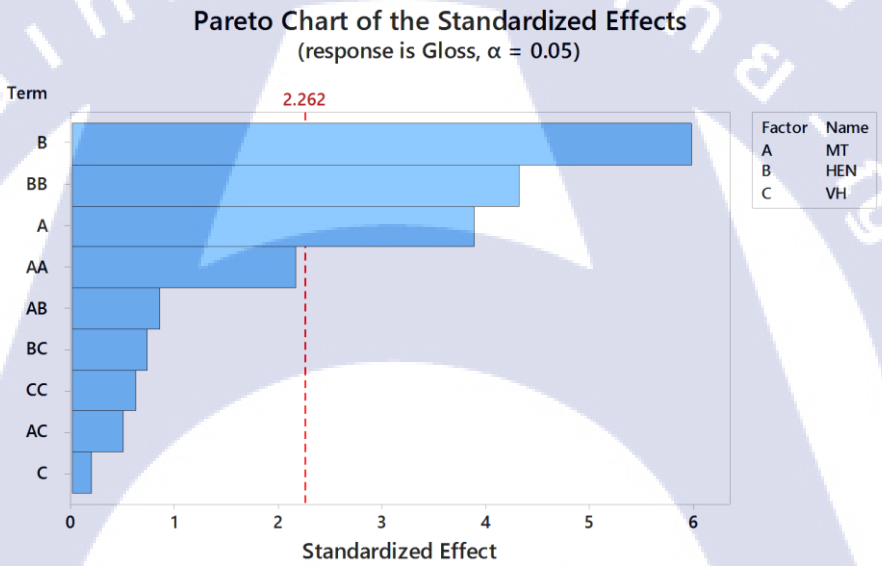
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการวิเคราะห์เชิงถดถอยของพื้นผิวตอบสนอง

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	41.83	2.41	17.33	0
MT	5.7	1.46	3.9	0.004
HEN	-8.77	1.46	-6	0
VH	0.29	1.46	0.2	0.848
MT*MT	3.18	1.46	2.17	0.058
HEN*HEN	6.32	1.46	4.32	0.002
VH*VH	0.92	1.46	0.63	0.544
MT*HEN	1.64	1.91	0.86	0.414
MT*VH	-0.95	1.91	-0.49	0.633
HEN*VH	-1.4	1.91	-0.73	0.481
S = 5.40432, R-Sq = 89.14%, R-Sq (adj) = 78.28%				

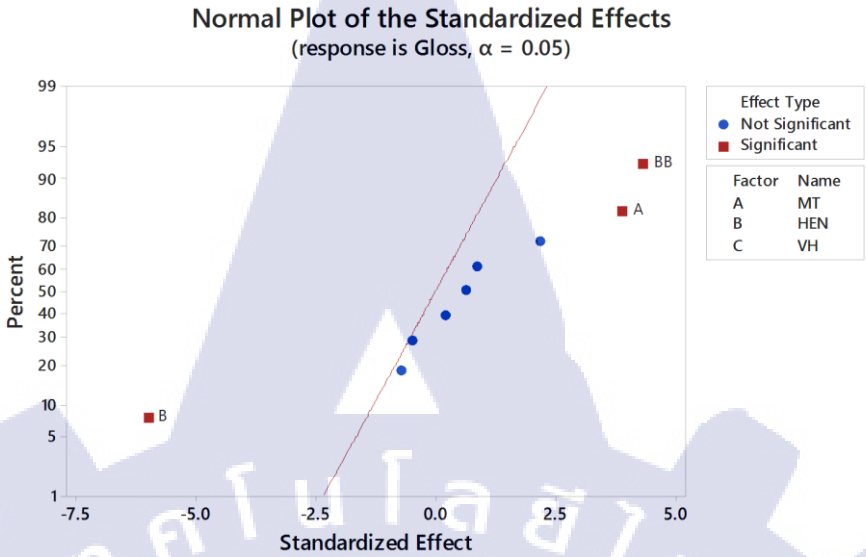
จากตารางที่ 4.1 สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ขั้นต่อไปได้แล้วนั้น จากการพิจารณาจากรูปที่ 4.6 พบว่าการแจกแจงตัวแปรอิสระของพจน์เชิงเส้น (Linear term) อุณหภูมิที่ปลายหัวฉีดมีอิทธิพลต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกมากที่สุดมีค่า P-value เท่ากับ 0 .001 ซึ่งมีค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด (การวิจัยนี้ใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ค่า P-value ที่มีนัยสำคัญทางสถิติต้องน้อยกว่า 0.05) รองลงมาคืออุณหภูมิของแม่พิมพ์มีค่า P-value เท่ากับ 0 .004 ก็มีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติ ส่วนความเร็วในการฉีดย้ำมีค่า P-value เท่ากับ

0.848 กล่าวคือ แทบไม่มีอิทธิพลต่อความมันเงาของชิ้นงานเลย เมื่อพิจารณาจากพจน์กำลังสอง (Interaction term) จะมีแค่พจน์ของอุณหภูมิที่ปลายหัวฉีดเท่านั้นที่พ้นเส้นประสีแดง ส่วนพจน์อันตรกิริยาทั้งหมดจะอยู่ด้านซ้ายมือของเส้นประสีแดงทั้งหมด หมายความว่าอิทธิพลของพจน์อันตรกิริยามีน้อยมาก

รูปที่ 4.7 แสดงข้อมูลของการกระจายอิทธิพลของข้อมูลสอดคล้องกับรูปที่ 4.6 กล่าวคือ จุดสีแดงที่อยู่ห่างจากเส้นตรงนั่นมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญมีความมันเงา ส่วนจุดสีน้ำเงินที่อยู่ใกล้เส้นตรงนั่นยิ่งอยู่ใกล้เส้นมากเท่าไรก็จะมีอิทธิพลต่อความมันเงาน้อยเท่านั่น หลังจากทราบอิทธิพลของตัวแปรอิสระที่ศึกษาแล้ว ในส่วนถัดไปจำเป็นต้องตรวจสอบความเพียงพอของข้อมูลเพื่อใช้สร้างสมพยากรณ์ต่อไป



รูปที่ 4.6 แผนภาพพาเรโตแสดงอิทธิพลของตัวแปรที่ศึกษา



รูปที่ 4.7 แผนภาพปกติแสดงอิทธิพลของตัวแปรอิสระที่ศึกษา

<u>4.3.2 การตรวจสอบและวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง</u>

การตรวจสอบและวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการตรวจสอบแหล่งผันแปรของแบบจำลอง จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความมันเงาที่ระดับความเชื่อมันร้อยละ 95 ในตารางที่ 4.1 พบว่า ค่า P-value ของพจน์เชิงเส้นมีค่าใกล้เคียง 0 และค่า P-value ของพจน์กำลังสองเท่ากับ 0.01 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด แสดงว่ามีส่วนโค้งเกิดขึ้นที่พื้นผิวตอบสนอง ส่วนพจน์ของอันตรกิริยามีค่า P-value เท่ากับ 0.687 ซึ่งมากกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติ สอดคล้องกับตารางที่ 4.2 ที่พจน์ของอันตรกิริยาไม่มีอิทธิพลต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก

ในส่วนของการตรวจสอบความเพียงพอของข้อมูลในตารางที่ 4.2 พบว่าค่า P-value ของค่าความสมรูป (Lack-of-fit) มีค่าเท่ากับ 0.06 ซึ่งมากกว่าระดับที่ขาดความเหมาะสมของสมการพยากรณ์ที่ค่า P-value ต้องมากกว่า 0.05 ทำให้สามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองนี้มีความเพียงพอของตัวแปรในสมการ ดังนั้นสามารถนำแบบจำลองนี้มาสร้างสมการพยากรณ์ได้โดยตรง

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การตอบสนองของพื้นผิวการตอบสนองต่อความมันเงาของชิ้นงาน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	2158.1	239.79	8.21	0.002
Linear	3	1496.09	498.7	17.07	0
Square	3	617.61	205.87	7.05	0.01
Interaction	3	44.4	14.8	0.51	0.687
Residual error	9	262.86	29.21		
Lack-of-Fit	5	252.65	50.53	19.8	0.06
Pure Error	4	10.21	2.55		
Total	18	2420.96			

4.4 สมการการพยากรณ์ค่าความมันเงาของชิ้นงาน

จากการคำนวณในโปรแกรมทางคณิตศาสตร์นี้ สามารถสร้างสมการพยากรณ์เป็นรูปสมการกำลังสองเชิงถดถอยมักจะนำมาใช้เมื่อรูปแบบการตอบสนองไม่เป็นเชิงเส้นตรง ซึ่งสมการพยากรณ์ดังกล่าวแสดงในสมการด้านล่าง ได้ดังนี้

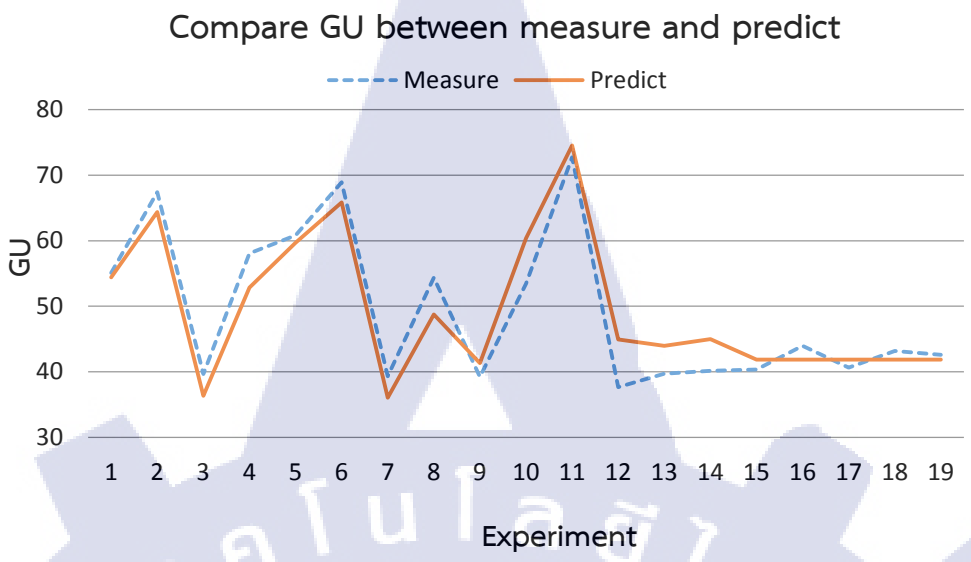
Gloss = 3,823 - 5.76 MT - 30.10 HEN + 1.20 VH + 0.0318 MT*MT + 0.0632 HEN*HEN + 0.0092 VH*VH + 0.0164 MT*HEN - 0.0095 MT*VH - 0.0140 HEN*VH

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ทั้งสามแทนค่าลงไปในสมการข้างต้นเพื่อตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนจากการวัดที่ชิ้นงานจริงและค่าที่ได้จากการคำนวณ จะแสดงดังตารางที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าจะมีค่าความเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่าง -10% ถึง 19% ซึ่งเมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนทั้งหมดจะอยู่ที่ 0.64% เพื่อใช้ในการพยากรณ์ความมันเงาในอนาคต

ตารางที่ 4.3 ตารางเปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อนของชิ้นงานจากสมการพยากรณ์และค่าที่วัดจริง

การทดสอบที่	ระดับความมันเงา (GU)	ค่าจากสมการพยากรณ์	% Error
1	55.09	54.40	**-1.26**
2	67.41	64.36	**-4.53**
3	39.64	36.32	**-8.39**
4	58.07	52.84	**-9.01**
5	60.80	59.70	**-1.82**
6	68.90	65.86	**-4.41**
7	39.29	36.02	**-8.33**
8	54.38	48.74	**-10.38**
9	39.19	41.32	**5.42**
10	53.41	60.39	**13.08**
11	72.73	74.54	**2.48**
12	37.65	44.93	**19.33**
13	39.68	43.96	**10.77**
14	40.15	44.96	**11.98**
15	40.32	41.86	**3.82**
16	43.97	41.86	**-4.81**
17	40.64	41.86	**3.00**
18	43.18	41.86	**-3.06**
19	42.58	41.86	**-1.70**

จากรูปที่ 4.8 แสดงกราฟแจกแจงเปรียบเทียบค่าความมันเงาระหว่างการวัดจริงด้วยเครื่องวัดความมันเงาตามมาตรฐาน ASTM : D523 กับสมการพยากรณ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ จะเห็นว่าแผนภาพของกราฟทั้งสองเส้นมีความใกล้เคียงกันและมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย สามารถนำมาใช้พยากรณ์ค่าความมันเงาในอนาคตได้ โดยสามารถคำนวณเพื่อหาค่าความมันเงาที่ต้องการที่ผิวชิ้นงานฉีดพลาสติกได้ทันที

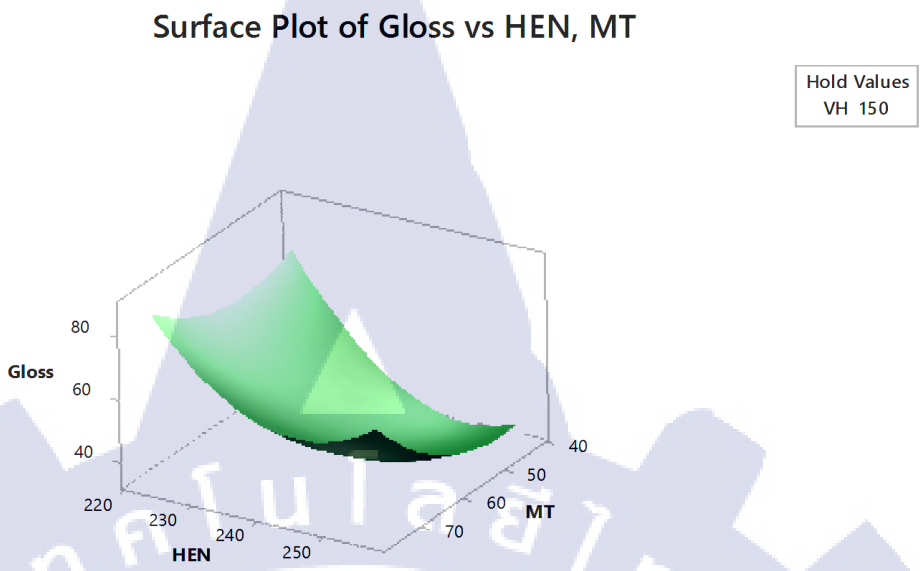


รูปที่ 4.8 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบความมันเงาระหว่างค่าที่วัดจริงกับค่าพยากรณ์

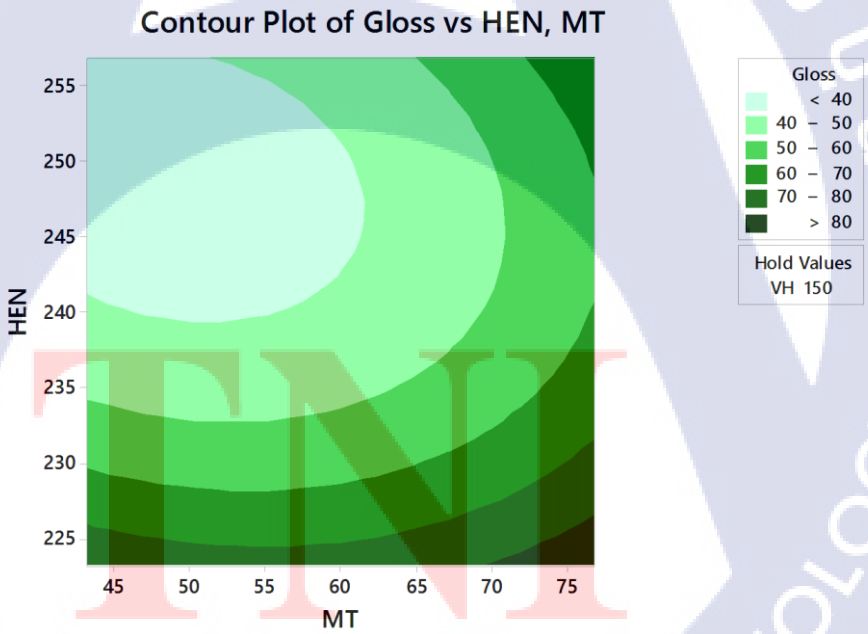
4.5 แผนภาพพื้นผิวตอบสนองของความมันเงาและวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการดำเนินการ

เมื่อได้สมการสำหรับการพยากรณ์ค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกแล้ว จึงนำมาสร้างกราฟพื้นผิวผลตอบของค่าความมันเงาที่วัดได้และกราฟโครงร่าง รูปที่ 4.8 แสดงพื้นผิวผลตอบของค่าความมันเงาระหว่างอุณหภูมิของแม่พิมพ์กับอุณหภูมิปลายหัวฉีด โดยกำหนดให้ระดับของความเร็วฉีดอยู่ที่ระดับกลาง (การออกแบบคอมโพสิตที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลาง) ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 150 มิลลิเมตรต่อวินาที จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ปลายหัวฉีดสูงขึ้นจะทำให้ค่าความมันเงามีค่าที่สูงตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาควบคู่กับอุณหภูมิของแม่พิมพ์จะเห็นว่า ค่าความมันเงาที่ได้จะมีค่าสูงเมื่อใช้อุณหภูมิที่ปลายหัวฉีดที่การออกแบบที่จุดแกนขอบล่างหรืออุณหภูมิปลายหัวฉีดที่ต่ำกว่า อาจเนื่องมาจากความร้อนที่พลาสติกหลอมเหลวสัมผัสกับโพรงผิวของแม่พิมพ์ที่ร้อนด้วยกัน ทำให้คุณภาพของพลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพ (Degradations) ส่งผลให้ค่าความมันเงามีค่าลดลงได้

ในส่วนปัจจัยของอุณหภูมิของแม่พิมพ์สรุปได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 4.9 โดยสามารถสรุปว่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่สูงขึ้นจะทำให้ผลของค่าความมันเงามีค่าที่สูงขึ้นตามลำดับ โดยกราฟเส้นโครงร่างที่เลื่อนไปทางขวาของกราฟแสดงถึงค่าความมันเงาที่ค่อยๆสูงขึ้นตามลำดับ



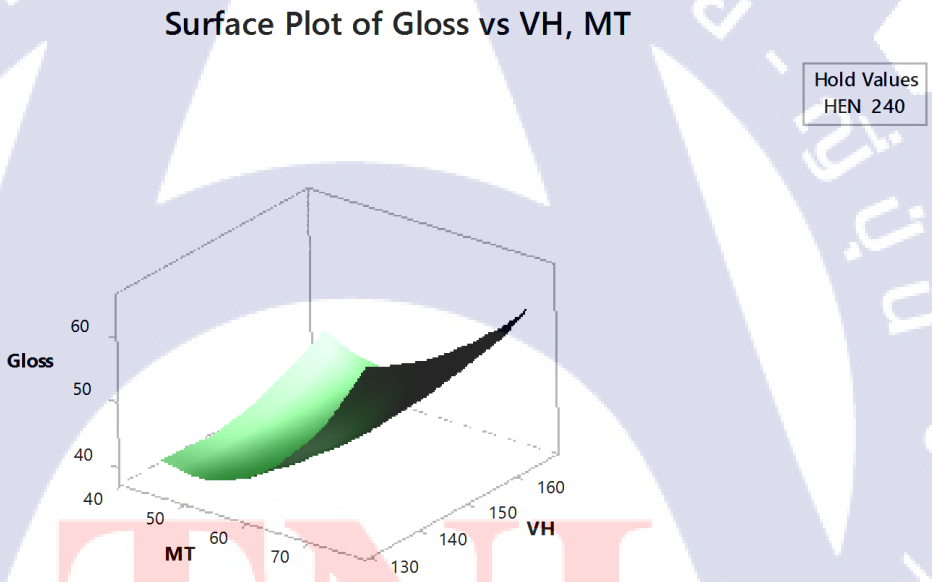
รูปที่ 4.9 ภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์และอุณหภูมิปลายหัวฉีด



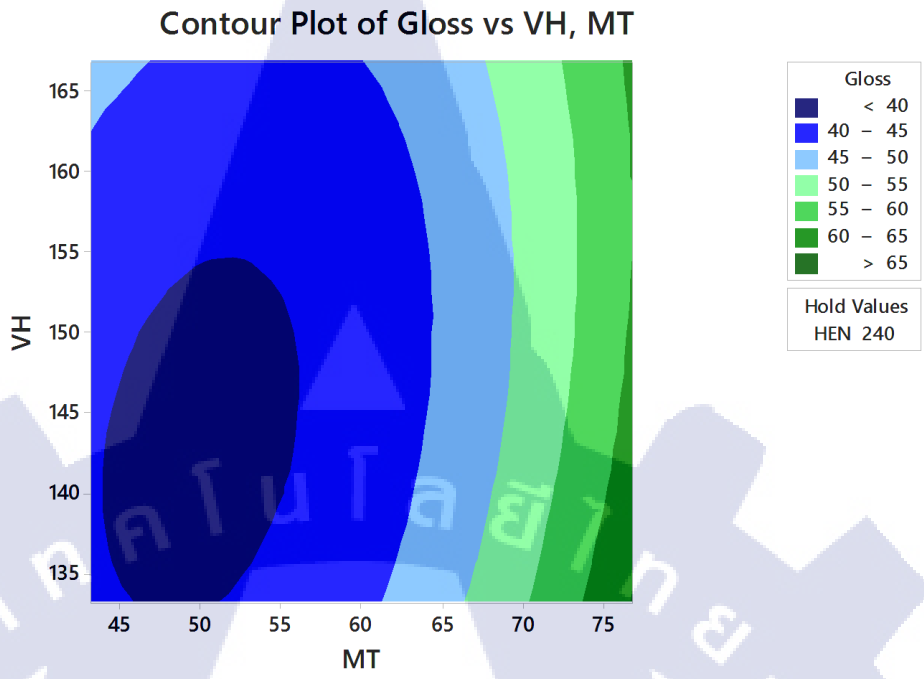
รูปที่ 4.10 กราฟโครงร่างระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์และอุณหภูมิปลายหัวฉีด

จากภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์และความเร็วฉีดย้ำโดยกำหนดให้อุณหภูมิปลายหัวฉีดอยู่ที่ระดับจุดกึ่งกลางของการออกแบบการทดลองในรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อค่าความมันเงาจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์ค่อยๆสูงขึ้น เมื่อนำภาพพื้นผิวตอบสนองมาแสดงในลักษณะกราฟโครงร่างในรูปที่ 4.11 และกำหนดระดับของอุณหภูมิปลายหัวฉีดที่จุดกึ่งกลางจะเห็นว่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิแม่พิมพ์มีลักษณะเกือบจะเป็นเส้นตรงในแต่ละพื้นที่ของเส้นโครงร่างอย่างชัดเจน ซึ่งสรุปได้ทางสถิติว่าปัจจัยของอุณหภูมิแม่พิมพ์มีผลต่อค่าความมันเงาของชิ้นงานพลาสติกอย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับปัจจัยของความเร็วฉีดย้ำในรูปที่ 4.10 และ 4.11 นั้นสรุปได้ว่าไม่มีอิทธิพลต่อค่าความมันเงาของชิ้นงานพลาสติก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วฉีดย้ำนั่นส่งผลต่อค่ามันเงาที่วัดได้มีค่าน้อยมากสอดคล้องกับค่า P-value ที่มีค่าเกินกำหนดของระดับนัยสำคัญ



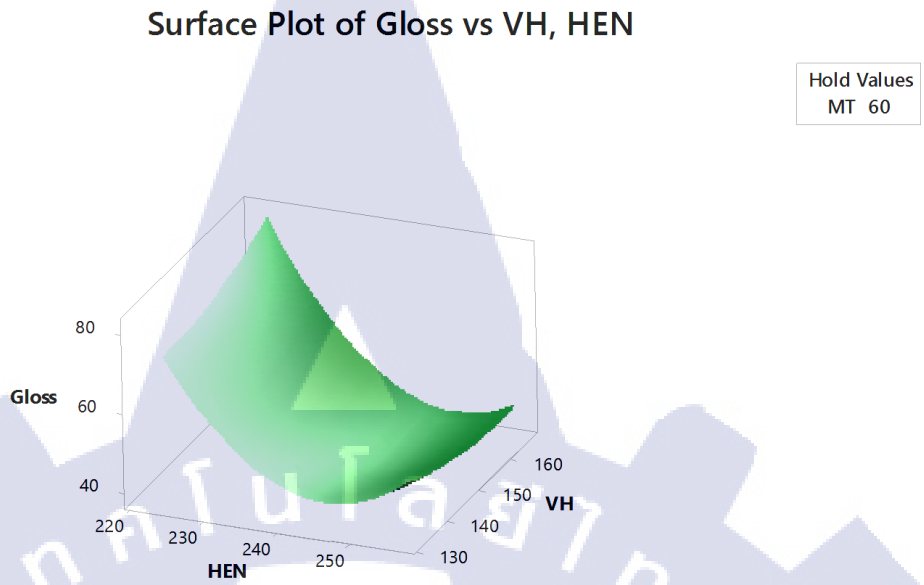
รูปที่ 4.11 ภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์และความเร็วฉีดย้ำ



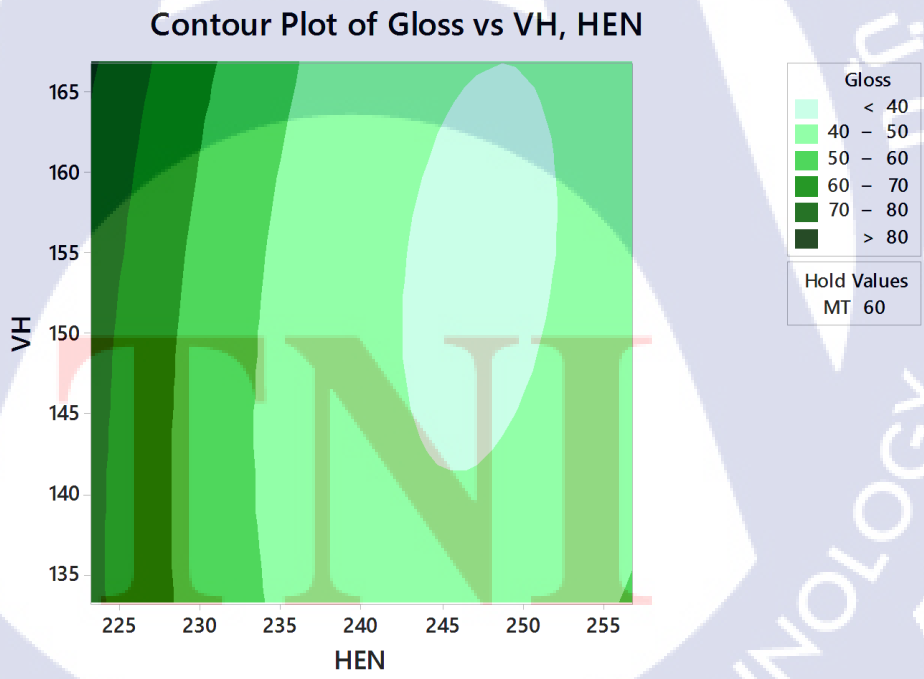
รูปที่ 4.12 กราฟโครงร่างระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์และความเร็วฉีดย้ำ

จากภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างอุณหภูมิปลายหัวฉีดและความเร็วฉีดย้ำโดยกำหนดให้อุณหภูมิแม่พิมพ์อยู่ที่ระดับจุดกึ่งกลางของการออกแบบการทดลองในรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อค่าความมันเงาจะมีค่าลดลงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ปลายหัวฉีดค่อยๆสูงขึ้น ซึ่งในกรณีนี้อาจสรุปได้ว่าประเภทของพลาสติกชนิดที่ใช้ทำการทดลองเกิดการเสื่อมสภาพเมื่อใช้อุณหภูมิการฉีดที่สูงเกินไป หลังจากพลาสติกเย็นตัวลดแล้วทำให้เกิดการแปรสภาพของพื้นผิวชิ้นงานจนทำให้ค่าความมันเงาที่วัดได้มีค่าต่ำลง เมื่อนำภาพพื้นผิวตอบสนองมาแสดงในลักษณะกราฟโครงร่างในรูปที่ 4.12 และกำหนดระดับของอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่จุดกึ่งกลางจะเห็นว่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ปลายหัวฉีดลู่เข้าทางด้านขวามีลักษณะเกือบจะเป็นเส้นตรงในแต่ละพื้นที่ของเส้นโครงร่างอย่างชัดเจน ซึ่งสรุปได้ทางสถิติว่าปัจจัยของอุณหภูมิปลายหัวฉีดมีผลต่อค่าความมันเงาที่ลดลงของชิ้นงานพลาสติกอย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับปัจจัยของความเร็วฉีดย้ำในรูปที่ 4.12 และ 4.13 นั้นสรุปได้ว่ามีอิทธิพลต่อค่าความมันเงาของชิ้นงานพลาสติกเล็กน้อย เนื่องจากการใช้ความเร็วในการฉีดพลาสติกในโพรงแบบนั่นเป็นระบบปิด ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วที่มากขึ้นจะทำให้เกิดแรงดันในโพรงแบบมากขึ้นจนส่งผลให้อุณหภูมิในการฉีดสูงขึ้นเล็กน้อยอีกด้วย ด้วยเหตุผลนี้จึงเป็นปัจจัยเสริมที่ทำให้พลาสติกมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจนเกิดปัญหาการเสื่อมภาพของวัสดุด้วย

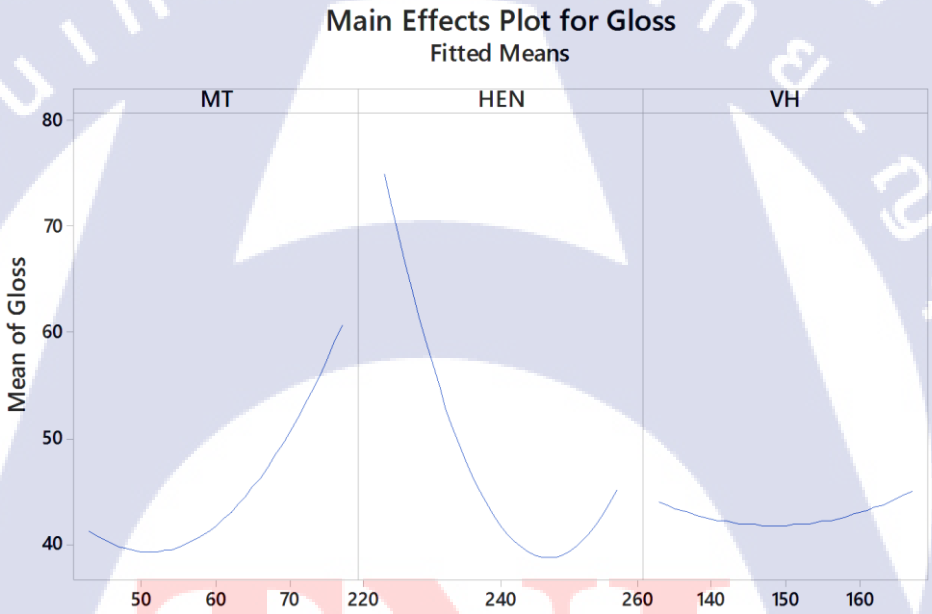


รูปที่ 4.13 ภาพพื้นผิวตอบสนองระหว่างอุณหภูมิปลายหัวฉีดและความเร็วฉีดย้ำ



รูปที่ 4.14 กราฟโครงร่างระหว่างอุณหภูมิปลายหัวฉีดและความเร็วฉีดย้ำ

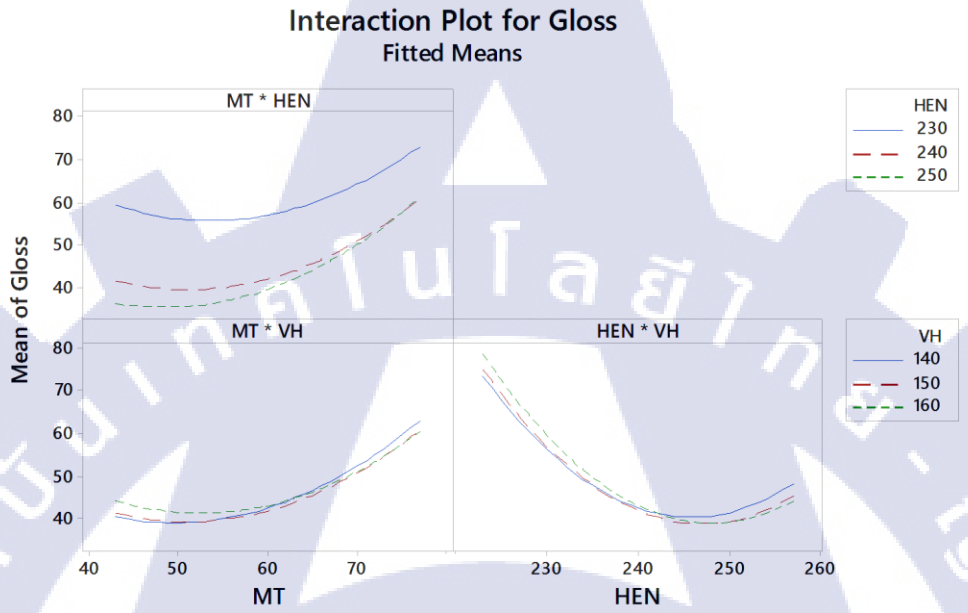
หลังจากศึกษาอิทธิพลของความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามแล้ว สามารถสรุปอิทธิพลหลัก (Main effect) ได้ดังรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่สูงขึ้นส่งผลความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกโดยตรงเนื่องจากความร้อนที่ผิวสัมผัสควบคุมพลาสติกหลอมเหลวในหลอมแนบติดกับผิวแม่พิมพ์ได้ดียิ่งเยอะ ปัจจัยของอุณหภูมิปลายหัวฉีดส่งผลตรงข้ามกัน เนื่องจากอุณหภูมิที่ออกแบบพิสัยที่กว้างและสูงเกินไปทำให้พลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพ รวมถึงมีความเค้นสะสมในชิ้นงานมากทำให้ชิ้นงานมีอัตราการหดตัวที่สูง ทำให้ความมันเงาที่ได้มีค่าลดลงนั้นเอง ส่วนความดันฉีดย้ำแม้ว่าจะอิทธิพลในระดับที่ต่ำกว่านัยสำคัญ แต่ผลลัพธ์นั้นมีแนวโน้มที่ทำให้ความมันเงาสูงขึ้นจากการใช้ความดันฉีดย้ำที่สูงขึ้นเรื่อยๆ เพราะว่าความเร็วนี้ช่วยฉีดให้พลาสติกหลอมเหลวนั้นไหลเต็มแม่พิมพ์และอัดแน่นที่ผิวฝั่งคาวิตี้ด้วย แต่มีอิทธิพลพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.15 อิทธิพลหลักของตัวแปรทั้งสามที่ใช้ในงานวิจัย

รูปที่ 4.16 แสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปรทั้งสามที่ใช้ในงานวิจัยจากอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์และอุณหภูมิปลายหัวฉีดจะมีแนวโน้มที่ค่าความมันเงาค่อยๆ สูงขึ้น โดยที่ตัวแปรสูงทั้งสองสูงขึ้นตาม แต่จากกราฟจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของหัวฉีดควรจะใช้อุณหภูมิที่ต่ำจะให้ค่าความมันเงาที่สูงกว่าซึ่งสอดคล้องกับค่าอุณหภูมิของพลาสติกชนิดนี้จากผู้ผลิต สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์และความเร็วฉีดย้ำนั้นเป็นตัวแปรที่เมื่อค่อยๆ สูงขึ้นทั้งคู่จะส่งผลให้ค่าความมันเงาสูงขึ้นตาม แต่จะมีอิทธิพลร่วมกันเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อตรวจสอบจากค่านัยสำคัญที่ร้อยละ 95 ส่วน

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิปลายหัวฉีดและความเร็วฉีดย้ำนั้น กลับส่งผลให้ค่าความมันเงาค่อยๆ ลดลงเพราะอิทธิพลจากความเร็วฉีดย้ำนั้นมีผลน้อยเมื่อเทียบกับอิทธิพลของอุณหภูมิปลายหัวฉีดที่สูงเกินไป ทำให้ชิ้นงานมีค่าความมันเงาที่ค่อยๆลดลงเมื่อตัวแปรทั้งสองมีค่าสูงขึ้น

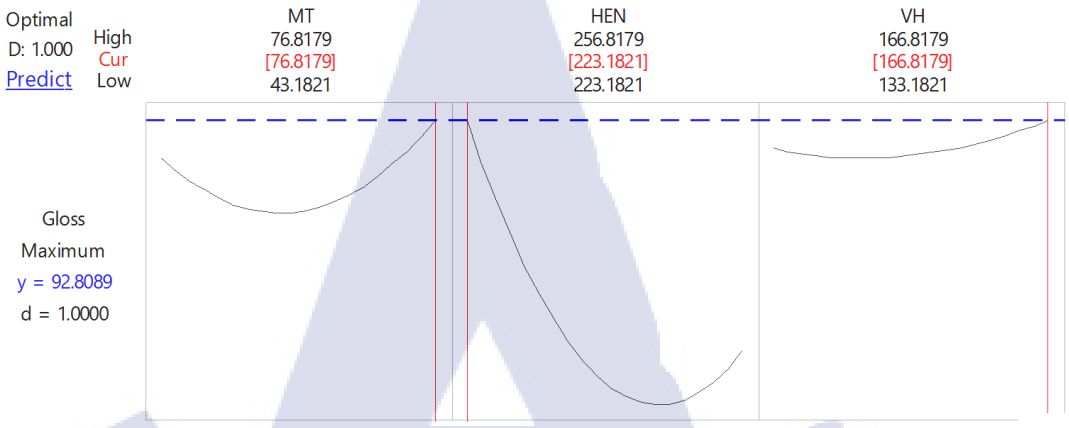


รูปที่ 4.16 อิทธิพลร่วมของตัวแปรทั้งสามที่ใช้ในงานวิจัย

4.6 การหาค่าปัจจัยการฉีดที่เหมาะสมที่สุด

การหาค่าปัจจัยการฉีดที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ค่าความมันเงาที่สูงที่สุดจากโปรแกรม Minitab โดยใช้ฟังก์ชั่น Response optimization เป็นรูปแบบทางสถิติที่ใช้หาค่าจากข้อมูลตัวแปรที่ศึกษาและใช้วัดความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite desirability : D) โดยช่วงความพึงพอใจจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 ถ้าค่า D มีค่าเข้าสู่ 1 หมายถึง ผลตอบนั้นจะได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ ในการทดลองนี้ได้ค่า D เท่ากับ 1 แสดงว่าสามารถใช้ปรับตั้งค่าตัวแปรเหล่านี้ในการทดลองในอนาคตด้วยความเชื่อมั่นในการพยากรณ์ได้โดยตรง

จากการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชั่น Response optimization พบว่าการปรับตั้งพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความมันเงาที่สูงสุด คือ ใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่จุดแกนด้านบนที่อุณหภูมิ 76.82 องศาเซสเซียส อุณหภูมิปลายหัวฉีดที่อุณหภูมิ 223.18 องศาเซสเซียสและความเร็วฉีดย้ำที่ 166.82 มิลลิเมตรต่อวินาทีดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งเมื่อใช้ตามฟังก์ชั่นที่กล่าวมานี้ตามแบบจำลองจะได้ค่าความมันเงาที่สูงสุดที่ 92.80 GU ที่มีค่าความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 1



รูปที่ 4.17 แผนภาพแสดงการหาจุดที่มีความมันเงาสูงสุดของตัวแปรทั้งสาม

จากตารางด้านบนจะเห็นได้ว่าตัวอย่างการทดลองที่ 11 มีค่าความมันเงาสูงที่สุดสามารถวัดค่าเฉลี่ยได้ที่เท่ากับ 72.73 GU และตัวอย่างการทดลองที่ 12 จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 37.65 ซึ่งเป็นการออกแบบที่จุดแกนของการทดลองนี้ แต่เราไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าปัจจัยหรือตัวแปรใดมีอิทธิพลที่ส่งผลต่อความมันเงาได้อย่างมีนัยสำคัญทางคณิตศาสตร์ ในการวิจัยนี้จึงสรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินการด้วยโปรแกรม Minitab R17 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การตอบสนองต่อความมันเงาของชิ้นงานเพื่อให้งานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

บทที่ 5
บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและการหล่อเย็นที่พื้นผิวของแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ในกระบวนการฉีดที่มีผลต่อความมันเงาของชิ้นส่วนพลาสติกการวิจัยนี้สามารถสรุปผลการดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

<u>5.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิและการหล่อเย็นที่พื้นผิวของแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ในกระบวนการฉีดที่มีผลต่อความมันเงาของชิ้นส่วนพลาสติก</u>

ผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิที่ปลายหัวฉีด (HEN) มีอิทธิพลที่ทำให้พลาสติกมีความมันเงาสูงที่สุด โดยพลาสติกชนิดที่ใช้ทำการวิจัยนี้ คือ พลาสติกประเภทเอบีเอส (Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS) เกรดที่ใช้เป็นเกรดใช้งานทั่วไป (General purpose : GP) ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีด ได้แก่ เวลาในการฉีด 0.5 วินาที เวลาฉีดย้ำ 3 วินาที ความดันฉีด 33 เมกะปาสคาล ความเร็วฉีด 32.5 มิลิเมตรต่อวินาที ซึ่งจากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความมันเงา พบว่าอุณหภูมิที่ปลายหัวฉีดประมาณ 220 องศาเซสเซียสมีค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการควบคุมความมันเงา จากผลการวิจัยนี้พบว่าอุณหภูมิดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมพารามิเตอร์ด้านอุณหภูมิได้ โดยไม่จำเป็นต้องสูงกว่านี้ก็สามารถทำให้ชิ้นงานมีความมันเงาได้ ถ้าใช้อุณหภูมิที่สูงกว่านี้จะทำให้พลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพได้ จากอุณหภูมิและความดันที่มากเกินไปทำให้พลาสติกเมื่อเย็นตัวลงแล้วมีความเค้นสะสมกระจายในชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานเสียรูปหรือหดตัวมากกว่าปกติและค่าความมันเงาที่วัดได้จึงมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงได้

ปัจจัยของอุณหภูมิแม่พิมพ์แสดงผลชัดเจนจากตารางค่าสัมประสิทธิ์ของพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกมีค่าที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากพลาสติกหลอมเหลวสัมผัสกับผิวแม่พิมพ์ที่ความร้อนสูงจนเหมือนเกิดชั้นฟิล์มบางๆ จนพื้นผิวชิ้นงานสามารถสะท้อนแสงได้มากขึ้นส่งผลให้มีค่าความมันเงาที่สูง แต่ในทางอุตสาหกรรมหมายความว่าจำเป็นต้องใช้พลังงานจำนวนมากเพื่อให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ตลอดเวลาเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ ดังนั้นในทางปฏิบัติต้องคำนึงถึงความจำเป็นของชิ้นงานที่ต้องการให้มีความมันเงาในระดับที่เหมาะสมด้วย

สำหรับปัจจัยของความเร็วฉีดย้ำมีอิทธิพลต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกต่ำมากบนค่านัยสำคัญทางคณิตศาสตร์ แต่จากการทดลองและสรุปจากฟังก์ชั่นของโปรแกรม Minitab ในเมนู Response optimization ควรใช้ความเร็วฉีดย้ำที่มีค่าสูงจะทำให้ชิ้นงานฉีดมีความมันเงาที่สูง

เนื่องจากจากปัจจัยทางอุณหภูมิของระบบที่สูงขึ้นจากความเร็วฉีดที่สูงขึ้นในระบบปิดทำให้อุณหภูมิแม่พิมพ์มีค่าสูงขึ้นตามส่งผลสอดคล้องกับปัจจัยของอุณหภูมิแม่พิมพ์สูงขึ้นทำให้ความมันเงาขึ้น ความเร็วฉีดย้ำที่มีค่าสูงก็ทำให้ความมันเงาของชิ้นงานสูงขึ้นตามแม้ว่าจะมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อย

<u>5.1.2 การหาพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดพลาสติกของวัสดุเอบีเอสเหมาะสมสำหรับความมันเงาของชิ้นส่วนพลาสติกด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองร่วมกับการออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต</u>

จากการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยของตัวแปรอิสระทั้งสามเพื่อให้ได้ค่าความมันเงาที่สูงที่สุดสำหรับวัสดุพลาสติกประเภทเอบีเอส โดยใช้ร่วมกับการออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต พบว่า ปัจจัยทั้งสาม ได้แก่ อุณหภูมิปลายหัวฉีด (HEN) อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (MT) และความเร็วในการฉีดย้ำ (VH) มีผลต่อค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก ซึ่งใช้จำนวนการทดลองทั้งหมด 19 ตัวอย่างการทดลองและมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง โดยทั้งสามตัวแปรที่เกี่ยวเนื่องซึ่งกันและกัน และสามารถทำนายสมการพยากรณ์ของค่าความมันเงาที่เหมาะสมที่สุดได้เท่ากับ 3,823 - 5.76 MT - 30.10 HEN + 1.20 VH + 0.0318 MT*MT + 0.0632 HEN*HEN + 0.0092 VH*VH + 0.0164 MT*HEN - 0.0095 MT*VH - 0.0140 HEN*VH โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.8914 เมื่อนำมาหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดโดยฟังก์ชั่น Response optimization พบว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ชิ้นงานฉีดพลาสติกประเภทเอบีเอสมีความมันเงาสูงที่สุด คือ ใช้อุณหภูมิปลายหัวฉีดที่ 223.18 องศาเซสเซียส อุณหภูมิของแม่พิมพ์ 76.82 องศาเซสเซียส และความเร็วฉีดย้ำ 166.82 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำให้ได้ค่าความมันเงาสูงที่สุดที่ 92.8 GU โดยมีค่าพึงพอใจรวมสมบูรณ์เท่ากับ 1 จากสมการพยากรณ์พบว่าค่าคลาดเคลื่อนจากการทดลองจริงเมื่อเทียบกับการประมาณค่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 80.67 เนื่องจากพจน์ของอันตรกิริยามีผลต่อความเที่ยงตรงของการประมาณค่าที่เหมาะสมที่สุด

5.2 อภิปรายผล

การฉีดพลาสติกในปัจจุบันนี้ในอุตสาหกรรมส่วนมากจะใช้ในงานด้านยานยนต์และอุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นหลัก ซึ่งชิ้นงานเหล่านี้มีกระบวนการพ่นสีหรือชุบเคลือบสีผิวทำให้มีต้นทุนในการจัดการในกระบวนนี้ งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีที่ทำให้กระบวนพ่นหรือชุบเคลือบสีนี้หมดไป จึงจำเป็นต้องลดข้อบกพร่องด้านคุณภาพของชิ้นส่วนพลาสติกสำเร็จรูปเช่น ลดรอยเชื่อมพลาสติก ลดรอยทางฉีด และลดปัญหาการฉีดไม่เต็มชิ้นงาน เป็นต้น และเพื่อพัฒนาและลดขั้นตอนกระบวนการพ่นสีในกระบวนการผลิตจากชิ้นส่วนพลาสติกให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ผู้วิจัยได้ทำการฉีดชิ้นงานพลาสติกที่มีความมันเงาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและทำการเปรียบเทียบกับชิ้นงานพลาสติกความ

มันเงาต่ำและชิ้นงานฉีดพลาสติกที่มีความมันเงาสูงดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของผิวของชิ้นงานฉีดพลาสติก จากการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการฉีดพลาสติกนี้ส่งผลได้อย่างชัดเจนว่ามีอิทธิพลด้านอุณหภูมิและการหล่อเย็นมีผลต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก ซึ่งในทางปฏิบัติในเชิงอุตสาหกรรมจริงสามารถเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานพลาสติกได้โดยตรง ทั้งนี้เพื่อลดระยะเวลาในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการฉีดพลาสติกเพื่อให้มีความมันเงาสูง และสามารถใช้สมการพยากรณ์จากการศึกษาวิจัยนี้ได้

รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบชิ้นงานฉีดพลาสติกที่มีความมันเงาสูง (ซ้าย) และชิ้นงานฉีดพลาสติกที่มีความมันเงาต่ำ (ขวา)

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. การควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ในการทดลองนั้นวัดค่าด้วยเทอร์โมคัปเปิลในแต่ละตำแหน่งโดยตรงซึ่งต้องควบคุมให้แต่ละวัฏจักรมีค่าเท่ากัน ในการทดลองจริงนั้นเป็นไปได้ยากมากที่จะควบคุมอุณหภูมิของท่อให้ความร้อนและความเย็นผ่านวาล์วเปิด-ปิดโดยตรง เนื่องจากห้องวิจัยไม่มีอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจจับที่ตำแหน่งที่ต้องการจะวัดที่ผิวของแม่พิมพ์โดยตรง สาเหตุจากอุปกรณ์เหล่านั้นมีราคาที่สูงมากและมีการใช้งานที่ยุ่งยากกว่า ในการวิจัยนี้จึงใช้เทอร์โมคัปเปิลในการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการวิจัยเท่านั้น สำหรับการวิจัยในอนาคตอาจจะใช้อุปกรณ์ที่มีความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ผลลัพธ์ของการทดลองดีขึ้น

2. ในงานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยเฉพาะที่มาจากการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์เท่านั้น ทำให้ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความมันเงาของผิวชิ้นงานฉีดพลาสติกตามทฤษฎีในด้านอื่นๆ เช่น ความเรียบผิวของแม่พิมพ์ วัสดุที่ใช้ในการฉีด เป็นต้น ไม่ได้ถูกแปรผันตามแต่ละตัวอย่างการทดลอง ซึ่งอาจจะให้ผลลัพธ์ของค่าความมันเงาที่สูงกว่าปรับค่าพารามิเตอร์ในการฉีดเพียงอย่างเดียว ถือเป็นข้อเสนอแนะในแนวทางการวิจัยในอนาคตต่อไป

3. จากการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกนี้ได้ใช้ในงานวิจัยที่มีความเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งแรงในชิ้นงานมาตรฐานจึงออกแบบแม่พิมพ์ให้มีความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร เนื่องจากตามมาตรฐาน ASTM : D638 ได้กำหนดไว้จะอยู่ในช่วงความหนามากกว่า 3.2 มิลลิเมตรขึ้นไปแต่ไม่เกิน 5 มิลลิเมตร ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้ขนาดความหนา 5 มิลลิเมตรเพื่อให้สามารถทดสอบแรงดึงได้เหมาะสมกับสมบัติทางกล แต่จากการทดลองการฉีดพลาสติกและคุณสมบัติทางกายภาพของพลาสติกมีการยุบตัว (Sink mark) ทำให้การเย็นตัวลงจะมีการหดตัวของพลาสติกทำให้ค่าความมันเงาที่วัดได้มีค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งลักษณะของชิ้นงานเป็นแบบแท่งยาวตลอดชิ้นงานและตำแหน่งที่ทำการวัดนั้นเป็นจุดกึ่งกลางของชิ้นงานเป็นเหตุให้เกิดความเค้นสะสมในชิ้นงานที่ตำแหน่งนั้น ค่าความมันเงาที่วัดอาจจะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย ดังนั้นในงานวิจัยในอนาคตผู้วิจัยเสนอให้มีการออกแบบชิ้นงานที่มีความหนาที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการยุบตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

[1] กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์, *"สินค้าออกสำคัญ 10 อันดับแรกของประเทศไทยปีพุทธศักราช 2559,"* [Online].Available: http://www2.ops3.moc.go.th/, [Accessed: 11 มีนาคม 2560].

[2] ASTM International, "*Standard Test Method for Specular Gloss*," [Online]. Available: https://www.astm.org/Standards/D523.htm [Accessed: April 20, 2017].

[3] W. Battenfeld, "*Foam Injection Molding 2.0*," [Online].Available: http://www.plastics.gl/injection-moulding/foam-injection-molding [Accessed: March 18, 2017].

[4] N.S. Rao et al., "Optimization of cooling systems in injection molds by an easily applicable analytical model," *Journal of Reinforces Plastics and Composites*, vol. 21, no. 5, pp. 451-459, March 2002.

[5] H.S. Park and X. P. Dang, "Structural optimization based on CAD-CAE integration and metamodeling techniques," *Computer-Aided Design*, vol. 42, no. 10, pp. 889-902, October 2010.

[6] วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม, *งานฉีดพลาสติก*, กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2540.

[7] IMBOTEC GROUP, (2017), "*How is Gloss Measured*?," [Online]. Available: http://www.gloss-meters.com/GlossIntro2.html [Accessed: April 20, 2017].

[8] K. Leiviskä, "*Introduction to Experiment Design*," University of Oulu, Control Engineering Laboratory, 2013.

[9] Moldex3D, "*Fully Coupled Process Simulation to Satisfy Specific Needs for High-precision Plastic Parts*," [Online].Available: http://www.moldex3d.com/en/ [Accessed: March 25, 2017].

[10] D. Eric et al., "The effects of injection molding parameters on color and gloss," *Coloring Technology for Plastics*, pp. 149-155, 1999.

[11] L. Shiying et al., “Accurately estimating reflectance parameters for color and gloss reproduction,” *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 113, no. 2, pp.308-316, February 2009.

[12] W. Yu et al., “Automatic design of conformal cooling circuits for rapid tooling,” *Computer-Aided Design*, vol. 43, no.8, pp. 1,001-1,010, August 2011.

[13] A. Alban et al., “Optimal cooling design in injection moulding process – A new approach based on morphological surfaces,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 52, no.1, pp. 170-178, April 2013.

[14] H.S. Park et al., “Development of plastic front side panels for green cars,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 6, no.1, pp. 44-52, 2013.

[15] M. Packianather et al., “Optimisation of micro injection moulding process through design of experiments,” *Procedia CIRP*, vol. 12, pp. 300-305, December 2013.

[16] W. Gui-long et al., “Heating/Cooling channels design for an automotive interior part and its evaluation in rapid heat cycle molding,” *Materials and Design*, vol. 59, pp. 310-322, July 2013.

[17] Z. Shayfull et al., “Milled groove square conformal cooling channels in injection molding process,” Materials and Manufacturing Processes, vol. 28, pp. 884-891, January 2013.

[18] D. P. Gruber et al., “Measurement of the visual perceptibility of sink marks on injection molding parts by a new fast processing model,” *Polymer Testing*, vol. 33, pp. 7-12, February 2014.

[19] N. Shih-Chih et al., “Warpage control of thin-walled injection molding using local mold temperatures,” *International Communication in Heat and Mass Tranfers*, vol. 61, pp.102-110, February 2015.

[20] E. Kunnayut and W. Kittinat, “Conformal bubbler cooling for molds by metal deposition process,” *Computer-Aided Design*, vol. 69, pp. 126-133, December 2015.

[21] M. Hamdi and H. J. Sue, “Effect of color, gloss, and surface texture perception on scratch and mar visibility in polymers,” *Materials and Design*, vol. 83, pp. 528-535, October 2015.

[22] S. Sivaraos et al, “ Comparison between taguchi method and response surface methodology (RSM) in modelling co2 laser machining,” *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol.8, no.1, pp. 35-42, January 2014.

[23] V. Modrak and J. Mandulak, “Exploration of impact of technological parameters on surface gloss of plastic parts,” *CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, vol.12, pp. 504-509, 2013.

[24] S. Kajikawa and T. Iizuka, “Effect of molding temperature on fluidity and injection moldability of oven-dry steam-treated bamboo powder,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 225, pp. 433-438, November 2015.

[25] J. Wang et al., “Use of medial axis to find optimal channel designs to reduce mold filling,” *Composites : Part A*, vol. 95, pp. 161-172, April 2017.

[26] C. Krit et al., “Study of heating and cooling temperature of injection molding to effect on gloss of plastic injection parts,” *TSME International Conference on Machanical Enginnering*, 8th TSME-ICoME, Bangkok, Thailand, December 12-14, 2017, pp. 1,238-1,246.

[27] The Pennsylvania State University., “*11.2.1-Central Composite Designs*,” [Online]. Available: https://onlinecourses.science.psu.edu/stat503/node/59, [Accessed: April 4, 2017].

[28] สุรดิษฐ์ โรจนนันต์ และ สิริพร โรจนนันต์, “การวิเคราะห์อิทธิพลของชนิดทางเข้าและความเร็วฉีดที่มีต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนท์,” *การประชุมวิชาการด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1,* กรุงเทพฯ , 31 สิงหาคม 2550, หน้า 93.

[29] สุรดิษฐ์ โรจนนันต์ และเสรษฐสิริ กลางเมือง, “การลดสูญเสียพลาสติกในระบบป้อนเติมของแม่พิมพ์ฉีดโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์,” *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22*, ME-NETT 22, กรุงเทพฯ, 15-17 ตุลาคม 2551, หน้า 261-266.

[30] สุรศิษฐ์ โรจนนันต์, “อิทธิพลของอุณหภูมิ ความดันฉีดย้ำและช่วงเวลาที่มีต่อความแข็งแรงของชิ้นงานฉีดพลาสติกบริเวณรอยเชื่อม,” *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23*, ME-NETT 23, จังหวัดเชียงใหม่, 4-7 พฤศจิกายน 2552, หน้า 237.

[31] กพรพรรณ เลิศกิจมั่นคง, “การหาจุดเหมาะสมของการชุบสังกะสีโดยวิธีตอบสนองที่พื้นผิว,” *การประชุมวิชาการระดับชาติเพื่อการวิจัยที่ยั่งยืน มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา*, กรุงเทพฯ, 3-4 กันยายน 2558, ไม่ปรากฏเลขหน้า.

[32] ชัชพล ชังชู, “การถ่ายโอนความร้อนและการออกแบบระบบหล่อเย็นสำหรับแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่สร้างจากวัสดุอิพอคซี่เรซิ่นเติมอลูมิเนียม,” *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23*, ME-NETT 23, จังหวัดเชียงใหม่, 4-7 พฤศจิกายน 2552, ไม่ปรากฏเลขหน้า.

[33] จรัล ทรัพย์เสรี, “DOE ตอน Central Composite Design,” *วารสารวิชาการ For Quality*, ปีที่ 16, ฉบับที่ 144, หน้า 66-68, ตุลาคม 2552.

[34] อิทธิพล วรพันธ์ และคณะ, “การหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบสรการเชื่อมด้วยความเสียดทานของเหล็ก AISI 1015 โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง,” *วารสารวิจัยมหาลัยวิทยาลัยขอนแก่น* ปีที่ 18, ฉบับที่ 6, หน้า 909-924, พฤศจิกายน 2555.

[35] ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติเทพ และคณะ, “อิทธิพลของหน้าตัดช่องไหลที่มีผลต่ออุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในกระบวนการฉีดพลาสติก,” *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.*, ปีที่ 24, ฉบับที่ 3, หน้า 269-283, กันยายน-ธันวาคม 2544.

[36] Siamstainless, “*ความหยาบผิวของสเตนเลสแผ่น*”, [Online]. Available: http://www.siamstainless.com/?p=1110 [Accessed: February 23, 2018].

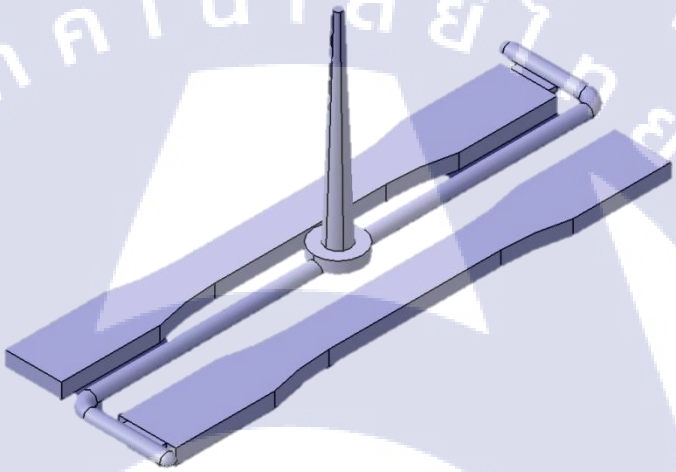
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

การคำนวณแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

ขั้นตอนในการออกแบบชิ้นงานและแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

ขั้นตอนแรกของการออกแบบในงานวิจัยนี้เริ่มจะจากการออกแบบชิ้นงาน ซึ่งเป็นชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงด้านความเค้นไทป์หนึ่ง (Tensile strength specimen type I) สำหรับทดสอบแรงดึง โดยตำแหน่งที่วัดกว้างพอที่จะสามารถทดสอบวัดความมันเงาได้ แสดงตามรูปที่ ก.1 โดยหลักการออกแบบจะคำนึงถึงการประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง รวมถึงความพร้อมของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์และขนาดกำลังเครื่องฉีดพลาสติกเพื่อที่จะสามารถให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกชุดนี้ คือ การคำนวณหาค่าต่างๆ จากทฤษฎีการคำนวณ ดังนี้



รูปที่ ก.1 ภาพชิ้นงานฉีดพลาสติกแบบ 2 คาวิตี้ ทางวิ่งและรูเข้า

การคำนวณปริมาตรและน้ำหนักของชิ้นงานฉีดพลาสติก

การคำนวณขนาดของชิ้นงานฉีดพลาสติกจำเป็นต้องรู้ข้อมูลในการคำนวณก่อน ดังนี้

- ชนิดของพลาสติก ในการวิจัยนี้ใช้พลาสติกประเภทเอบีเอส จากบริษัท Toray Plastic เกรด 700-314 สีดำ
- ความหนาแน่นของพลาสติก ของเม็ดพลาสติกเกรดนี้จะมีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 1.04 g/mm^2

การคำนวณหาปริมาตรของชิ้นงาน

ปริมาตรที่ 1 = 19 mm. x 165 mm. x 5 mm

= 15,675 $mm.^3$

ปริมาตรที่ 2 = 3 mm. x 57 mm. x 5 mm.

= 855 $mm.^3$

ทั้งหมด 2 ด้าน = 855 x 2 $mm.^3$

= 1,710 $mm.^3$

พื้นที่ฐานปริมาตรที่ 3 = $\frac{1}{2}$ x 3 mm. x 21.14 mm.

= 31.71 $mm.^2$

ปริมาตรที่ 3 = 31.71 $mm.^2$ x 5 mm.

= 158.55 $mm.^3$

ทั้งหมด 4 ด้าน = 158.55 x 4 $mm.^3$

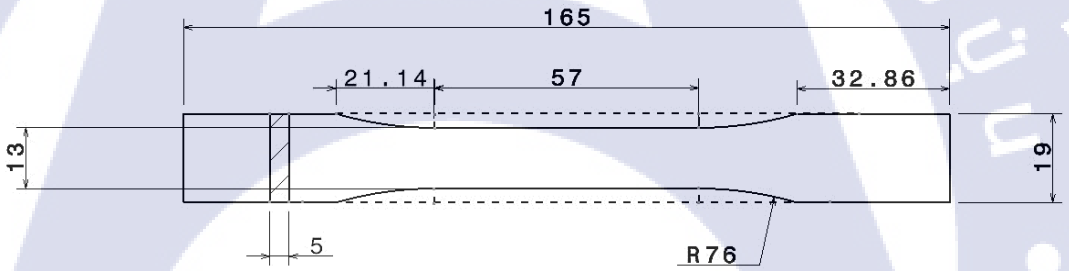
= 634.2 $mm.^3$

ปริมาตรชิ้นงาน = 15,675 $mm.^3$ - (1,710 $mm.^3$ + 634.2 $mm.^3$)

= 13,330.8 $mm.^3$

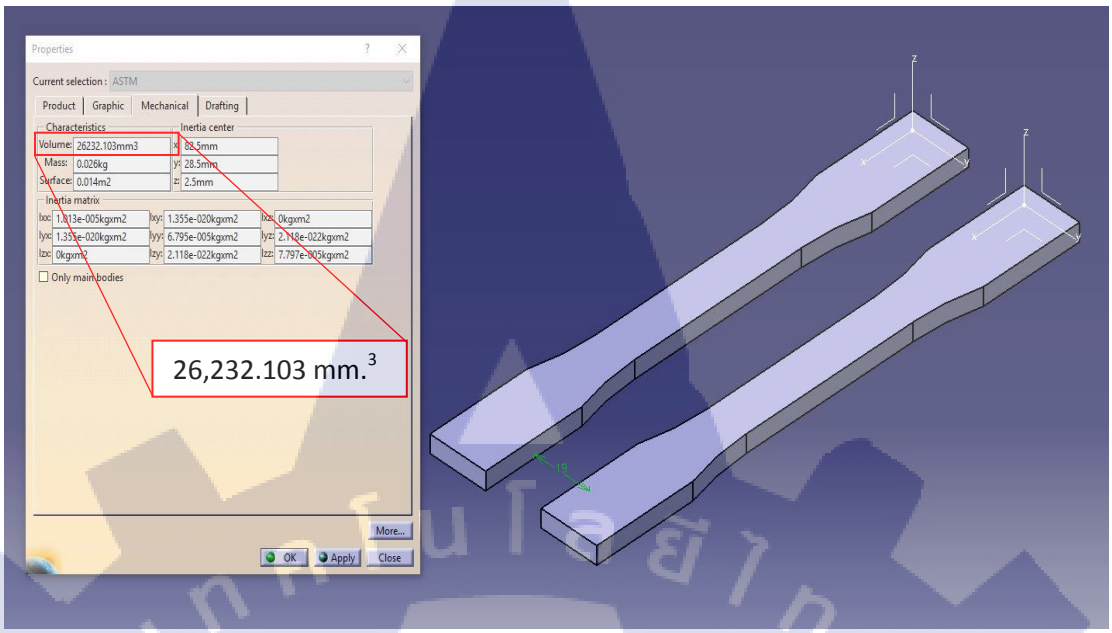
∴ ปริมาตรชิ้นงานทั้งหมด (2 ชิ้น) = 13,330.8 x 2 $mm.^3$ = 26,661.6 $mm.^3$

= 26.66 $cm.^3$



รูปที่ ก.2 พื้นที่การคิดปริมาตรของชิ้นงานด้วยตัวเอง

จากการคำนวณปริมาตรชิ้นงานด้วยการคำนวณประมาณด้วยตัวเอง ค่าที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยโปรแกรม CATIA แต่การคำนวณค่าปริมาตรชิ้นงานด้วยโปรแกรม CATIA ให้ความแม่นยำกว่า เพราะชิ้นงานมีส่วนโค้งละเอียดซึ่งไม่สามารถคำนวณชัดเจนด้วยตัวเองได้ จึงเลือกค่าจากโปรแกรมมาใช้ในการหาค่าน้ำหนักของชิ้นงาน



รูปที่ ก.3 ปริมาตรของชิ้นงานที่คำนวณจากโปรแกรม CATIA

สูตร น้ำหนักของชิ้นงาน = ปริมาตรชิ้นงาน x ความหนาแน่นของพลาสติก

ผลจากการคำนวณตามปริมาตรชิ้นงานจากโปรแกรม CATIA

น้ำหนักรวมของชิ้นงาน (2 ชิ้น) = 26.232 $cm.^3$ x 1.04 $g/cm.^3$

= 27.28 g.

การคำนวณหาปริมาตรของทางวิ่ง

ปริมาตรของทางวิ่ง 1 = $(\pi \times 2.5^2) \times (30.5+5+165+5+30.5)$

(ทางวิ่ง Ø5 mm.) $+ (\frac{4}{3} \times 2.5^3 \times \pi)$

= 4,633.86 + 64.45 = 4,699.31 $mm.^3$

ปริมาตรของทางวิ่ง 2 = $(\frac{1}{3} \times \pi \times 4^2 \times 67) + (\pi \times 8^2 \times 4)$ $mm.^3$

(ทางวิ่งรูเข้า) = 1,122.59 + 804.24 = 1,926.84 $mm.^3$

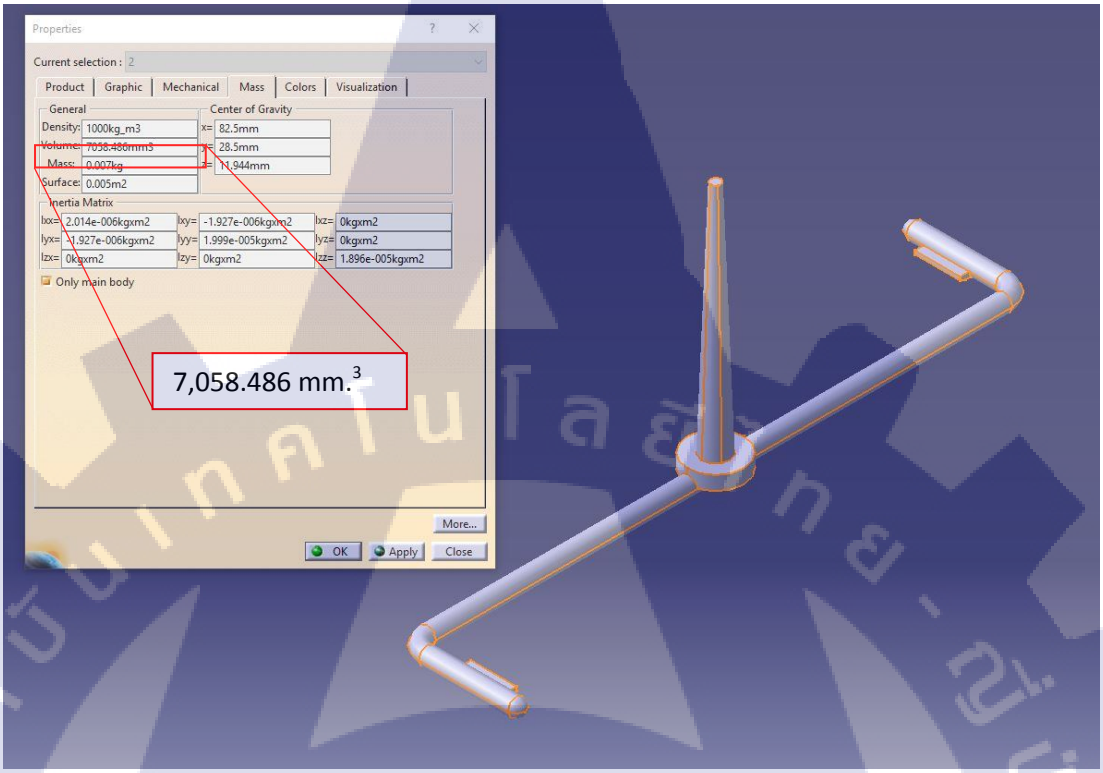
ปริมาตรรูเข้า (2 ด้าน) = (13 x 2.5 x 1.5) x 2

= 97.5 $mm.^3$

∴ ปริมาตรทางวิ่งทั้งหมด = 4,669.31 + 1,926.84 + 97.5 $mm.^3$

= 6,773.92 $mm.^3$

= 6..77 $cm.^3$



รูปที่ ก.4 พื้นที่การคิดปริมาตรของทางวิ่งด้วยตัวเอง

ผลจากการคำนวณตามปริมาตรทางวิ่งและรูเข้าจากโปรแกรม CATIA ซึ่งให้ผลการคำนวณที่แม่นยำกว่า

น้ำหนักรวมของทางวิ่งและรูเข้า = 7.058 $cm.^3$ x 1.04 $g/cm.^3$

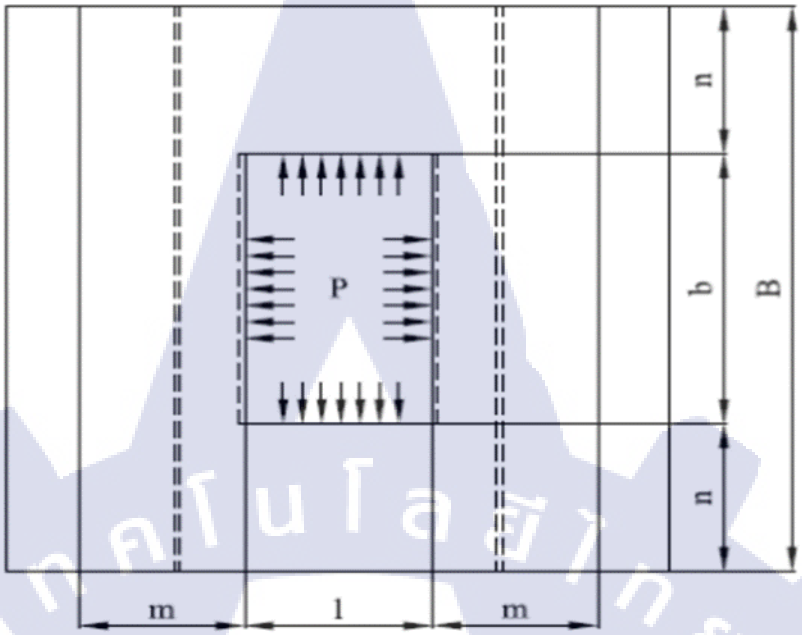
= 7.34 g.

∴ น้ำหนักรวมของชิ้นงานทั้งหมด = 27.28 + 7.34 g.

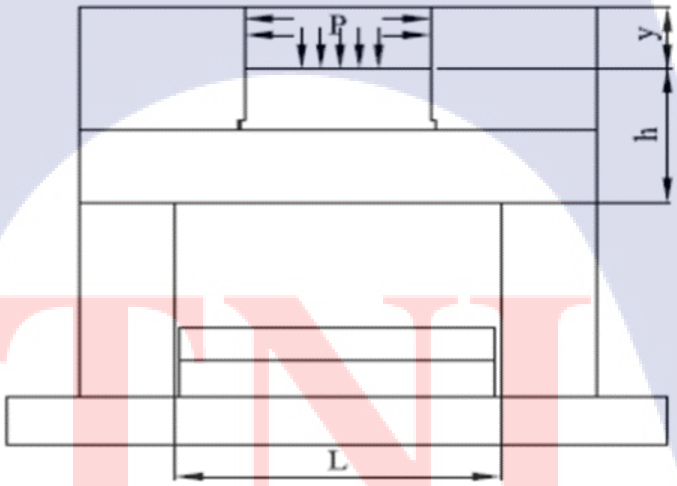
= 34.62 g.

การคำนวณขนาดของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

หลังจากที่ออกแบบชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว จำเป็นต้องคำนวณหาขนาดของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อลดค่าใช้จ่ายและขั้นตอนการผลิต หลักการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกจะต้องตรวจสอบขนาด ความแข็งแรงและค่าโก่งงอที่ยอมรับได้เมื่อเครื่องฉีดกดยึดแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน จากรูปด้านล่าง



รูปที่ ก.5 การคำนวณขนาดของแม่พิมพ์อ้างอิงตามความกว้างและความยาวของชิ้นงาน



รูปที่ ก.6 การคำนวณขนาดของแม่พิมพ์อ้างอิงตามความหนาของชิ้นงาน

สามารถอธิบายตัวแปรต่างๆไว้ช่วยคำนวณได้ ดังนี้

L คือ ระยะห่างระหว่างหมอนรองแม่พิมพ์ (จากการออกแบบจะเท่ากับความกว้างของแผ่นกระทุ้งชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 130 mm.)

B คือ ความยาวตามแนวหมอนรองแม่พิมพ์

m คือ ระยะห่างจากขอบแม่พิมพ์ขนานกับ L

n คือ ระยะห่างจากขอบแม่พิมพ์ขนานกับ B

l คือ ความยาวชิ้นงานขนานกับ L (ชิ้นงาน 2 คาวิตี้ ขนาดกว้างประมาณ 60 mm.)

b คือ ความยาวชิ้นงานขนานกับ B (ชิ้นงานรวมรูเข้าทั้งสองด้านยาวประมาณ 190 mm.)

y คือ ความสูงโพรงของชิ้นงาน (ชิ้นงานหนา 5 mm.)

p คือ ความดันเฉลี่ยของพลาสติก (พลาสติกประเภทเอบีเอส กำหนดให้ใช้ค่าเท่ากับ 3.2 kg./mm.^{2})

E คือ โมดูลัสการยืดหยุ่นของเหล็ก (เหล็กเกรด S50C กำหนดให้ใช้ค่าเท่ากับ 21,000 kg./mm.^{2})

h คือ ความหนาแม่พิมพ์ล่าง

δ_b คือ ระยะโก่งตัวของ b (โดยทั่วไปกำหนดให้โก่งได้ไม่เกิน 0.05 mm.)

δ_l คือ ระยะโก่งตัวของ l (โดยทั่วไปกำหนดให้โก่งได้ไม่เกิน 0.05 mm.)

สามารถคำนวณระยะห่างจากขอบแม่พิมพ์ขนานกับ L และ ระยะห่างจากขอบแม่พิมพ์ขนานกับ B ได้ตามสูตร ดังนี้

$$m = \sqrt[3]{\frac{1}{32}\frac{pb^5}{Ey\delta_b}} \quad \text{และ} \quad n = \sqrt[3]{\frac{1}{32}\frac{pl^5}{Ey\delta_l}}$$

จากการคำนวณจะได้

$$m = \sqrt[3]{\frac{1}{32}\frac{3.2\ x\ 190^5}{21{,}000\ x\ 5\ x\ 0.05}}$$

$$= 167.70 \text{ mm.}$$

$$n = \sqrt[3]{\frac{1}{32}\frac{3.2\ x\ 60^5}{21{,}000\ x\ 5\ x\ 0.05}}$$

$$= 24.56 \text{ mm.}$$

จากรูปด้านบนจะคำนวณขนาดความยาวของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเท่ากับ b + 2n

ความยาวของแม่พิมพ์ = 190 + 2 x 24.56 mm.

= 239.12 mm.

จะได้ขนาดความกว้างของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเท่ากับ l + 2m

ความกว้างของแม่พิมพ์ = 60 + 2 x 167.70 mm.

= 395.40 mm.

หลังจากนั้น เราสามารถคำนวณหาขนาดความหนาแม่พิมพ์ล่าง ได้ดังนี้สูตรต่อไปนี้

$$h = \sqrt[3]{\frac{5}{32}\frac{pL^5}{EB\delta_l}}$$

จากการคำนวณจะได้

$$h = \sqrt[3]{\frac{1}{32}\frac{3.2\ x\ 130^5}{21{,}000\ x\ 395.40\ x\ 0.05}}$$

= 35.36 mm.

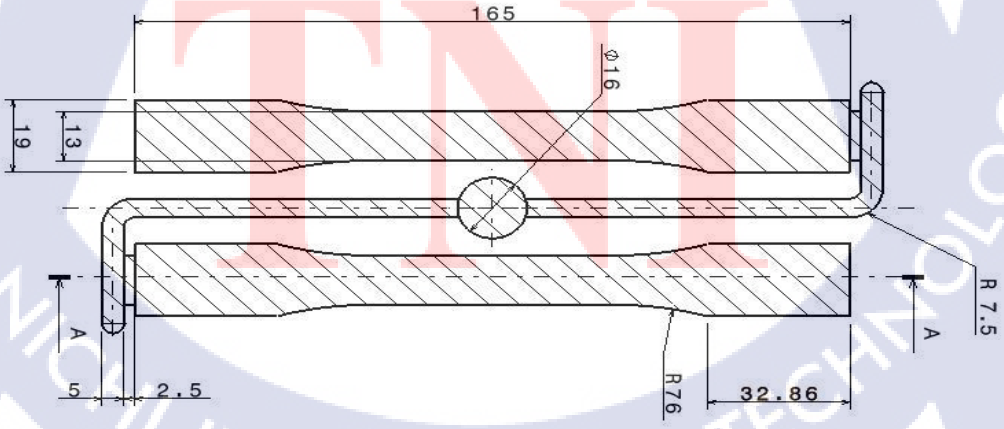
การคำนวณจะได้ขนาดความกว้าง ยาว และความหนาที่เหมาะสมจากทางทฤษฎีแล้ว ในทางปฏิบัติผู้วิจัยได้กำหนดขนาดให้ใหญ่กว้างที่คำนวณเล็กน้อยเพื่อสะดวกต่อการสั่งซื้อและอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก หลังจากที่คำนวณขนาดแม่พิมพ์เสร็จแล้วในส่วนถัดไปจะคำนวณแรงปิดแม่พิมพ์และขนาดของเครื่องฉีดพลาสติก

การคำนวณแรงปิดแม่พิมพ์และขนาดเครื่องฉีดพลาสติก

ชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ออกแบบมีจำนวน 2 คาวิตี้รูปร่างและขนาดเป็นมิลิเมตร ดังรูปที่ ก.7 วัสดุที่ใช้ฉีดเป็นพลาสติกประเภทเอบีเอส โดยกำหนดให้ความดันในโพรงแบบตามตารางด้านล่างเพื่อใช้คำนวณค่าแรงปิดแม่พิมพ์และคำนวณขนาดเครื่องฉีดพลาสติก

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าของความดันฉีดและความดันในโพรงแบบของพลาสติกชนิดต่างๆ

ชนิดของพลาสติก (Plastic type)	ความดันฉีด (กก./ซม^2.) (Injection pressure)	ความดันในโพรงแบบ (กก./ซม^2.) (Cavity pressure)
พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE)	600 -1,400	230 – 320
พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)	600 -1,400	220 – 320
พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl choride, PVC)	1,000 – 1,500	280 -290
พอลิสไตรีน (Polystryrene, PS)	700 – 1,700	260 - 320
พอลีคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC)	800 – 1,500	270 – 300
อะคริโลไนไตรล์สไตรีน-บิวทาไดอีน-(Acrylonitrile-butadien-stylene, ABS)	700 – 1,500	330 - 440
พอลิเอไมด์ (Polyamide. PA)	800 – 1,500	240 - 450



รูปที่ ก.7 ภาพหน้าตัดแสดงพื้นที่ฉายของแม่พิมพ์

จากภาพ

จะได้พื้นที่ฉายของชิ้นงาน (2 cavity) = (13,305 $mm.^3$ /5 mm.) x 2

= 5,323 $mm.^2$

= 53.23 $cm.^2$

พื้นที่ฉายของทางวิ่งและรูเข้า = [(23 +7.5+165+7.5+23) x 5] + [2 x (2.5 x 13)]

= 1,130 + 65 $mm.^2$

= 1,195 $mm.^2$

= 1.195 $cm.^2$

รวมพื้นที่ฉายทั้งหมด = 53.23 + 1.195 $cm.^2$

= 54.425 $cm.^2$

ในการฉีดพลาสติกจริงเราจะพิจารณาพื้นที่ฉายทั้งหมดของชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานมีการออกแบบให้มีขนาดรูวิ่งที่ยาวและขนาดมีทางเข้าแบบพัด จึงจำเป็นต้องพิจารณาในการคำนวณนี้ด้วย โดยแรงปิดแม่พิมพ์ที่ใช้จะเผื่อค่าแรงปิดแม่พิมพ์เพิ่มอีก 25% เพื่อความปลอดภัยของเครื่องจักรและคุณภาพของชิ้นงานฉีดพลาสติก ตามสมการด้านล่าง

$$F = 1.25\ PA_{projected}$$

$$= 1.25 \times 385 \times 54.425 \quad kg.$$

$$= 26{,}192\ kg. = 26\ Ton$$

จากการคำนวณควรเลือกใช้ขนาดเครื่องพลาสติกขนาดประมาณ 26 ตันขึ้นไป ค่าความดันในโพรงแบบงานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุประเภทเอบีเอสโดยอ้างอิงจากตารางด้านบน เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าความดันตลอดช่วงของการฉีด ณ จุดต่างๆในขณะแม่พิมพ์ปิดได้จึงจำเป็นต้องใช้ค่าเฉลี่ยในช่วงที่แนะนำ ดจะเห็นได้ว่าความสามารถของเครื่องฉีดพลาสติกของห้องปฏิบัติการมีขนาดแรงปิดแม่พิมพ์เพียงพอกับการออกแบบแม่พิมพ์นี้

การคำนวณเวลาในการหล่อเย็น

ในการคำนวณเวลาในการหล่อเย็นจะต้องคำนวณถึงรูปทรงของชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้ใช้ชิ้นงานทดสอบแบบแผ่นเรียบ ซึ่งมีการคำนวณเวลาที่พลาสติกหลอมเหลวแข็งตัวที่ผิวชิ้นงานและจุดกึ่งกลางชิ้นงาน โดยจะมีสูตรการคำนวณ ดังนี้

เวลาหล่อเย็นที่ผิวชิ้นงานแบบแผ่นเรียบ $t_c = \frac{s^2}{\pi^2 a_{eff}} ln\left[\frac{8}{\pi^2}\left(\frac{T_M - \bar{T}_W}{T_E - T_W}\right)\right]$

โดยที่ t_c คือ เวลาในการหล่อเย็น

S คือ ความหนาของชิ้นงาน (จากการออกแบบชิ้นงานหนา 5 มิลลิเมตร)

a_{eff} คือ อัตราการแพร่กระจายความร้อนของพลาสติก (Thermal diffusivity, mm^2/s)

T_M คือ อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว

T_E คือ อุณหภูมิปลดชิ้นงาน

T_W คือ อุณหภูมิผนังแม่พิมพ์

จะได้ $t_c = \frac{5^2}{3.14^2 0.17} ln\left[\frac{8}{3.14^2}\left(\frac{240-60}{95-60}\right)\right]$

$= 14.92 \; ln(4.16)$

$= 21.31$ sec. $\approx$ 21 sec.

สำหรับสูตรคำนวณเวลาหล่อเย็นนี้ สามารถใช้ปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ แต่จากประสบการณ์ของผู้วิจัย พบว่าการออกแบบทางเข้าหรือรูวิ่งที่ความหนากว่าขนาดชิ้นงานมีโอกาสทำให้เวลาปลดชิ้นงานชิ้นงานฉีดพลาสติกมีโอกาสขาดออกจากกัน ทำให้รูวิ่งและชิ้นงานแยกไปในฝั่งปลอกนำฉีดและโพรงแบบตามลำดับ เพราะว่าเกิดสภาวะที่จุดกึ่งกลางชิ้นงานพลาสติกยังไม่แข็งตัวสนิท (metling core) จึงเป็นสาเหตุให้จำเป็นต้องใช้เวลาหล่อเย็นที่นานขึ้นกว่าที่ผิวชิ้นงาน เพื่อให้ชิ้นงานแข็งตัวได้ทั่วถึงชิ้นงาน ดังสูตรต่อไปนี้

เวลาหล่อเย็นที่จุดกึ่งกลางชิ้นงานแบบแผ่นเรียบ $t_c = \frac{s^2}{\pi^2 a_{eff}} ln\left[\frac{4}{\pi}\left(\frac{T_M - \bar{T}_W}{T_E - T_W}\right)\right]$

จะได้ $t_c = \frac{5^2}{3.14^2 0.17} ln\left[\frac{4}{3.14}\left(\frac{240-60}{95-60}\right)\right]$

$$= \quad 14.92 \quad ln(6.54)$$

$$= \quad 28.05 \text{ sec.} \quad \approx \quad 28 \text{ sec.}$$

จะเห็นได้ว่าเวลาหล่อเย็นที่จุดกึ่งกลางชิ้นงานจะยาวนานกว่าเวลาหล่อเย็นที่ผิวชิ้นงาน ด้วยเนื่องจาก ตำแหน่งของการพาความร้อนที่จุดกึ่งกลางชิ้นงานนั้นไกลกว่าตำแหน่งที่ผิวชิ้นงาน ยิ่งชิ้นงานมีความหนามากขึ้นเท่าไหร่โอกาสที่จะเกิด melting core ที่เวลาหล่อเย็นเท่ากันก็จะเกิดมากยิ่งขึ้น เพราะฉะนั้นเราจึงควรเลือกใช้เวลาหล่อเย็นที่เหมาะสมเพื่อลดเวลาการผลิตและสามารถปลดชิ้นงานได้อย่างปลอดภัย

ในการวิจัยครั้งนี้ เวลาในการหล่อเย็นจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่กำหนด เนื่องจากศึกษาอิทธิพลของการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มาจากอุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลว และอุณหภูมิแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นค่า T_M และค่า T_W ตามลำดับ ทำให้ ในการคำนวณจะยกตัวอย่างเฉพาะค่ากึ่งกลางของการออกแบบการทดลองเท่านั้น (อุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลวที่ 240 °c และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 60 °c) สำหรับช่วงเวลาการหล่อเย็นของชิ้นงานที่ออกแบบจากการคำนวณนี้จะมีค่าระหว่าง 20 - 40 วินาที

การคำนวณฟลักซ์ความร้อนในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

จากสมการที่ 2 ในบทที่ 2 แสดงสมการสมดุลความร้อนระหว่างความร้อนจากพลาสติกหลอมเหลวที่ถ่ายเทให้กับแม่พิมพ์สัมพันธ์กับการหล่อเย็นด้วยน้ำในแต่ละวัฏจักรของการฉีด เพื่อให้ได้ตามทฤษีที่ว่า ฟลักซ์ความร้อนที่เข้าสู่แม่พิมพ์เท่ากับฟลักซ์ความร้อนที่จะต้องนำออกจากแม่พิมพ์ ในสมการที่กล่าวมาได้กำหนดให้อุณหภูมิจากแม่พิมพ์มีค่าคงที่จึงไม่นำมารวมเข้าแต่ละวัฏจักรของการฉีด กล่าวคือ อุณหภูมิแม่พิมพ์จะมีค่าสูงหรือต่ำลงแต่จะไม่นับรวมเข้ามาในระบบ แสดงดังสมการด้านล่าง ดังนี้

$$\dot{Q}_m + \dot{Q}_c = 0$$

ฟลักซ์ความร้อนของพลาสติกหลอมเหลว สามารถเขียนในรูปแบบสมการด้านล่าง ดังนี้

$$\dot{Q}_m = 10^{-3}[C_p(T_M - T_E) + i_m]\rho\frac{S}{2}x$$

โดยที่ C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะ สำหรับพลาสติกเอบีเอสจะอยู่ที่ 1,423 J/kg.°C

i_m คือ ความร้อนแฝงของพลาสติก สำหรับพลาสติกเอบีเอสจะอยู่ที่ประมาณ 600 kJ/kg

ρ คือ ความหนาแน่นหลอมเหลวของพลาสติก สำหรับพลาสติกเอบีเอสที่ใช้ เท่ากับ 1.04 g/cm^3

x คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรูหล่อเย็น จากการออกแบบเท่ากับ 10 mm

S คือ ความหนาของชิ้นงาน จากการออกแบบเท่ากับ 5 mm

T_M คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก กำหนดค่ากลางของงานวิจัยเท่ากับ 250 °C

T_E คือ อุณหภูมิปลดชิ้นงาน สำหรับพลาสติกเอบีเอสที่ใช้เท่ากับ 95 °C

จะได้ $\dot{Q}_m = 10^{-3}\,[1{,}423(250-95)+600\,]x\ 1.04\ x\ \frac{5}{2}x10$

= 5,752 จูล

ฟลักซ์ความร้อนของน้ำหล่อเย็นที่สัมพันธ์กับเวลา สามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ ดังนี้

$$\dot{Q}_c = 10^{-3}\left(\frac{1}{2}t_f + t_c + \frac{1}{2}t_o\right)\left(\frac{1}{10^{-3}\alpha\pi d}^{-1}\frac{1}{k_{st}S_e}\right)^{-1}(\overline{T}_W - T_c)$$

โดยที่ t_f คือ เวลาที่ใช้ในการฉีด กำหนดเท่ากับ 3.5 sec

t_c คือ เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น กำหนดเท่ากับ 25 sec

t_o คือ เวลาที่ใช้ในการเปิดปิดแม่พิมพ์ กำหนดเท่ากับ 5 sec

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูหล่อเย็น จากการออกแบบเท่ากับ 10 mm.

k_{st} คือ ค่าการนำความร้อนของแม่พิมพ์ ข้อมูลในโปรแกรม Molded3D กำหนด เท่ากับ 25,000 W/m.°C

S_e คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของรูปทรงหน้าตัดรูหล่อเย็น

$\overline{T}_W$ คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ก่อนเริ่มหล่อเย็น ควบคุมให้คงที่เท่ากับ 50 °C

T_c คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการหล่อเย็น กำหนดให้เท่ากับ 30 °C

สำหรับอิทธิพลของตำแหน่งรูหล่อเย็นในการนำความร้อนสามารถเขียนเป็นสมการสัมประสิทธิ์ของรูปทรงหน้าตัดรูหล่อเย็น (Shape factor, S_e) ได้ดังนี้

$$S_e = \frac{2\pi}{\ln\left[\frac{2x\sinh(2\pi y/x)}{\pi d}\right]}$$

จะได้

$$S_e = \frac{2\pi}{\ln\left[\frac{2x10\sinh(2\pi 20/10)}{\pi x10}\right]}$$

$$= \frac{6.2832}{2.6881}$$

$$= 2.34$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient) ของน้ำหล่อเย็น สามารถเขียน ดังนี้

$$\alpha = \frac{31.395}{d} R_e^{0.8}$$

จะได้

$$= \frac{31.395}{10} 10{,}000^{0.8}$$

$$= 4{,}975.77$$

เมื่อนำมาคำนวณฟลักซ์ความร้อนของน้ำหล่อเย็น จะได้

$$\dot{Q}_c = 10^{-3}\left(\frac{3.5}{2} + 25 + \frac{5}{2}\right)\left(\frac{1}{10^{-3} x\ 4{,}975.77\ x\ 10}^{-1} \frac{1}{25{,}000\ x\ 2.34}\right)^{-1}(50 - 30)$$

$$= 10^{-3} x\ 29.25\ x\ 0.1583\ x 58{,}434.33\ x\ 20$$

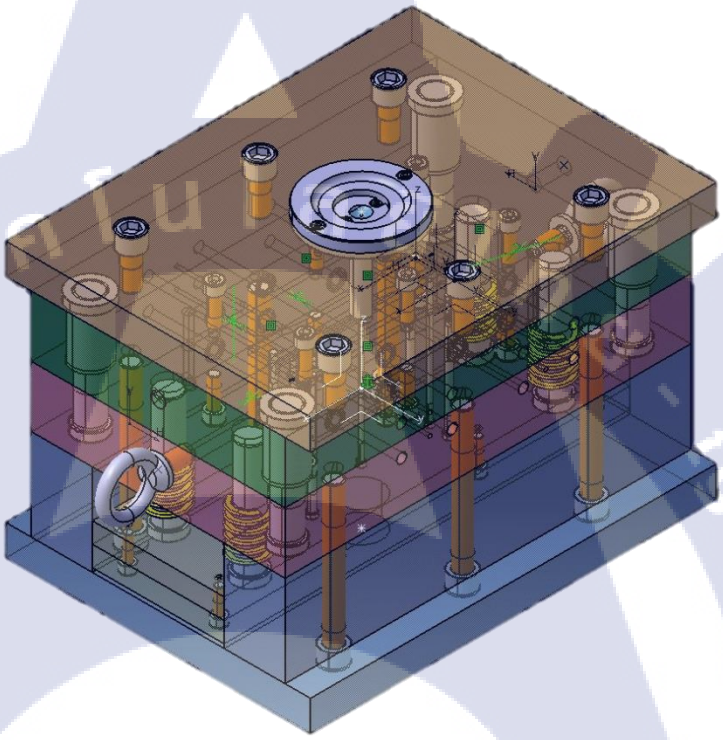
$$= 5{,}414.2 \quad \text{จูล}$$

จากสมการสมดุลทางความร้อนจะเห็นได้ว่าฟลักซ์ความร้อนที่เข้าสู่แม่พิมพ์จะมีค่าเท่ากับ 5,752 จูล แต่ฟลักซ์ความร้อนที่จะต้องนำออกจากแม่พิมพ์เท่ากับ 5,414.2 จูล ซึ่งฟลักซ์ความร้อนขาเข้าจะมากกว่าขาออกเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เพิ่มเข้าด้วยซึ่งในภาคผนวกนี้ไม่ได้คำนวณโดยตรง จากการคำนวฯด้านบนแสดงให้เห็นว่าค่าที่คำนวณนั้นใกล้เคียงกับการออกแบบในแต่ละการทดลองเพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิในแต่ละวัฏจักรคงที่และส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงานแต่ละการฉีดน้อยที่สุด

สำหรับการคำนวณปลักซ์ความร้อนในงานวิจัยนี้เป็นการคำนวณค่าประมาณเริ่มต้นเพื่อปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในการฉีดให้ได้ค่าคงของอุณหภูมิแม่พิมพ์ในแต่ละวัฏจักรและปรับค่าเพอ่มเติมอีกเล็กน้อยสำหรับงานฉีดจริง

ขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

หลังจากที่ได้ทำการศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์และรวบรวมข้อมูลต่างๆที่จำเป็นมาแล้ว ในขั้นตอนต่อไปคือ การนำวัสดุมาขึ้นรูปตามที่ออกแบบไว้ ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการการแปรรูปชิ้นส่วนแม่พิมพ์อินเสิร์ทด้วยเครื่องมือของห้องปฏิบัติการและนำมาประกอบกันกับแม่พิมพ์หลักตามที่ออกแบบไว้ ดังรูปด้านล่าง

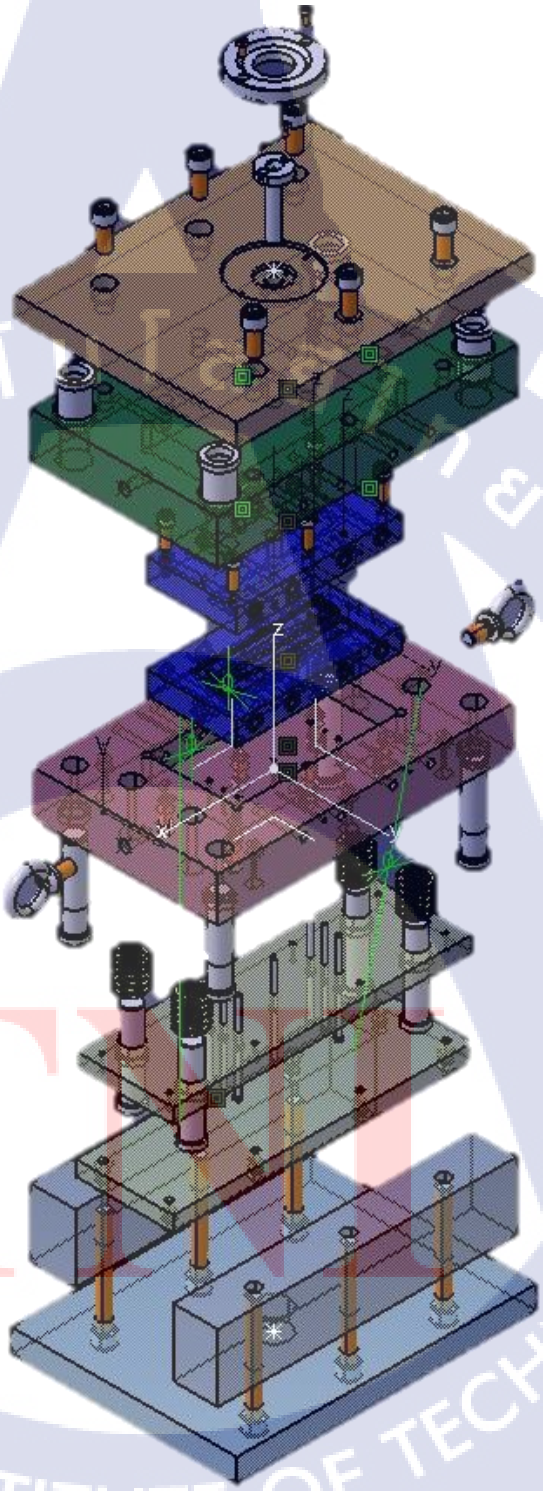


รูปที่ ก.8 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย (Assembly mode)

ในส่วนของการนำเสนอส่วนประกอบของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกจะแสดงภาพสามมิติที่ออกแบบด้วยโปรแกรมออกแบบสามมิติ ที่มีชื่อว่า CATIA V.5 R16 โดยจะอธิบายออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแม่พิมพ์อยู่กับที่ (Clamping side) ส่วนแม่พิมพ์เคลื่อนที่ (Moveable side) และระบบปลดชิ้นงาน (Ejector system) รายละเอียดของชิ้นส่วนต่างๆในจะเสริมไว้ในแต่ละส่วนและภาพร่างในภาคผนวก ข

รูปด้านบนจะเป็นการประกอบแม่พิมพ์พร้อมสำหรับติดตั้งแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องฉีดพลาสติก ส่วนรูปถัดไปแสดงการแยกชิ้นส่วนในแนวตั้งเพื่อให้สามารถเข้าใจถึงการออกแบบได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าแม่พิมพ์ที่ออกแบบเป็นแม่พิมพ์ระบบ 2 เพลท มีการเซาะร่องที่แผ่น

แม่พิมพ์หลักฝั่งคอร์กับคาวิตี้ และมีแม่พิมพ์อินเสิร์ทซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปแบบชิ้นงานในการฉีดพลาสติกในส่วนของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานต่างๆได้



รูปที่ ก.9 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย (Explode mode)

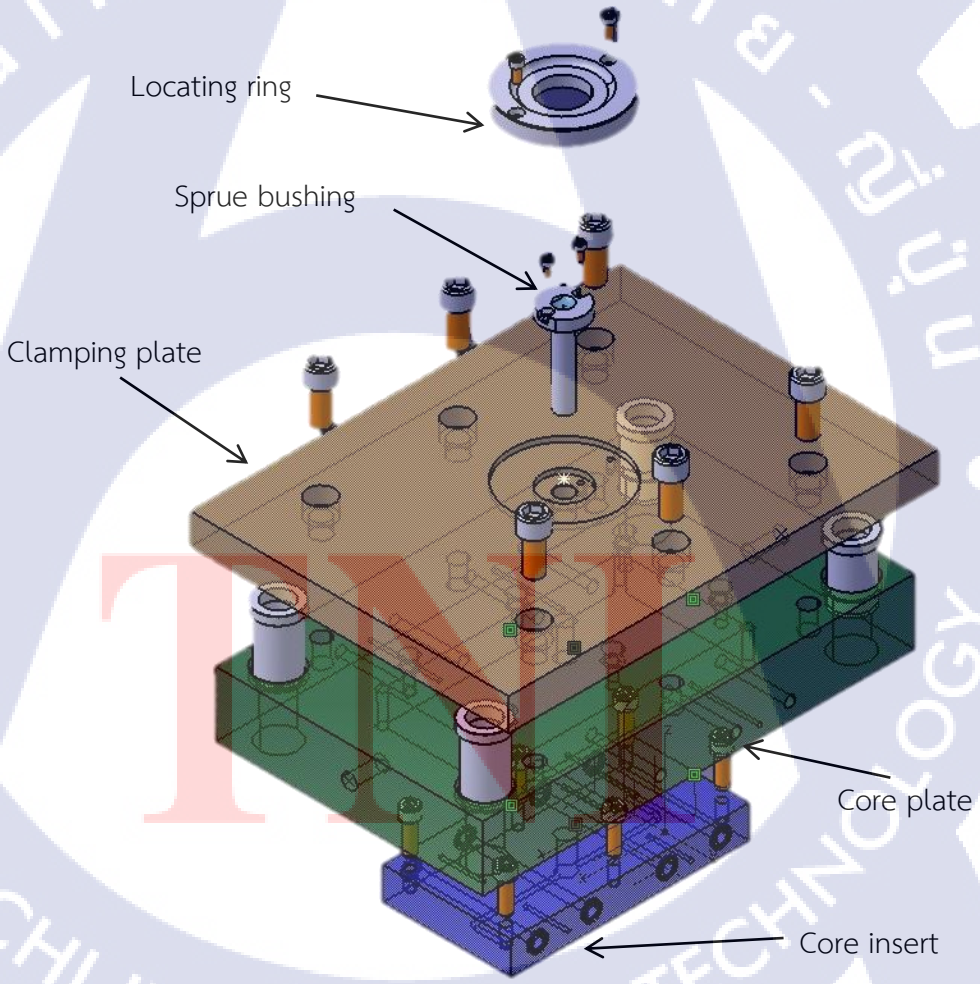
ขั้นตอนการประกอบแม่พิมพ์

การประกอบแม่พิมพ์จะอธิบายในส่วนประกอบฝั่งแม่พิมพ์ส่วนอยู่กับที่ (Clamping side) ก่อน แล้วจึงประกอบระบบปลดชิ้นงาน (Ejector system) ตามด้วยแม่พิมพ์ส่วนเคลื่อนที่ (Moveable side)

ขั้นตอนที่ 1 ประกอบไกด์บุช (Guide bush) ขนาด 25-60 ทั้ง 4 ชิ้นเข้ากับแม่พิมพ์หลัก

ขั้นตอนที่ 2 ทำการประกอบแม่พิมพ์อินเสิร์ท (Core insert) เข้ากับแม่พิมพ์หลัก (Core plate) โดยใส่โอริง (d16 D20) ทั้งหมด 8 ชิ้นลงไปในแม่พิมพ์หลัก โดยระมัดระวังไม่ให้โอริงบิดเบี้ยวหรือเกิดการพับซึ่งจะมีผลต่อระบบการหมุนเวียนของไหลในแม่พิมพ์ จากนั้นอุดรอยต่อแม่พิมพ์ด้วยจารบีและขันสกรูยึด M10-30 ทั้งหมด 6 จุดไว้

ขั้นตอนที่ 3 ประกอบแผ่นแม่พิมพ์บน (Clamping plate) เข้ากับแผ่นแม่พิมพ์หลักโดยสกรูยึดขนาด M16-35 ทั้งหมด 6 จุด

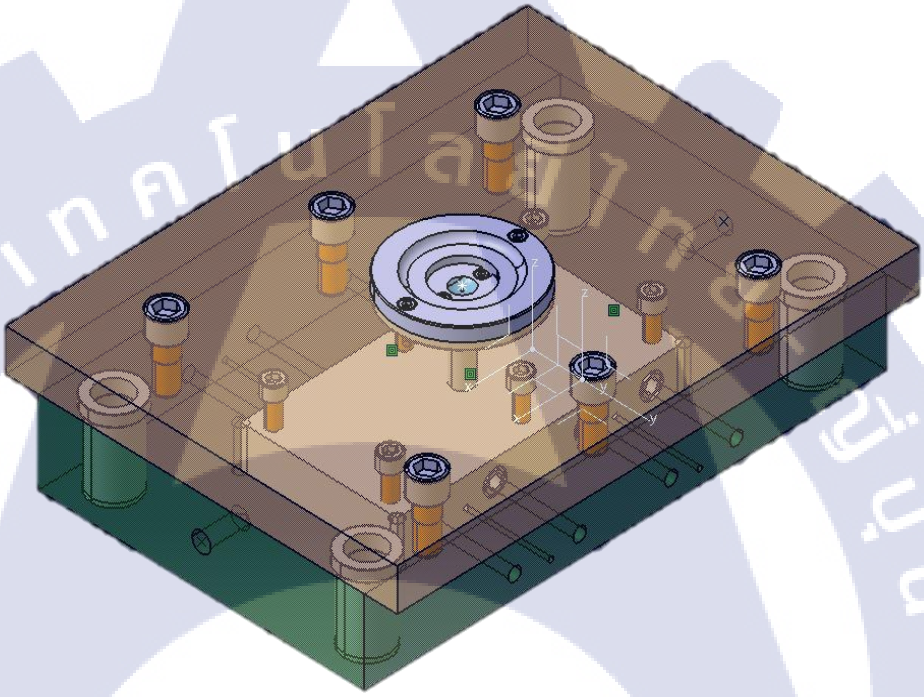


รูปที่ ก.10 ขั้นตอนการประกอบแม่พิมพ์ส่วนอยู่กับที่ (Clamping side)

ขั้นตอนที่ 4 ประกอบแหวนนำศูนย์ (Locating ring) เข้ากับแผ่นแม่พิมพ์บนโดยสกรูยึดขนาด M6-14 ทั้งหมด 2 จุด

ขั้นตอนที่ 5 ประกอบปลอกนำฉีด (Sprue bushing) เข้ากับแหวนนำศูนย์ผ่านแผ่นแม่พิมพ์บนโดยสกรูยึดขนาด M5-10 ทั้งหมด 2 จุด

เมื่อประกอบตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 -5 แล้วจะได้ดังภาพด้านล่าง จะได้แม่พิมพ์ส่วนอยู่กับที่ (Clamping side)



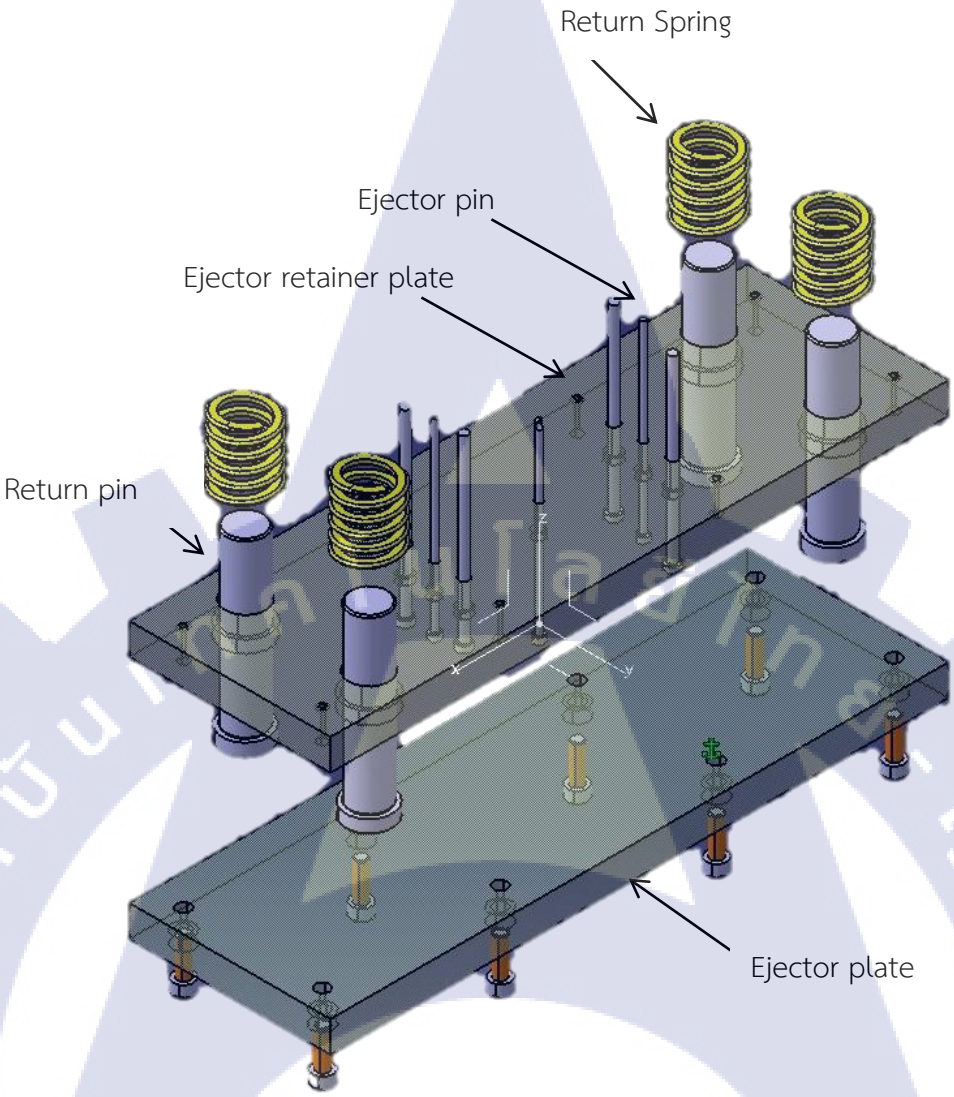
รูปที่ ก.11 แม่พิมพ์ส่วนอยู่กับที่ (Clamping side)

ในส่วนต่อไปเราจะประกอบระบบปลดชิ้นงานเพื่อไปประกอบกับแม่พิมพ์ส่วนเคลื่อนที่

ขั้นตอนที่ 6 ประกอบเข็มกระทุ้ง (Ejector pin) ขนาด 4-150 จำนวน 3 ชิ้นและขนาด 6-150 จำนวน 4 ชิ้นและแท่งดันกลับ (Return pin) ขนาด 25-120 จำนวน 4 ชิ้นเข้าตามแบบที่กำหนดไว้กับแผ่นกระทุ้งบน (Ejector retainer plate) ตามรูปด้านล่าง

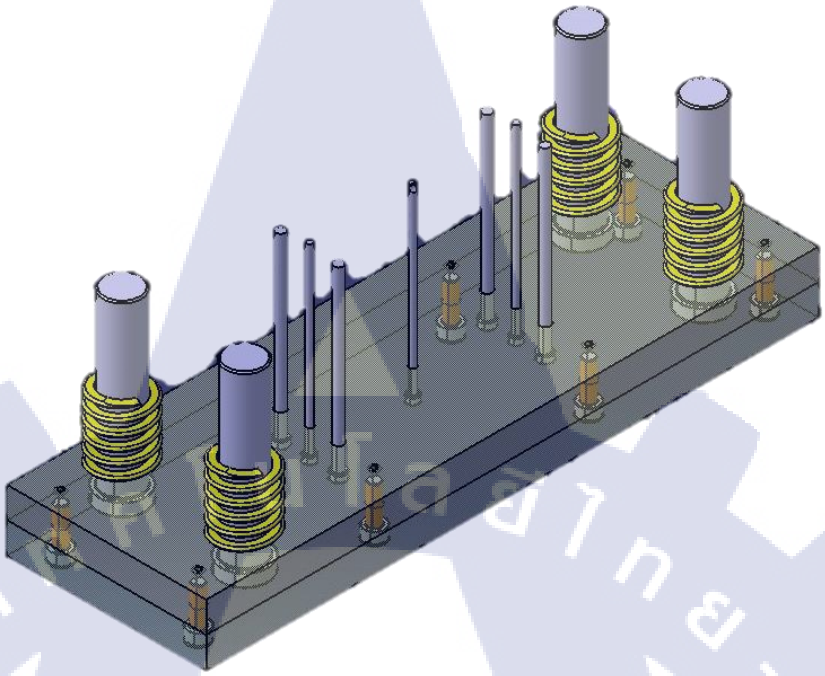
ขั้นตอนที่ 7 ประกอบแผ่นกระทุ้งล่าง (Ejector plate) เข้ากับแผ่นกระทุ้งบน โดยยึดเข้ากันด้วยสกรูขนาด M8-25 จำนวน 8 จุด

ขั้นตอนที่ 8 ประกอบสวมสปริงดันกลับ (Return Spring) เข้ากับแท่งดันกลับที่โผล่ขึ้นมาหลังประกอบจำนวน 4 ชิ้น



รูปที่ ก.12 ขั้นตอนการประกอบระบบปลดชิ้นงาน (Ejector system)

เมื่อประกอบตามขั้นตอนที่ 6-8 เสร็จจะได้ระบบปลดชิ้นงานตามรูปถัดไป ในส่วนต่อไปจะนำระบบปลดชิ้นงานนี้ไปประกอบเข้ากับแม่พิมพ์ส่วนเคลื่อนที่



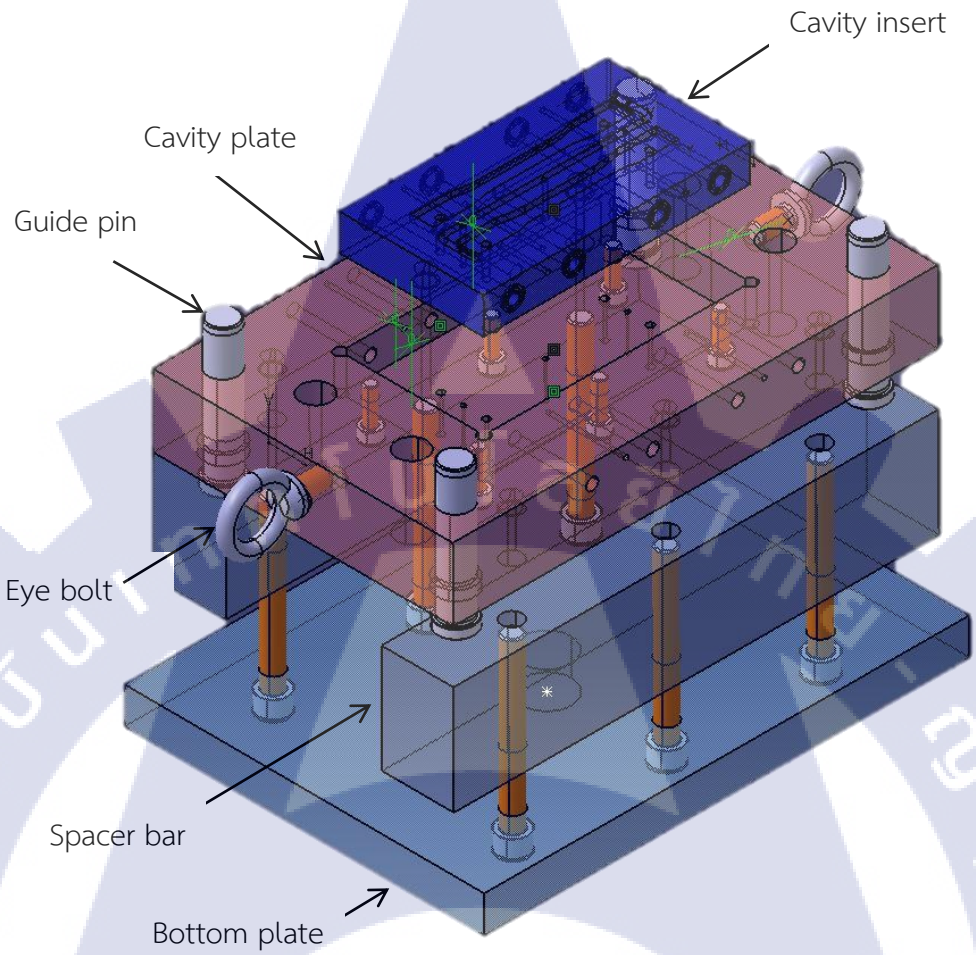
รูปที่ ก.13 ระบบปลดชิ้นงาน (Ejector system)

ขั้นตอนที่ 9 ทำการประกอบแม่พิมพ์อินเสิร์ท (Cavity insert) เข้ากับแม่พิมพ์หลัก (Cavity plate) โดยใส่โอริง (d16 D20) ทั้งหมด 8 ชิ้นลงไปในแม่พิมพ์หลัก โดยระมัดระวังไม่ให้โอริงบิดเบี้ยวหรือเกิดการพับซึ่งจะมีผลต่อระบบการหมุนเวียนของไหลในแม่พิมพ์ จากนั้นอุดรอยต่อแม่พิมพ์ด้วยจารบีและขันสกรูยึด M10-30 ทั้งหมด 6 จุดไว้

ขั้นตอนที่ 10 ทำการอัดสวมไกด์พิน (Guide pin) ขนาด 25-120 จำนวน 4 ชิ้นเข้ากับแม่พิมพ์หลักที่ตำแหน่งเดียวกันกับไกด์บุชในขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 11 นำสกรูยึดขนาด 16-140 จำนวน 6 ชิ้น ร้อยเข้ากับแท่งรอง (Spacer bar) ทั้งสองข้างและแผ่นแม่พิมพ์ล่าง (Bottom plate)

ขั้นตอนที่ 12 นำระบบปลดชิ้นงานที่ประกอบเสร็จในขั้นตอนที่ 8 มาประกอบเข้าระหว่างแท่งรอง ทั้งสองข้าง



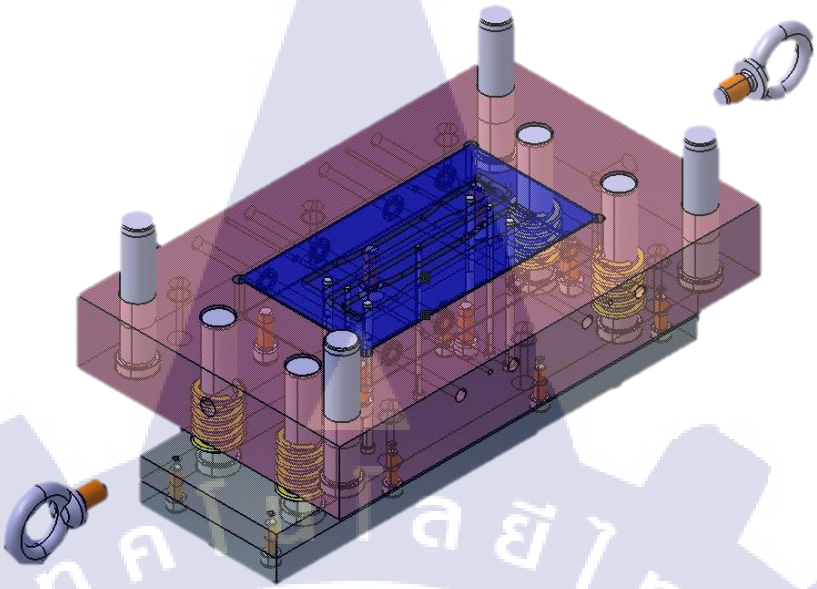
รูปที่ ก.14 ขั้นตอนการประกอบแม่พิมพ์ส่วนเคลื่อนที่ (Moveable side)

ขั้นตอนที่ 13 นำแม่พิมพ์หลักที่ประกอบในขั้นตอนที่ 10 ประกอบเข้ากัน โดยสวมให้ตรงกับตำแหน่งของเข็มกระทุ้งและแท่งดันกลับ และขันยึดแน่นสกรูขนาด 16-140 จำนวน 6 จุด

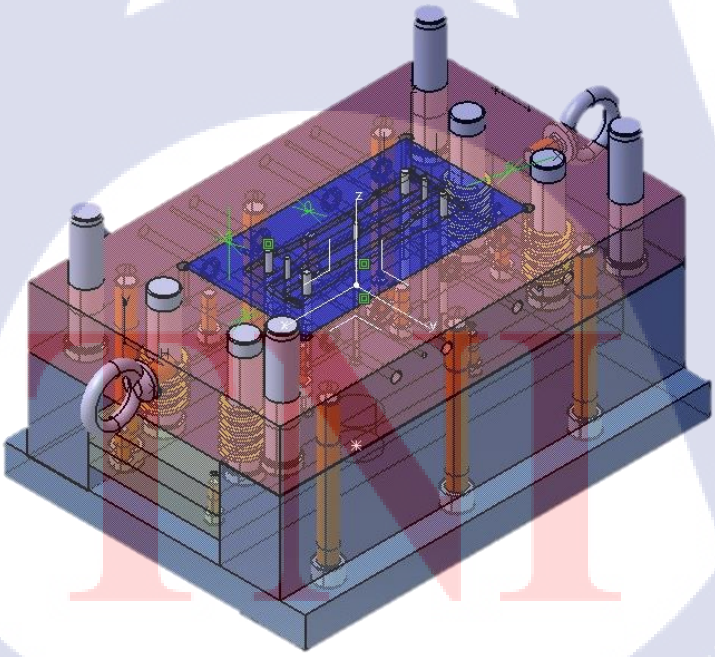
ขั้นตอนที่ 14 ประกอบห่วงยกแม่พิมพ์ (Eye bolt) ขนาด M16 เข้ากับแผ่นแม่พิมพ์หลักทั้งสองข้าง สำหรับยึดเพื่อยกแม่พิมพ์โดยเครนยก

ขั้นตอนที่ 15 ประกอบแม่พิมพ์ส่วนเคลื่อนที่และแม่พิมพ์ส่วนอยู่กับที่เข้าด้วยกันด้วยเครนยก ตามแท่งไกด์พินและไกด์บุช ตามลำดับฝั่งแม่พิมพ์เป็นขั้นตอนสุดท้าย

เมื่อประกอบแม่พิมพ์ทุกชิ้นส่วนเข้าด้วยกันแล้ว ก็สามารถแม่พิมพ์ติดตั้งเข้ากันเครื่องฉีดพลาสติกเพื่อผลิตชิ้นงานได้ ในส่วนภาคผนวก ข จะอธิบายรายละเอียดในส่วนขนาดและภาพร่างอย่างละเอียดของแต่ละชิ้นส่วนอีกครั้งหนึ่ง



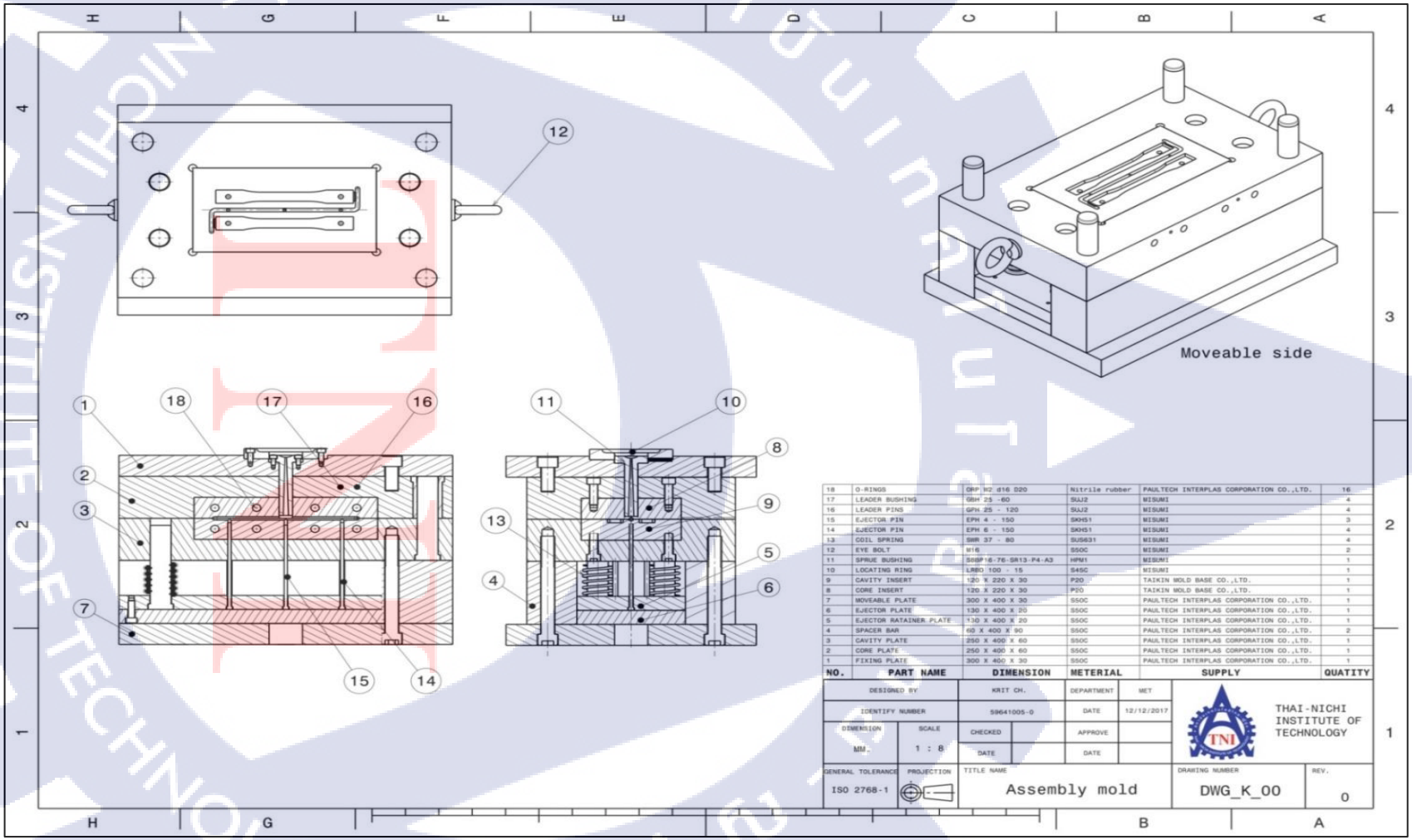
รูปที่ ก.15 แม่พิมพ์ส่วนเคลื่อนที่ที่ประกอบเข้ากับระบบปลดชิ้นงาน



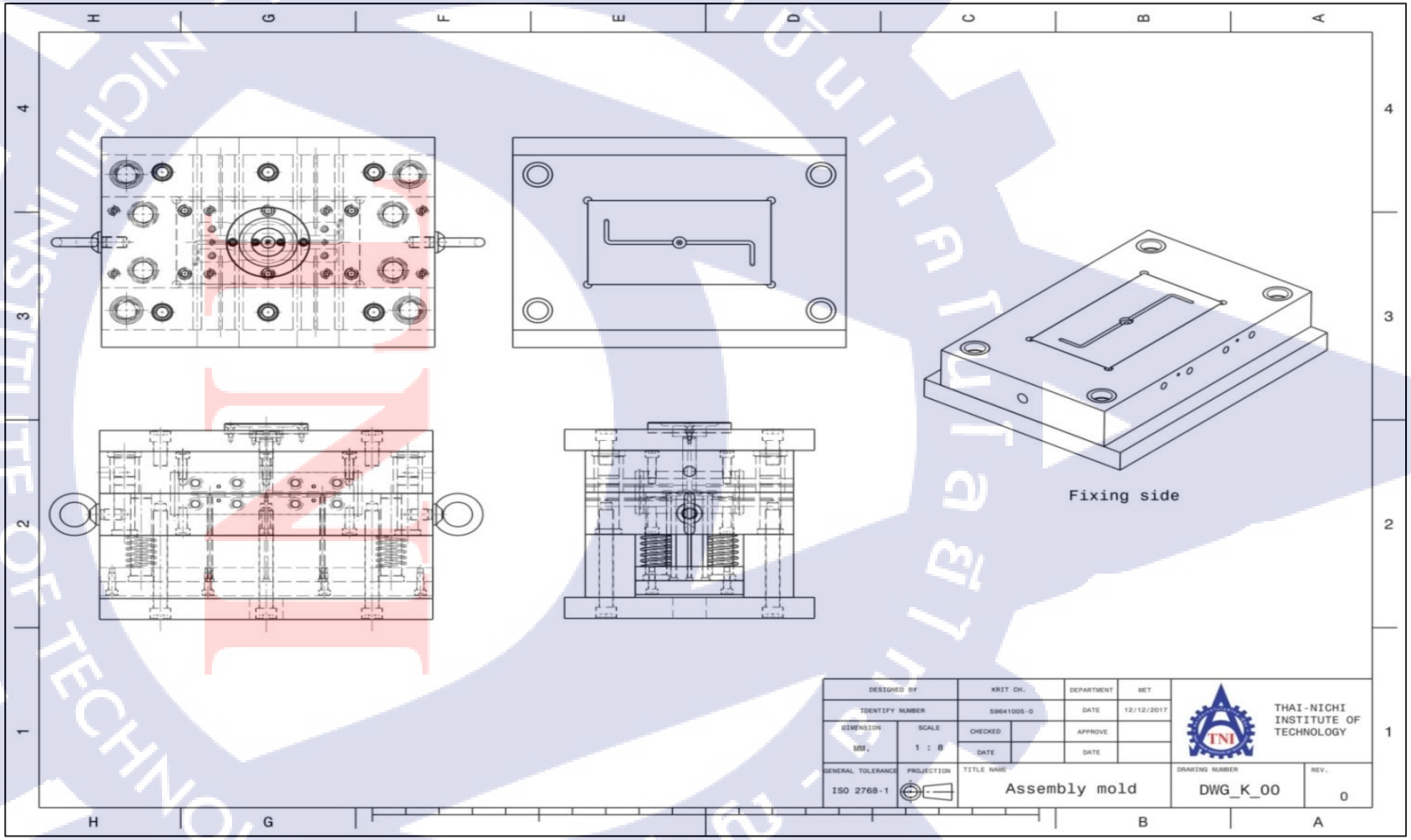
รูปที่ ก.16 แม่พิมพ์ฝั่งเคลื่อนที่ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

ภาคผนวก ข.

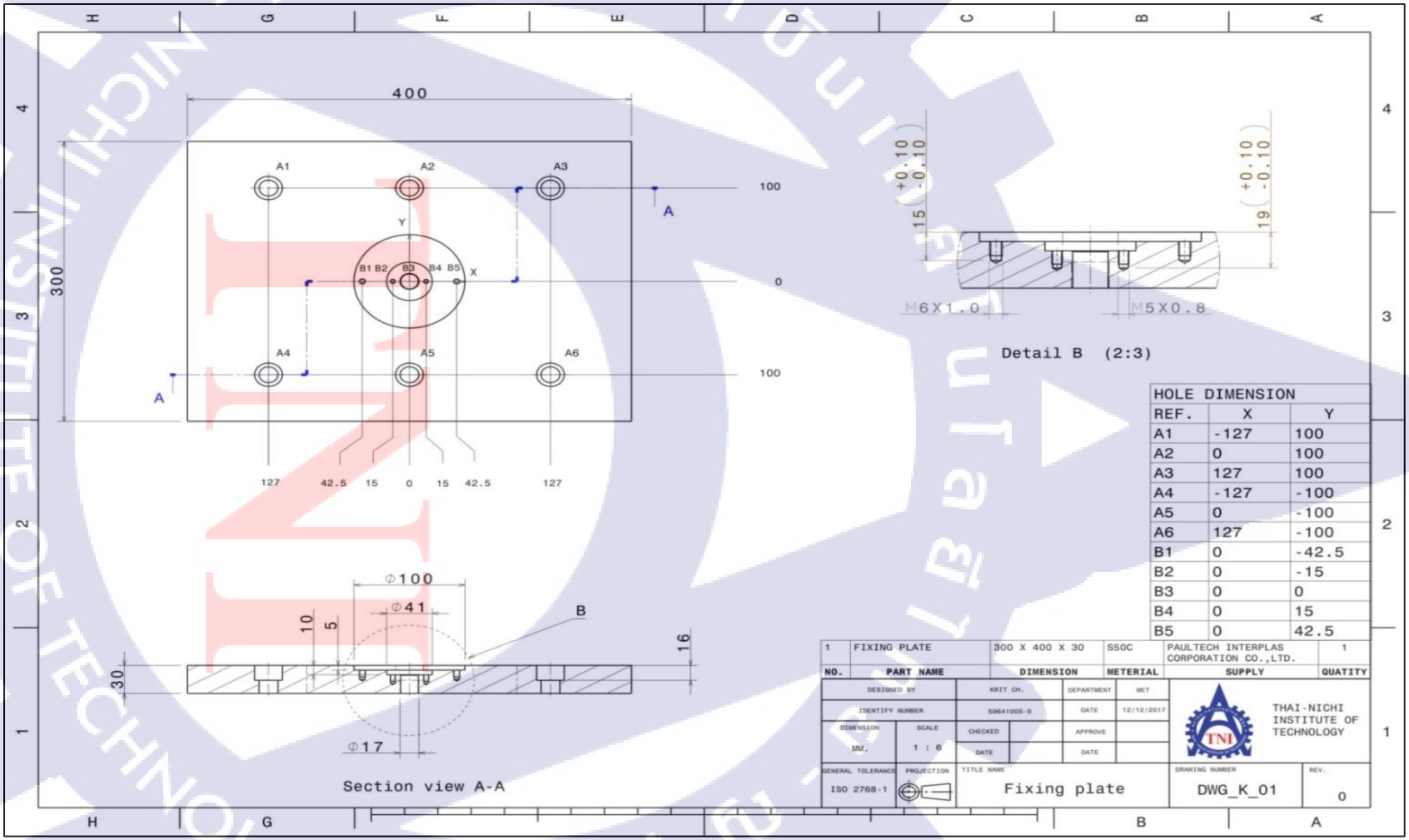
แบบภาพประกอบและภาพแยกชิ้นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก



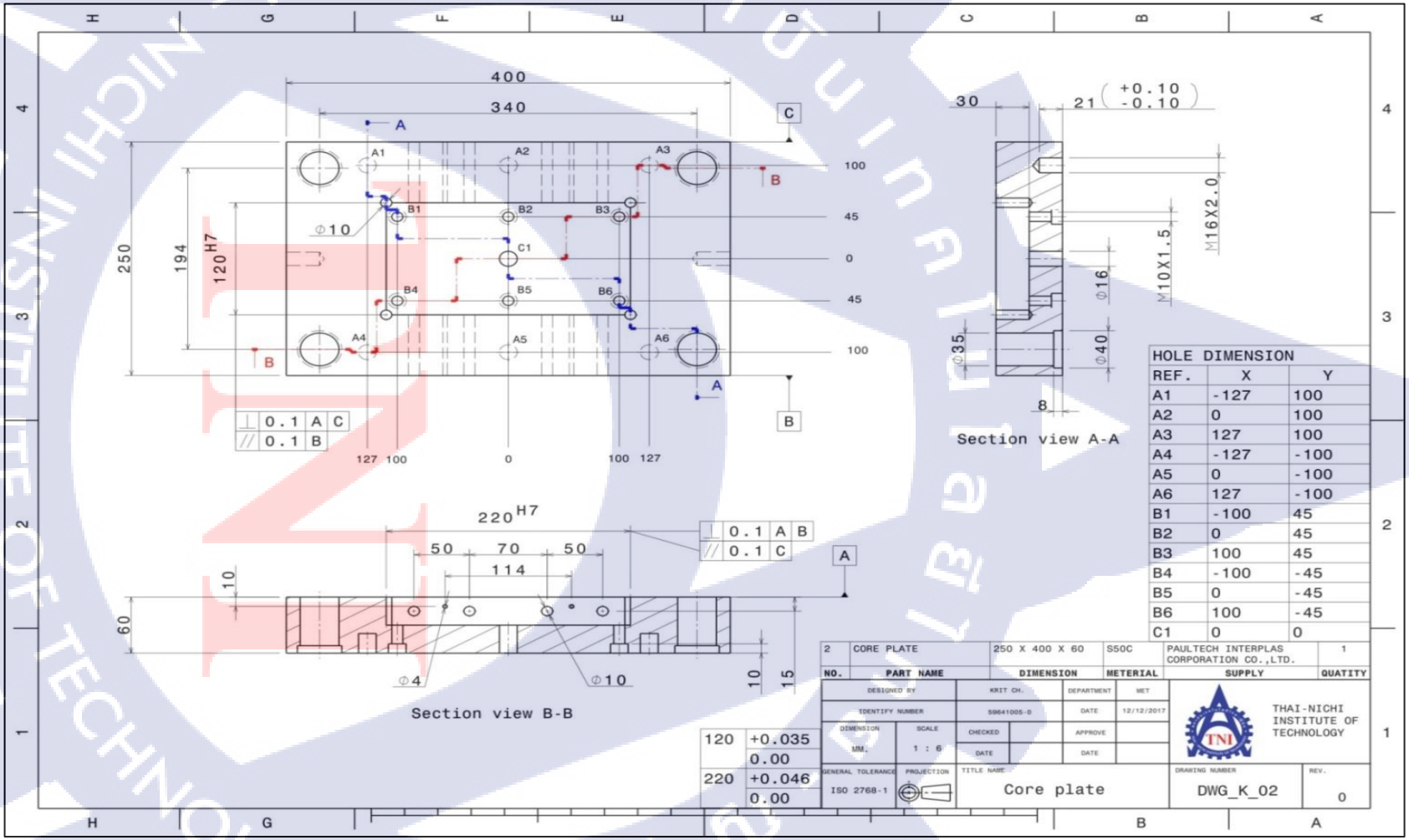
รูปที่ ข.1 ภาพประกอบของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย



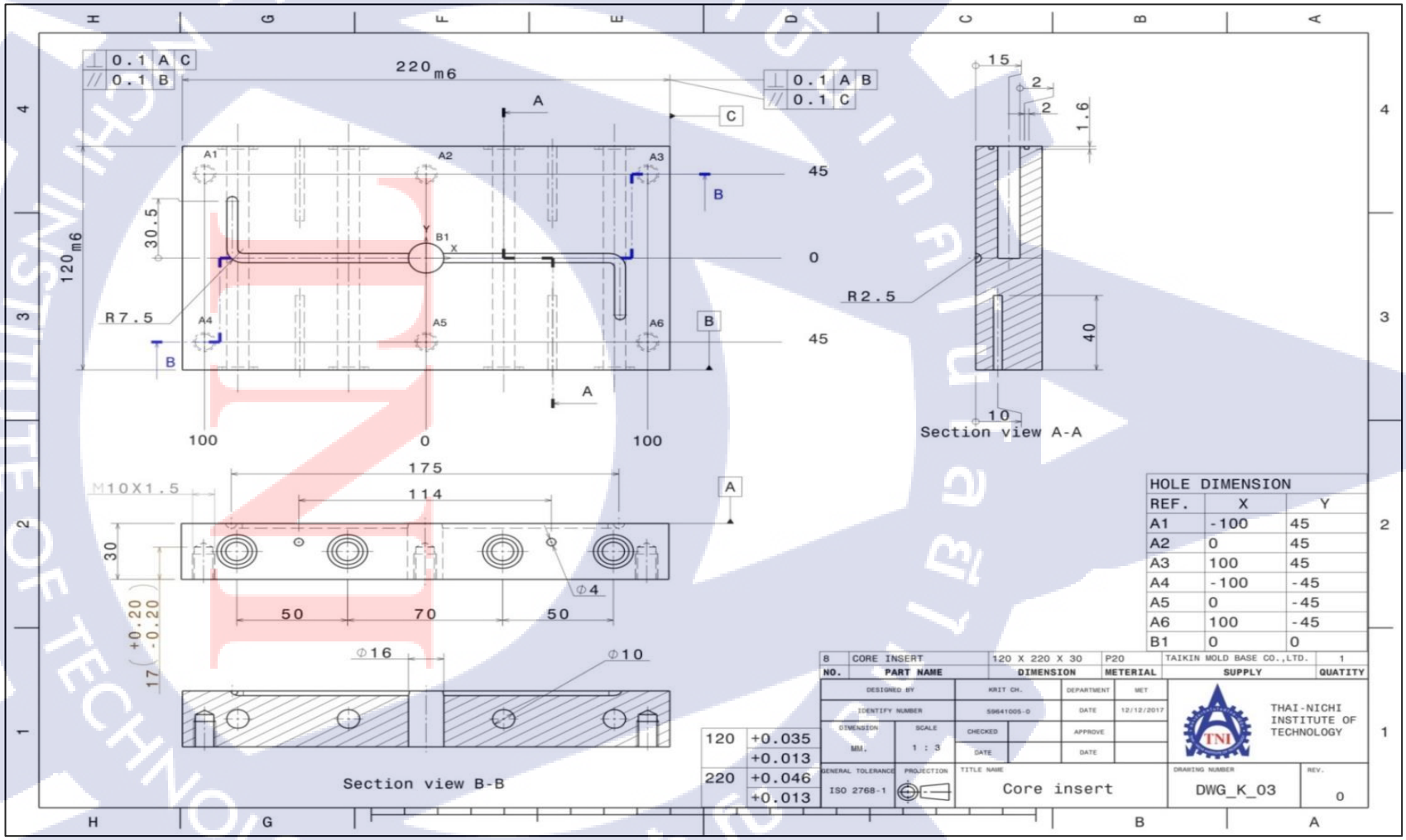
รูปที่ ข.1 ภาพประกอบของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)



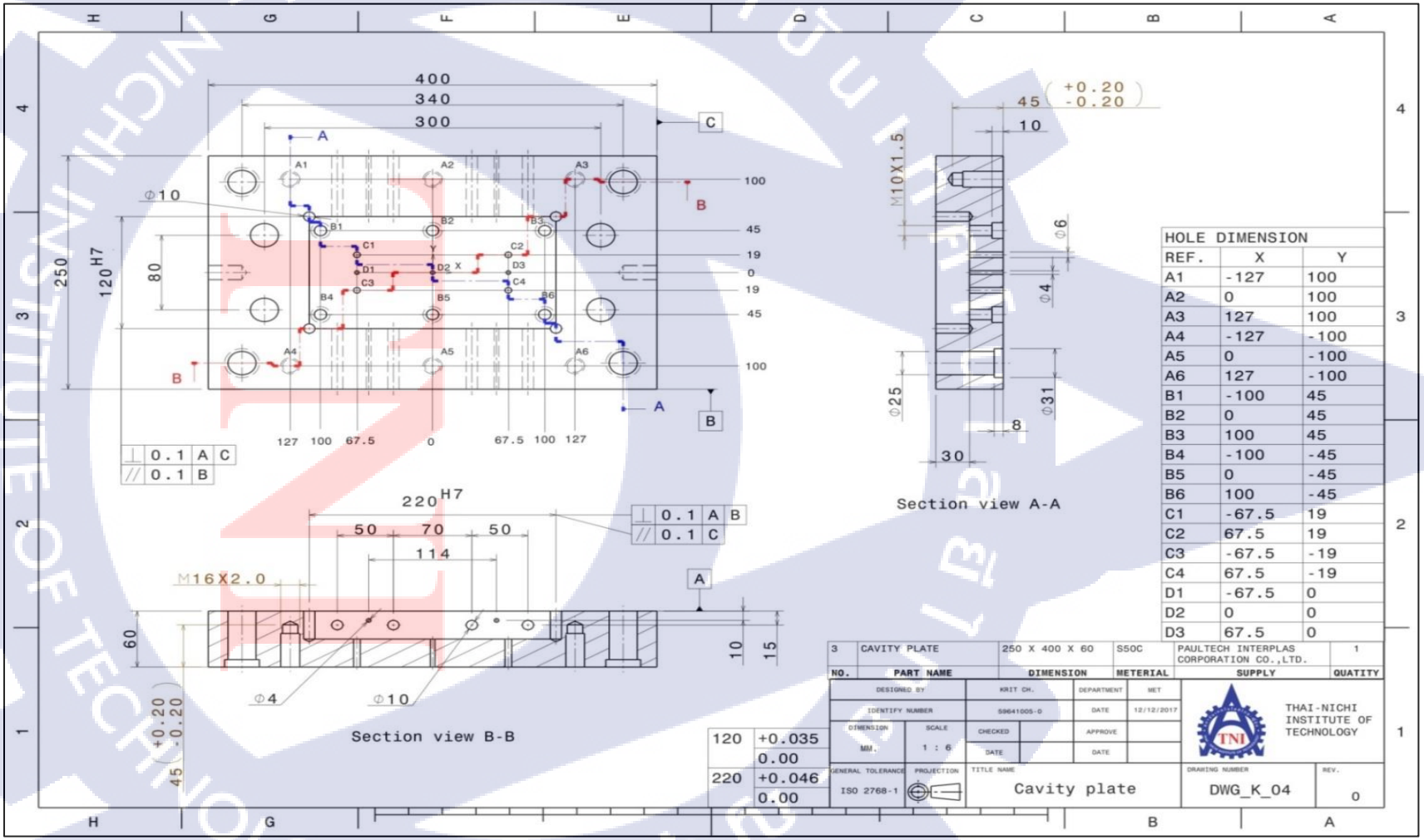
รูปที่ ข.2 ภาพแยกชิ้นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกชิ้นส่วนแผ่นปิดแม่พิมพ์บน



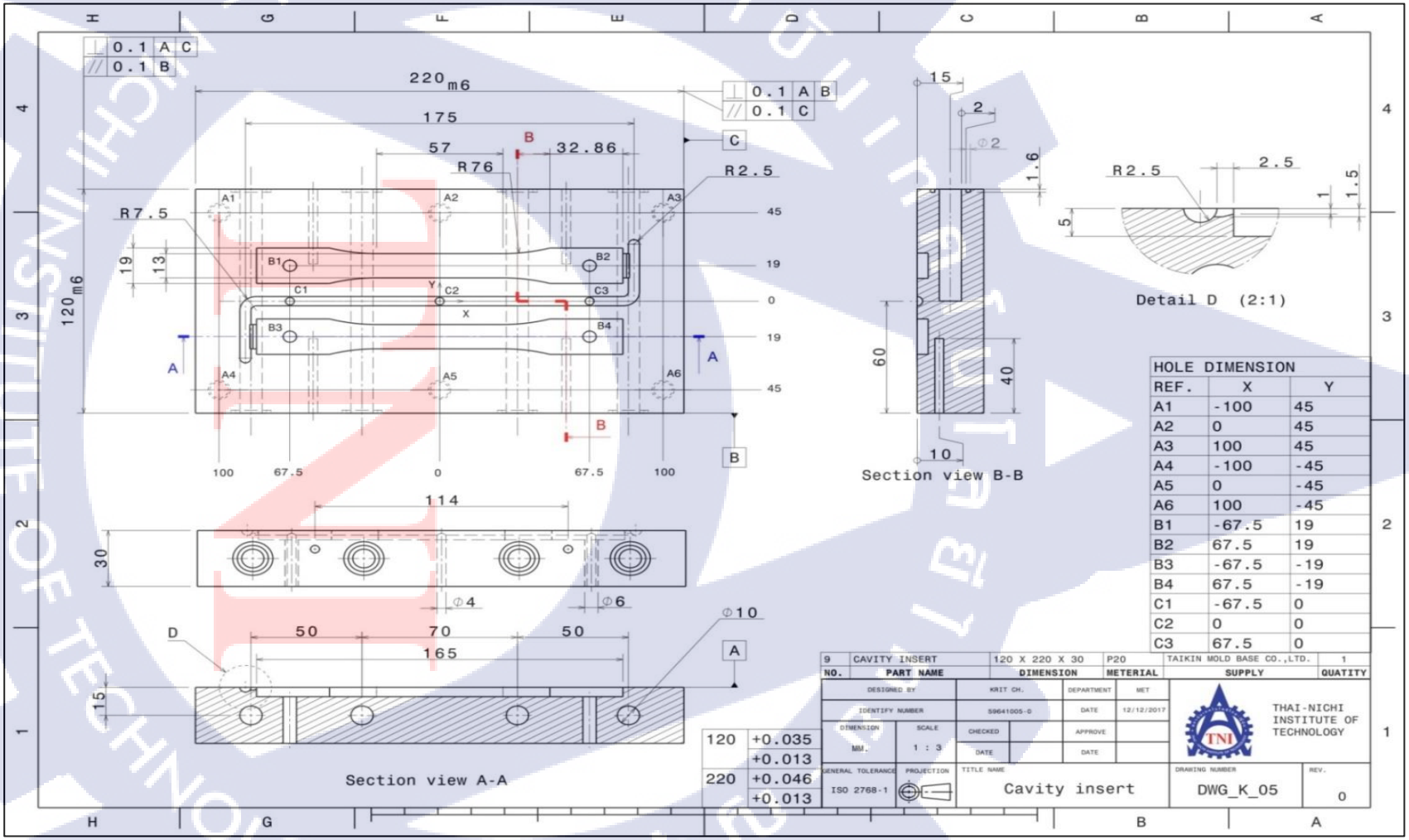
รูปที่ ข.3 ภาพแยกชิ้นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกชิ้นส่วนแผ่นแม่พิมพ์ฝั่งคอร์



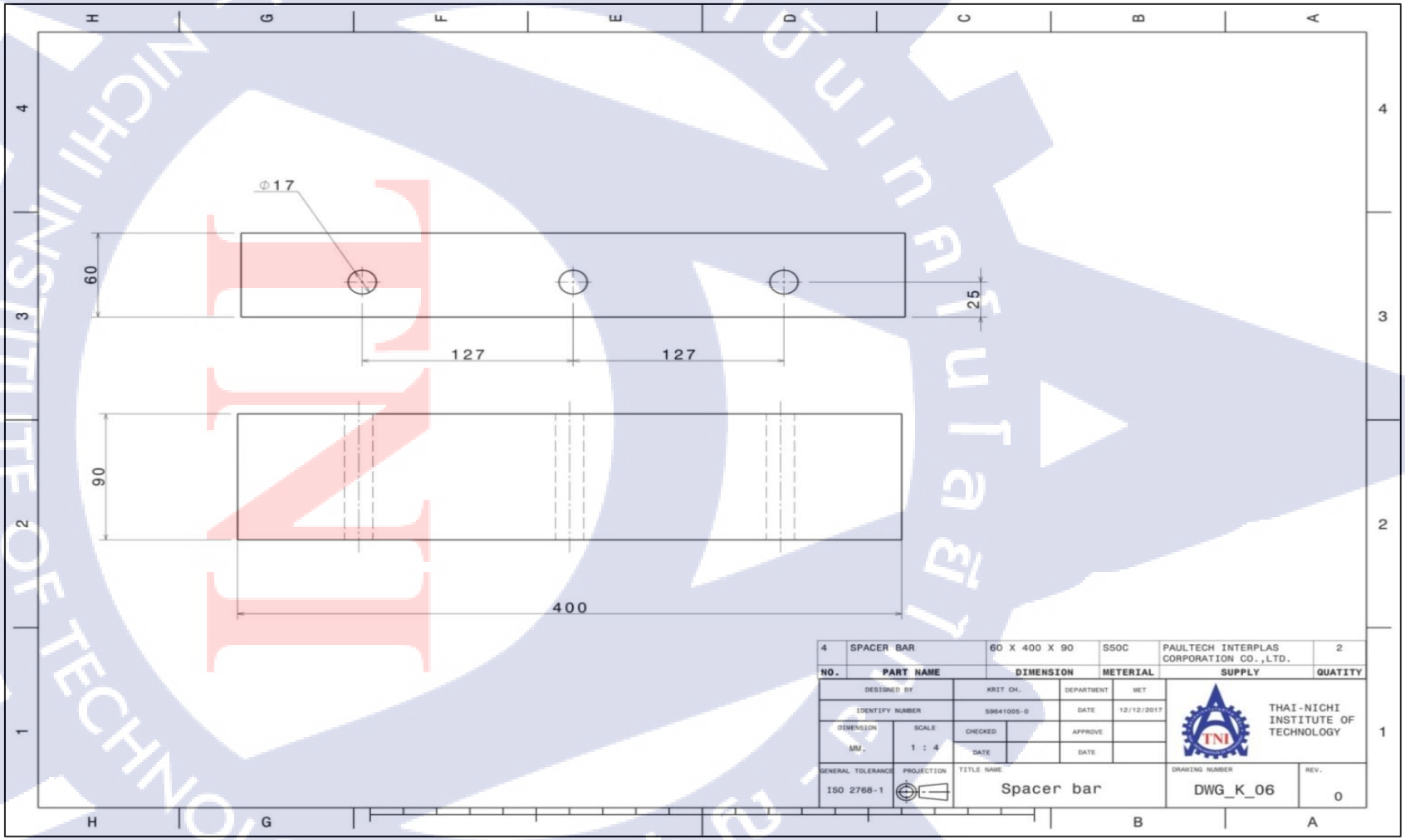
รูปที่ ข.2 ภาพแยกชิ้นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกชิ้นส่วนแผ่นแม่พิมพ์อินเสิร์ทฝั่งคอร์



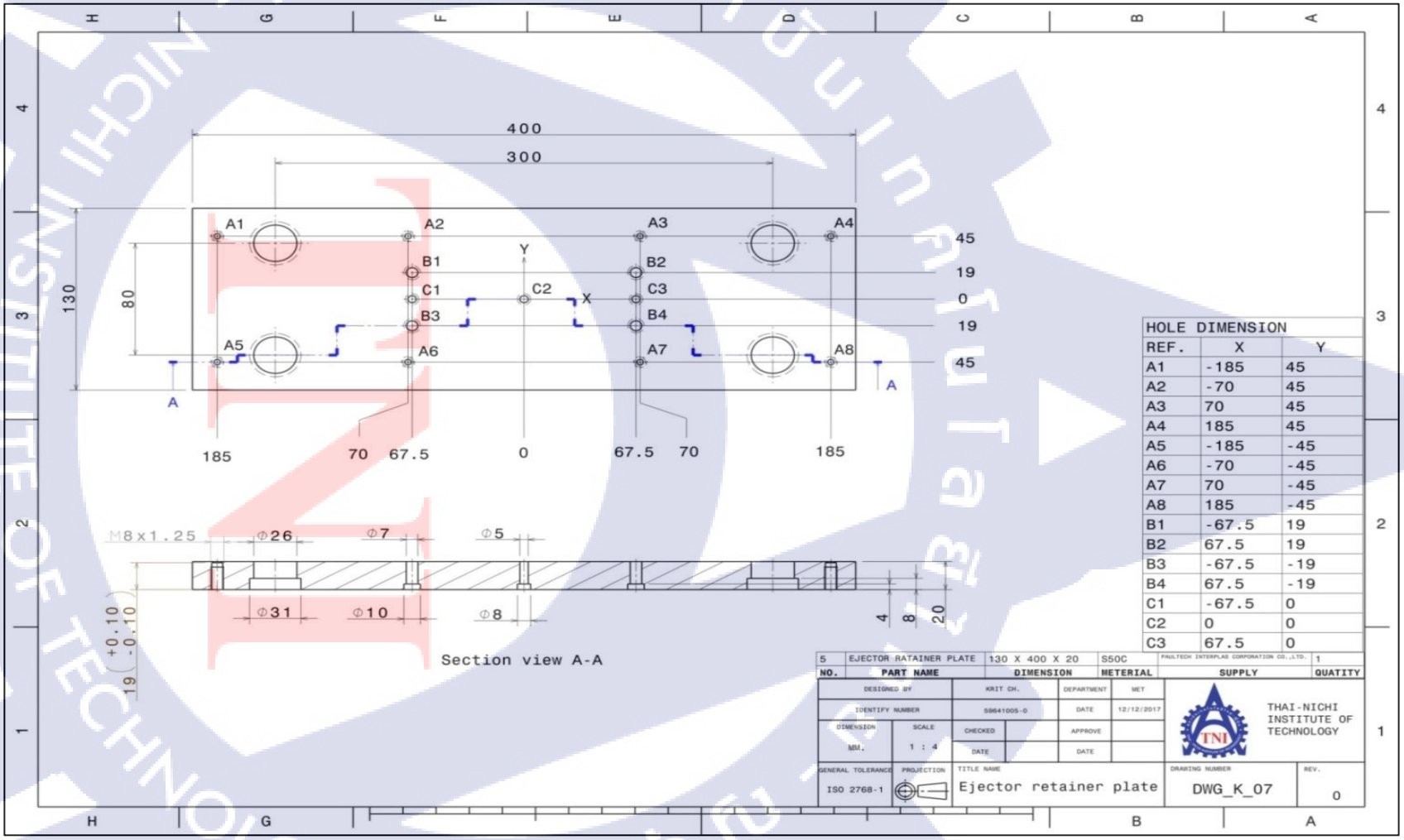
รูปที่ ข.3 ภาพแยกชิ้นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกชิ้นส่วนแผ่นแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้



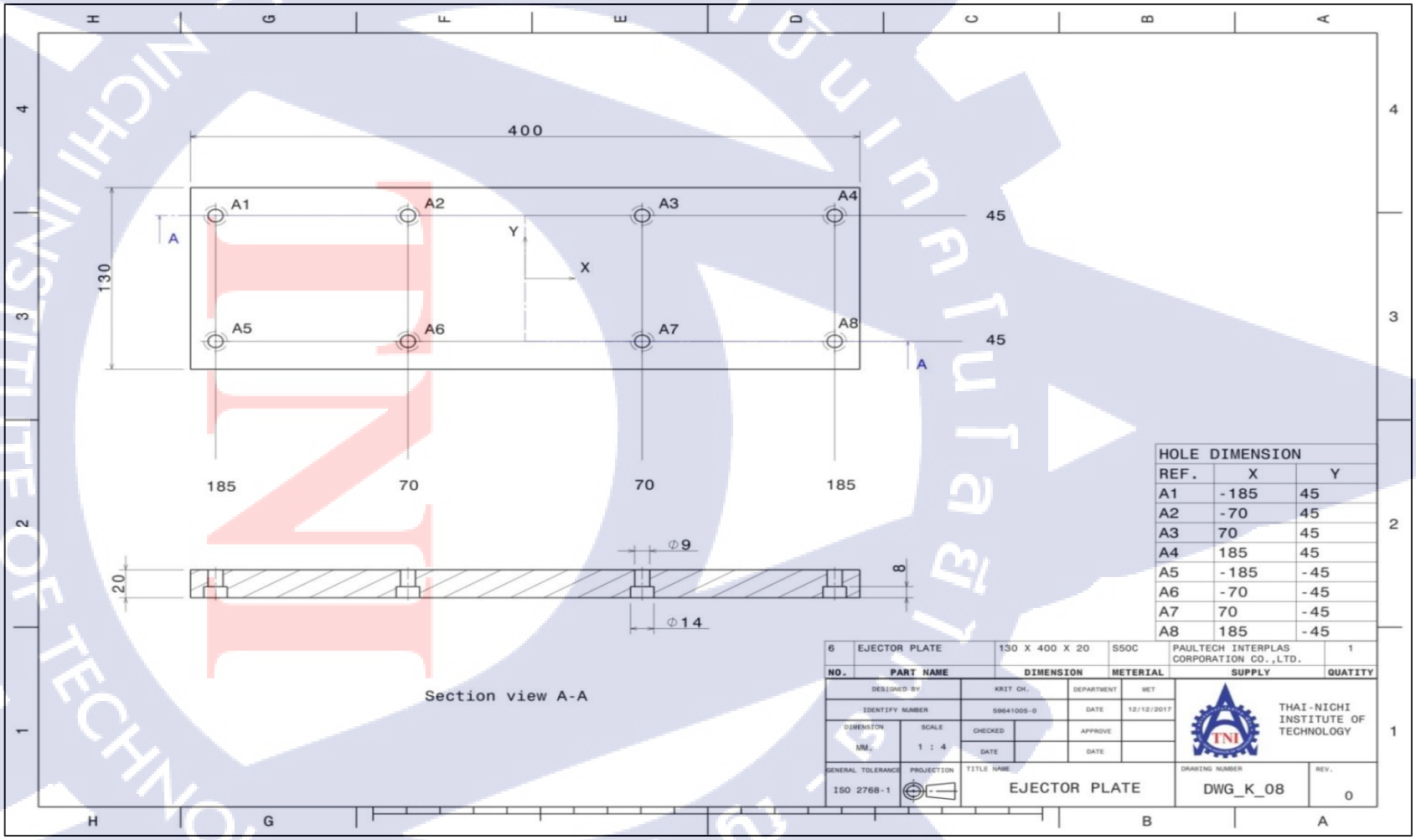
รูปที่ ข.6 ภาพแยกชิ้นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกชิ้นส่วนแผ่นแม่พิมพ์อินเสิร์ชฝั่งคาวิตี้



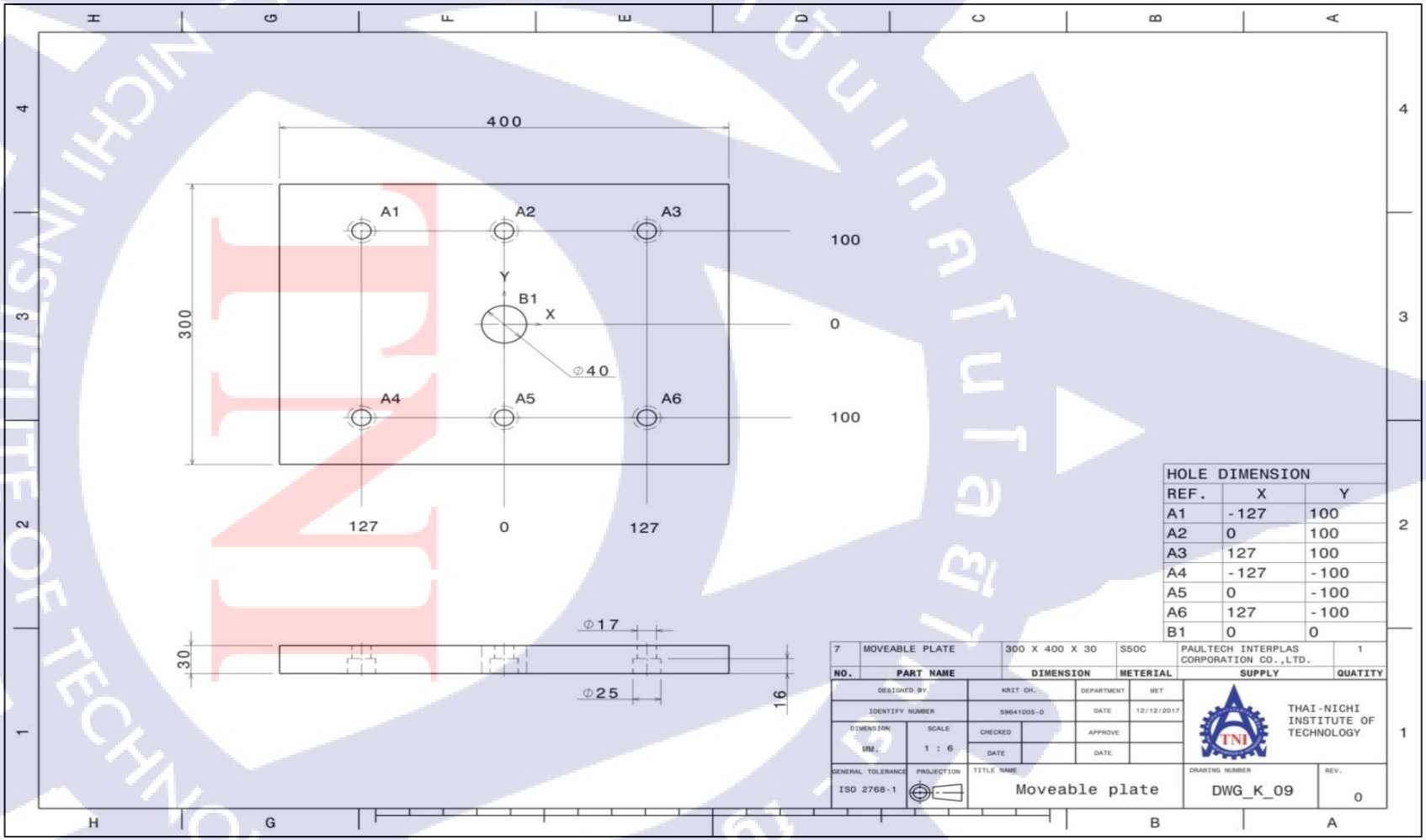
รูปที่ ข.7 ภาพแยกชิ้นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกชิ้นส่วนหมอนรองแม่พิมพ์



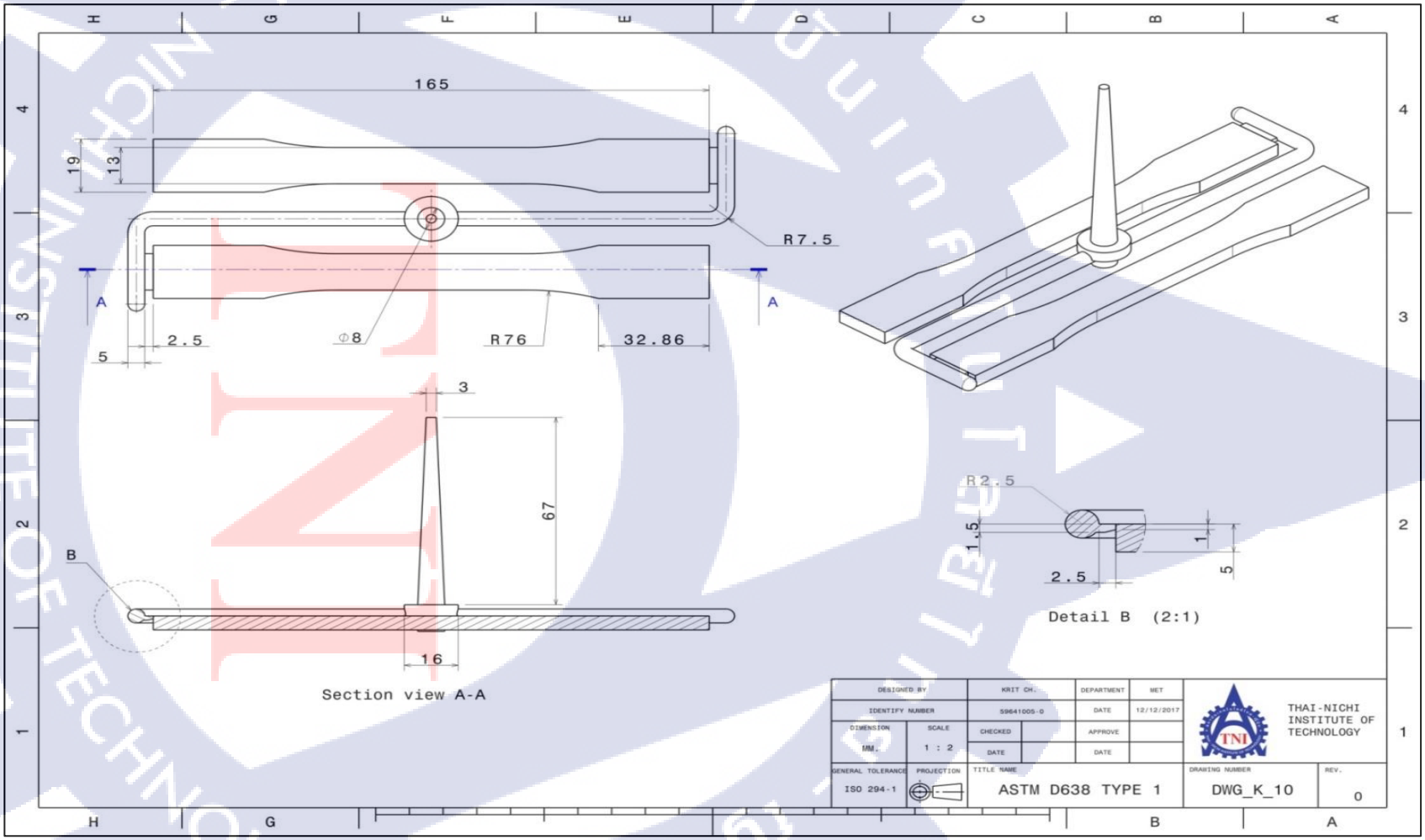
รูปที่ ข.8 ภาพแยกชิ้นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกชิ้นส่วนแผ่นกระทุ้งชิ้นงานบน



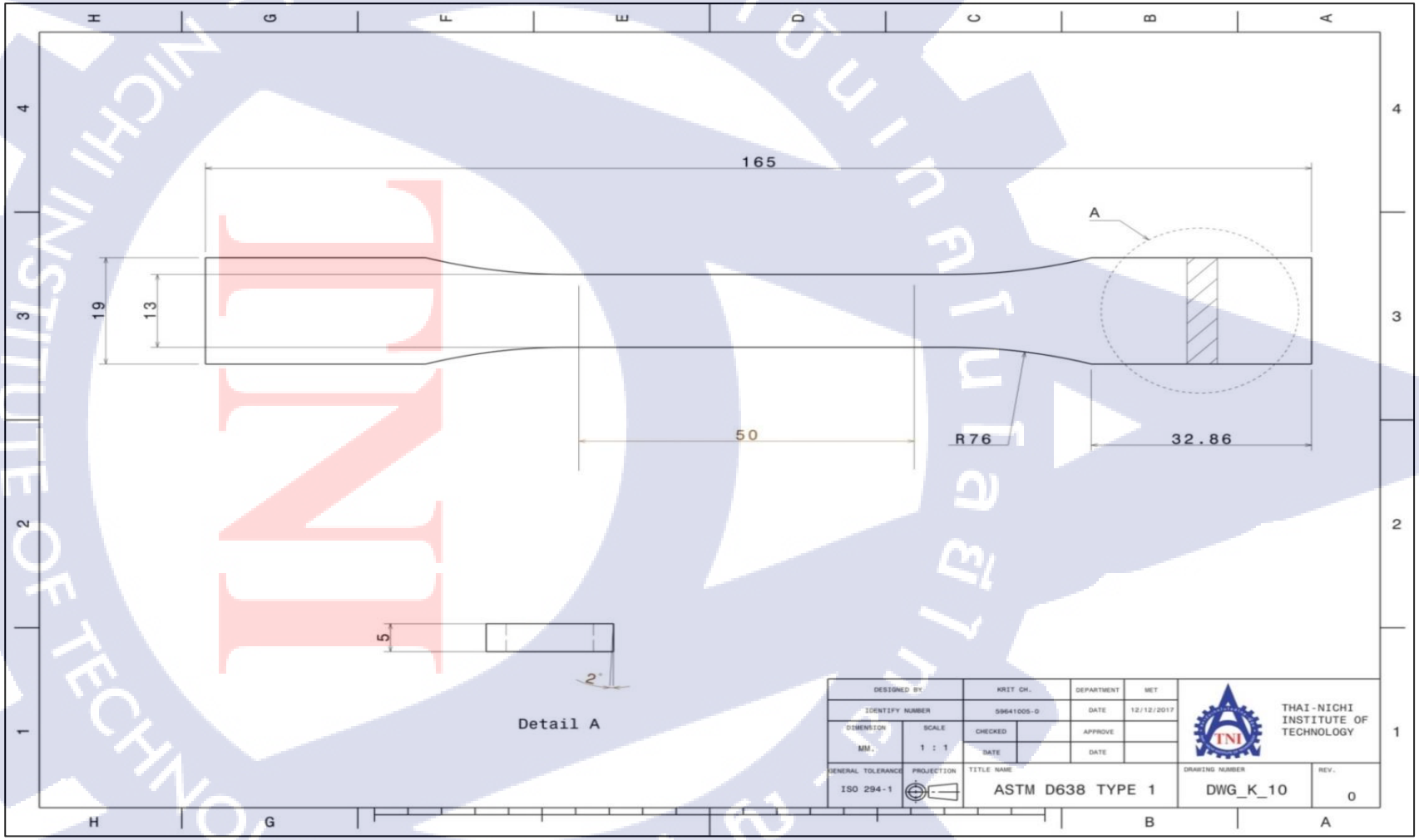
รูปที่ ข.9 ภาพแยกชิ้นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกชิ้นส่วนแผ่นกระทุ้งชิ้นงานล่าง



รูปที่ ข.10 ภาพแยกชิ้นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกชิ้นส่วนแผ่นยึดพิมพ์ล่าง



รูปที่ ข.11 ภาพร่างของชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ ข.12 ภาพร่างแสดงขนาดของชิ้นงานมาตรฐาน ASTM : D638

ภาคผนวก ค.

ข้อมูลผลการทดลอง

ข้อมูลการวัดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

ในส่วนภาคผนวกนี้จะแสดงค่าจริงที่วัดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ จะแสดงข้อมูลการวัดทั้งหมด 4 ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 3.16 ออกมาเป็นตารางที่ ค.1 เพื่อตรวจสอบว่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์ในแต่ละวัฏจักรมีค่าคงที่เพื่อให้ได้ชิ้นงานออกมามีคุณภาพในการฉีดใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยในตารางด้านล่างจะแสดงตำแหน่งที่อุณหภูมิแม่พิมพ์คงที่ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซสเซียส ทั้งหมด 5 วัฏจักรของการฉีด โดยเวลาต่อหนึ่งวัฏจักรจะอยู่ที่ 33.5 วินาที (เวลาในการฉีด 3.5 วินาที, เวลาในการหล่อเย็น 25 วินาที และเวลาเปิด-ปิดแม่พิมพ์ 5 นาที)

จากตารางสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่วัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่ง P2 และ P4 จะเห็นว่ามีค่าที่สูงกว่าตำแหน่งที่ P1 และ P3 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่น้ำมันร้อนผ่านเข้าตัวแม่พิมพ์ทำให้อุณหภูมิที่ออกมาจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิสูงถ่ายเทไปยังแม่พิมพ์ได้มากกว่า ทำให้ตำแหน่งปลายหรือตำแหน่งที่ออกจากแม่พิมพ์นั่นมีอุณหภูมิสูงกว่าเล็กน้อย

ในการควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์นี้จะรักษาอุณหภูมิให้สม่ำเสมอในทุกๆตัวอย่างการทดลองฉีดซึ่งในบางเงื่อนไขจำเป็นต้องปรับวาล์วน้ำเพื่อเพิ่ม-ลดความเร็วของน้ำหล่อเย็นที่ไหลผ่านแม่พิมพ์อีกด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของพลาสติกหลอมเหลวส่งผลให้แม่พิมพ์รักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงการออกแบบการทดลองเปลี่ยนไปด้วยนั่นเอง ซึ่งก่อนทำการฉีดจริงจะควบคุมและรักษาอุณหภูมิในแต่ละวัฏจักรให้เท่าๆกันก่อนประมาณ 10 วัฏจักรก่อนทำการฉีดตัวอย่างการทดลองถัดไป

ตารางที่ ค.1 แสดงข้อมูลการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆบนแม่พิมพ์

เวลา (วินาที)	P1	P2	P3	P4
1	54.5	56.4	55	57.8
2	54.4	56.35	54.8	57.7
3	54.3	56.35	54.7	57.6
4	54.25	56.2	54.55	57.45
5	54.15	56.1	54.4	57.35
6	54.05	56.05	54.3	57.25
7	53.95	56.25	54.15	57.15
8	53.85	56.35	54.05	57
9	53.75	56.3	53.9	56.9
10	53.65	56.15	53.8	56.75
11	53.15	55.8	53.65	56.65
12	52.4	55.65	53.55	56.5
13	51.9	55.55	53.4	56.35
14	51.55	55.55	53.2	56.2
15	51.35	55.95	53	56
16	51.6	55.5	52.75	55.8
17	51.8	55.45	52.5	55.65
18	51.85	54.9	52.3	55.45
19	51.9	54.95	52.1	55.3
20	52.5	54.75	52.3	55.7
21	53.3	55.1	53.55	56.4

ตารางที่ ค.1 แสดงข้อมูลการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆบนแม่พิมพ์ (ต่อ)

เวลา (วินาที)	P1	P2	P3	P4
22	53.9	55.6	54.45	56.95
23	54.25	56.05	55.05	57.35
24	54.5	56.45	55.35	57.65
25	54.6	56.6	55.5	57.8
26	54.65	56.7	55.6	57.9
27	54.65	56.85	55.55	57.9
28	54.65	56.85	55.4	57.9
29	54.6	56.8	55.25	57.85
30	54.5	56.7	55.1	57.75
31	54.4	56.5	54.95	57.6
32	54.3	56.55	54.8	57.5
33	54.2	56.5	54.65	57.4
34	54.1	56.25	54.5	57.25
35	54	56.25	54.35	57.15
36	53.9	56.2	54.25	57
37	53.8	56.2	54.1	56.9
38	53.7	56.35	54	56.8
39	53.65	56.25	53.9	56.7
40	53.55	56.2	53.75	56.6
41	53.45	56.2	53.65	56.45

ตารางที่ ค.1 แสดงข้อมูลการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆบนแม่พิมพ์ (ต่อ)

เวลา (วินาที)	P1	P2	P3	P4
42	53.1	55.6	53.5	56.35
43	52.3	55.65	53.4	56.2
44	51.75	55.35	53.25	56.1
45	51.4	55.45	53.1	55.95
46	51.15	55.45	52.85	55.8
47	51.35	55.65	52.6	55.6
48	51.6	55.35	52.4	55.4
49	51.65	55.1	52.15	55.2
50	51.7	54.95	51.95	55.05
51	52.2	54.85	52.05	55.35
52	53.05	55	53.2	56.1
53	53.65	55.3	54.2	56.65
54	54.05	55.75	54.8	57.1
55	54.3	56.25	55.15	57.4
56	54.4	56.55	55.35	57.55
57	54.45	56.7	55.4	57.65
58	54.5	56.8	55.35	57.7
59	54.5	56.8	55.25	57.7
60	54.45	56.75	55.1	57.65
61	54.4	56.7	54.95	57.55

ตารางที่ ค.1 แสดงข้อมูลการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆบนแม่พิมพ์ (ต่อ)

เวลา (วินาที)	P1	P2	P3	P4
62	54.35	56.6	54.8	57.45
63	54.25	56.6	54.65	57.35
64	54.15	56.5	54.5	57.25
65	54.05	56.4	54.35	57.1
66	53.95	56.3	54.2	57
67	53.9	56.2	54.1	56.9
68	53.75	56.25	53.95	56.75
69	53.7	56.15	53.85	56.65
70	53.6	56.1	53.75	56.55
71	53.5	56.05	53.6	56.45
72	53.4	56.05	53.5	56.35
73	53.1	55.9	53.4	56.2
74	52.3	55.6	53.25	56.1
75	51.7	55.4	53.1	55.95
76	51.3	55.3	52.95	55.8
77	51.05	55.1	52.7	55.65
78	51.25	55.5	52.5	55.45
79	51.45	55.35	52.25	55.25
80	51.55	55.2	52.05	55.1
81	51.55	55	51.85	54.9

ตารางที่ ค.1 แสดงข้อมูลการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆบนแม่พิมพ์ (ต่อ)

เวลา (วินาที)	P1	P2	P3	P4
82	52.05	54.8	51.85	55.15
83	52.8	54.9	52.85	55.8
84	53.45	55.25	53.95	56.4
85	53.9	55.8	54.65	56.9
86	54.15	56.1	55	57.2
87	54.3	56.4	55.2	57.4
88	54.35	56.5	55.3	57.5
89	54.4	56.55	55.25	57.55
90	54.35	56.5	55.15	57.55
91	54.3	56.45	55	57.5
92	54.25	56.45	54.85	57.45
93	54.15	56.5	54.7	57.35
94	54.05	56.45	54.55	57.25
95	53.95	56.3	54.4	57.1
96	53.85	56.35	54.25	57
97	53.75	56.35	54.1	56.9
98	53.65	56.2	54	56.75
99	53.55	56.2	53.85	56.65
100	53.45	56.1	53.75	56.55
101	53.35	56.05	53.6	56.45

ตารางที่ ค.1 แสดงข้อมูลการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆบนแม่พิมพ์ (ต่อ)

เวลา (วินาที)	P1	P2	P3	P4
102	53.3	56.05	53.5	56.3
103	53.2	55.9	53.4	56.2
104	52.9	55.8	53.25	56.1
105	52.1	55.2	53.15	55.95
106	51.55	55.05	53	55.8
107	51.15	54.95	52.85	55.7
108	50.85	55.65	52.6	55.55
109	50.95	55.3	52.3	55.25
110	51.2	55.05	52.1	55.1
111	51.35	55	51.95	54.95
112	51.4	54.85	51.75	54.8
113	51.8	54.7	51.65	55
114	52.7	54.85	52.65	55.65
115	53.35	55.35	53.75	56.3
116	53.8	55.75	54.45	56.75
117	54.05	56	54.85	57.05
118	54.2	56.25	55.05	57.25
119	54.25	56.45	55.15	57.35
120	54.3	56.55	55.15	57.4
121	54.25	56.6	55.05	57.45

ตารางที่ ค.1 แสดงข้อมูลการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆบนแม่พิมพ์ (ต่อ)

เวลา (วินาที)	P1	P2	P3	P4
122	54.2	56.6	54.9	57.4
123	54.05	56.45	54.65	57.25
124	53.95	56.4	54.5	57.15
125	53.85	56.35	54.35	57.05
126	53.75	56.3	54.2	56.95
127	53.65	56.2	54.05	56.8
128	53.55	56.15	53.9	56.7
129	53.55	56.15	53.85	56.65
130	53.45	56.1	53.7	56.55
131	53.3	56.05	53.55	56.35
132	53.2	56	53.4	56.25
133	53.2	56	53.35	56.2
134	53.1	55.8	53.25	56.1
135	52.8	55.3	53.1	55.9
136	52.05	55	52.95	55.8
137	51.4	55.05	52.85	55.65
138	51	54.95	52.65	55.5
139	50.75	54.95	52.5	55.4
140	50.5	54.8	52.25	55.25
141	50.35	54.6	52.05	55.05

ตารางที่ ค.1 แสดงข้อมูลการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆบนแม่พิมพ์ (ต่อ)

เวลา (วินาที)	P1	P2	P3	P4
142	50.65	54.35	51.8	54.85
143	50.85	55	51.6	54.7
144	50.95	55	51.45	54.5
145	51.05	54.8	51.25	54.4
146	51.7	54.55	51.45	54.8
147	52.55	54.9	52.7	55.55
148	53.15	55.4	53.65	56.1
149	53.5	55.6	54.2	56.45
150	53.75	55.7	54.5	56.75
151	53.85	55.9	54.7	56.9
152	53.95	56.15	54.75	57
153	54.05	56.25	54.75	57.15
154	54	56.25	54.65	57.15
155	53.9	56.2	54.45	57.05
156	53.85	56.2	54.3	57
157	53.85	56.15	54.25	56.95
158	53.75	56.25	54.1	56.85
159	53.6	56.15	53.9	56.7
160	53.5	56.2	53.75	56.6
161	53.45	56.2	53.7	56.55

ตารางที่ ค.1 แสดงข้อมูลการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆบนแม่พิมพ์ (ต่อ)

เวลา (วินาที)	P1	P2	P3	P4
162	53.35	56.05	53.55	56.4
163	53.25	55.95	53.45	56.3
164	53.2	55.85	53.35	56.2
165	53.1	55.8	53.2	56.1
166	53	55.8	53.1	55.95
167	52.85	55.7	52.95	55.8
168	52.5	55.2	52.85	55.7
169	51.7	55.15	52.7	55.55
170	51.15	55.05	52.6	55.45
171	50.75	54.95	52.4	55.3
172	50.5	54.5	52.15	55.1
173	50.8	54.75	51.95	54.95
174	51	54.6	51.7	54.75
175	51.15	54.5	51.55	54.65
176	51.15	54.4	51.35	54.45

ข้อมูลดิบของการวัดค่าความมันเงาของชิ้นงาน

ผลการดำเนินการวัดชิ้นงานที่ตำแหน่ง D1, D2 และค่าเฉลี่ยจะแสดงค่าการวัดในแต่ละชิ้นงานดังแสดงในตารางในภาคผนวกด้านล่าง โดยตำแหน่งของ D1 ส่วนใหญ่จะให้ค่าความมันเงาที่สูงกว่าเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่พลาสติกหลอมเหลวไหลมาจนสุดปลายชิ้นงาน ซึ่งค่าที่ตำแหน่ง D2 จะได้ต่ำกว่าเพราะเป็นตำแหน่งทางเข้าของพลาสติกหลอมเหลวซึ่งมีอิทธิพลจากหลายปัจจัยทให้ชิ้นงานมีโอกาสเกิดปัญหาด้านคุณภาพที่ตำแหน่งวัดเล็กน้อย ส่วนตัวอย่างที่ค่าที่ตำแหน่ง D2 มากกว่า D1 นั้นอาจมีอิทธิพลมาจากอุณหภูมิแม่พิมพ์อยู่ในช่วงที่ต่ำทำให้พลาสติกเย็นตัวเร็วหรือร้อนเกินไปที่ผิวแม่พิมพ์กว่าที่จะไหลเต็มเบ้าคาวิตี้ ทำให้มีโอกาสเกิดรอยเชื่อมประสานและส่งผลให้ชิ้นงานมีความมันเงาลดลง จากที่วัดค่าจริงจะเห็นได้ว่าตัวอย่างทดลองที่ 1, 3, 7, 9 และ12 ค่าที่วัดที่ตำแหน่ง D2 มีค่ามากกว่าตำแหน่ง D1 ด้วยการออกแบบในตัวอย่างการทดลองที่กล่าวมานั้นอุณหภูมิของแม่พิมพ์อยู่ที่ 40 – 50 องศาเซสเซียส หากเทียบกับตัวอย่างการทดลองอื่นๆจะอยู่ในช่วงขอบเขตล่างของการออกแบบการทดลอง คือ ตำแหน่งการออกแบบคอมโพสิตที่ -1.68 และ -1

ปัจจัยที่ส่งผลให้ชิ้นงานมีความมันเงานั่นจากบทที่ผ่านมาทางทฤษฐี ได้กล่าวว่าอิทธิพลของความร้อนที่มาจากอุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลวและอุณหภูมิของแม่พิมพ์เป็นตัวแปรหลักในผิวความมันเงาของชิ้นงาน ในส่วนพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดพลาสติกก็สำคัญไม่แพ้กัน ในการวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรสามตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิปลายหัวฉีด อุณหภูมิของแม่พิมพ์และความเร็วฉีดย้ำที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ ส่วนพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่เหลือจำเป็นต้องกำหนดให้คงที่ ซึ่งในการทดลองจริงการฉีดที่ตัวแปรหลักเปลี่ยนแปลงไปแต่ตัวแปรตามไม่เปลี่ยนแปลงอาจจะส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานได้โดยตรงด้วย จึงเป็นที่มาของการเกิดปัญหาในชิ้นงานที่กล่าวมา และค่าความมันเงาที่วัดได้ในตำแหน่งที่วัดทั้งสองมีโอกาสมากกว่าหรือน้อยกว่ากันได้เช่นกัน

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าความมันเงาในตำแหน่ง D1 และ D2 ที่วัดได้จริง

No.	D1	D2	Mean	No.	D1	D2	Mean
1.1	51.0	55.6	53.3	**3.1**	37.9	47.4	42.7
1.2	46.8	60.7	53.8	**3.2**	28.5	37.1	32.8
1.3	54.3	62.4	58.4	**3.3**	39.4	53.6	46.5
1.4	45.3	51.1	48.2	**3.4**	28.2	41.8	35.0
1.5	53.8	53.7	53.8	**3.5**	35.6	47.4	41.5
1.6	56.4	56.6	56.5	**3.6**	29.2	38.2	33.7
1.7	54.0	61.7	57.9	**3.7**	32.1	49.0	40.6
1.8	55.3	55.0	55.2	**3.8**	35.7	49.0	42.4
1.9	56.7	62.6	59.7	**3.9**	38.2	49.9	44.1
1.10	55.1	53.8	54.5	**3.10**	30.0	44.7	37.4
Average	**52.9**	**57.3**	**55.1**	Average	**33.5**	**45.8**	**39.6**
2.1	81.3	52.2	66.8	**4.1**	63.6	46.0	54.8
2.2	76.6	71.8	74.2	**4.2**	61.5	61.3	61.4
2.3	78.5	52.3	65.4	**4.3**	64.6	40.8	52.7
2.4	79.9	65.5	72.7	**4.4**	65.5	62.6	64.1
2.5	80.6	42.1	61.4	**4.5**	65.2	47.8	56.5
2.6	79.0	53.0	66.0	**4.6**	53.8	62.8	58.3
2.7	81.3	70.8	76.1	**4.7**	60.2	65.8	63.0
2.8	77.5	45.9	61.7	**4.8**	65.6	48.3	57.0
2.9	78.4	68.1	73.3	**4.9**	52.0	65.6	58.8
2.10	75.9	37.6	56.8	**4.10**	63.9	44.6	54.3
Average	**78.9**	**55.9**	**67.4**	Average	**61.6**	**54.6**	**58.1**

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าความมันเงาในตำแหน่ง D1 และ D2 ที่วัดได้จริง (ต่อ)

No.	D1	D2	Mean	No.	D1	D2	Mean
5.1	59.4	61.5	60.5	**7.1**	29.4	45.3	37.4
5.2	61.0	52.0	56.5	**7.2**	36.0	39.8	37.9
5.3	75.1	64.9	70.0	**7.3**	29.5	45.1	37.3
5.4	61.4	64.9	63.2	**7.4**	34.9	42.0	38.5
5.5	61.7	56.7	59.2	**7.5**	30.7	47.5	39.1
5.6	52.9	59.1	56.0	**7.6**	37.4	41.0	39.2
5.7	63.0	65.7	64.4	**7.7**	40.6	47.1	43.9
5.8	63.1	66.5	64.8	**7.8**	27.9	43.5	35.7
5.9	58.4	60.0	59.2	**7.9**	41.6	53.2	47.4
5.10	54.0	54.8	54.4	**7.10**	29.0	44.4	36.7
Average	**61.0**	**60.6**	**60.8**	Average	**33.7**	**44.9**	**39.3**
6.1	77.6	67.6	72.6	**8.1**	56.1	49.6	52.9
6.2	75.7	48.6	62.2	**8.2**	55.7	42.3	49.0
6.3	77.7	48.6	63.2	**8.3**	40.2	66.0	53.1
6.4	77.4	69.5	73.5	**8.4**	53.9	52.3	53.1
6.5	78.6	49.7	64.2	**8.5**	67.6	47.9	57.8
6.6	76.3	67.9	72.1	**8.6**	53.0	62.5	57.8
6.7	81.3	73.8	77.6	**8.7**	55.3	67.0	61.2
6.8	77.2	47.5	62.4	**8.8**	61.4	49.6	55.5
6.9	82.4	75.1	78.8	**8.9**	48.1	49.5	48.8
6.10	78.2	47.3	62.8	**8.10**	53.2	56.5	54.9
Average	**78.2**	**59.6**	**68.9**	Average	**54.5**	**54.3**	**54.4**

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าความมันเงาในตำแหน่ง D1 และ D2 ที่วัดได้จริง (ต่อ)

No.	D1	D2	Mean	No.	D1	D2	Mean
9.1	18.4	32.1	25.3	**11.1**	72.9	73.3	73.1
9.2	24.1	34.2	29.2	**11.2**	84.7	85.0	84.9
9.3	43.6	53.8	48.7	**11.3**	68.9	78.5	73.7
9.4	44.1	48.9	46.5	**11.4**	80.4	63.7	72.1
9.5	39.1	26.5	32.8	**11.5**	81.7	63.8	72.8
9.6	43.7	42.8	43.3	**11.6**	72.2	72.3	72.3
9.7	30.5	43.4	37.0	**11.7**	69.6	58.4	64.0
9.8	22.4	37.9	30.2	**11.8**	80.2	54.9	67.6
9.9	48.7	53.6	51.2	**11.9**	76.4	72.8	74.6
9.10	47.5	48.6	48.1	**11.10**	82.8	62.2	72.5
Average	**36.2**	**42.2**	**39.2**	Average	**77.0**	**68.5**	**72.7**
10.1	76.5	52.0	64.3	**12.1**	32.7	36.9	34.8
10.2	67.5	44.4	56.0	**12.2**	35.8	43.8	39.8
10.3	41.5	46.3	43.9	**12.3**	36.1	35.2	35.7
10.4	49.3	56.3	52.8	**12.4**	35.7	41.2	38.5
10.5	63.3	45.5	54.4	**12.5**	33.3	43.5	38.4
10.6	75.8	40.3	58.1	**12.6**	42.1	39.4	40.8
10.7	50.4	49.8	50.1	**12.7**	41.8	37.4	39.6
10.8	56.0	36.3	46.2	**12.8**	39.1	34.8	37.0
10.9	54.7	43.8	49.3	**12.9**	45.9	35.6	40.8
10.10	72.9	45.6	59.3	**12.10**	34.0	36.1	35.1
Average	**60.8**	**46.0**	**53.4**	Average	**37.7**	**38.4**	**38.0**

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าความมันเงาในตำแหน่ง D1 และ D2 ที่วัดได้จริง (ต่อ)

No.	D1	D2	Mean	No.	D1	D2	Mean
13.1	43.8	42.7	43.3	**15.1**	42.1	37.7	39.9
13.2	49.2	42.7	46.0	**15.2**	45.3	28.3	36.8
13.3	42.5	48.6	45.6	**15.3**	41.0	39.4	40.2
13.4	46.6	17.8	32.2	**15.4**	44.0	24.3	34.2
13.5	44.4	35.0	39.7	**15.5**	44.4	40.5	42.5
13.6	41.7	34.1	37.9	**15.6**	64.2	47.7	56.0
13.7	46.8	39.4	43.1	**15.7**	65.0	30.3	47.7
13.8	40.5	20.8	30.7	**15.8**	38.2	22.5	30.4
13.9	46.5	32.2	39.4	**15.9**	46.3	27.7	37.0
13.10	39.3	39.1	39.2	**15.10**	48.4	29.1	38.8
Average	**44.1**	**35.2**	**39.7**	Average	**47.9**	**32.8**	**40.3**
14.1	46.1	33.2	39.7	**16.1**	42.5	16.3	29.4
14.2	43.9	30.3	37.1	**16.2**	58.7	49.4	54.1
14.3	51.3	38.1	44.7	**16.3**	57.0	42.0	49.5
14.4	45.0	36.5	40.8	**16.4**	43.2	43.8	43.5
14.5	38.7	34.5	36.6	**16.5**	51.1	44.0	47.6
14.6	43.2	35.2	39.2	**16.6**	34.8	39.9	37.4
14.7	42.2	28.9	35.6	**16.7**	43.7	45.6	44.7
14.8	43.8	40.5	42.2	**16.8**	45.5	35.2	40.4
14.9	46.8	44.9	45.9	**16.9**	35.7	47.4	41.6
14.10	48.0	32.0	40.0	**16.10**	54.5	49.2	51.9
Average	**44.9**	**35.4**	**40.2**	Average	**46.7**	**41.3**	**44.0**

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าความมันเงาในตำแหน่ง D1 และ D2 ที่วัดได้จริง (ต่อ)

No.	D1	D2	Mean	No.	D1	D2	Mean
17.1	35.0	30.3	32.7	**19.1**	55.7	38.4	47.1
17.2	46.1	45.0	45.6	**19.2**	44.7	71.1	57.9
17.3	43.2	40.9	42.1	**19.3**	49.8	45.5	47.7
17.4	47.5	54.0	50.8	**19.4**	44.9	24.5	34.7
17.5	40.8	28.5	34.7	**19.5**	48.6	26.0	37.3
17.6	43.8	39.4	41.6	**19.6**	45.7	41.6	43.7
17.7	28.0	36.8	32.4	**19.7**	44.8	16.3	30.6
17.8	53.5	57.0	55.3	**19.8**	47.2	33.8	40.5
17.9	43.2	28.7	36.0	**19.9**	47.2	47.1	47.2
17.10	44.0	27.1	35.6	**19.10**	48.5	30.3	39.4
Average	**42.5**	**38.8**	**40.6**	Average	**47.7**	**37.5**	**42.6**
18.1	46.6	16.4	31.5				
18.2	52.4	42.9	47.7				
18.3	55.2	48.0	51.6				
18.4	59.7	44.3	52.0				
18.5	52.7	27.2	40.0				
18.6	50.3	32.3	41.3				
18.7	43.5	29.5	36.5				
18.8	44.8	52.3	48.6				
18.9	43.1	29.1	36.1				
18.10	46.1	47.2	46.7				
Average	**49.4**	**36.9**	**43.2**				

ภาคผนวก ง.

ข้อมูลการตั้งค่าบนโปรแกรมจำลองทางวิศวกรรมของการฉีดพลาสติก

Cooling channel

Setting : By flow rate

Channel ID	T (oC)	Q (cm^3/sec)	Coolant	D (mm)	Re
EC1 (Group 1)	140	120	Oil	10	5256.44
EC2 (Group 2)	140	120	Oil	10	5256.44
EC3 (Group 3)	40	200	Water	10	38575.3
EC4 (Group 4)	40	200	Water	10	38575.3

Apply current setting to group | Apply current setting to all

Heating rod

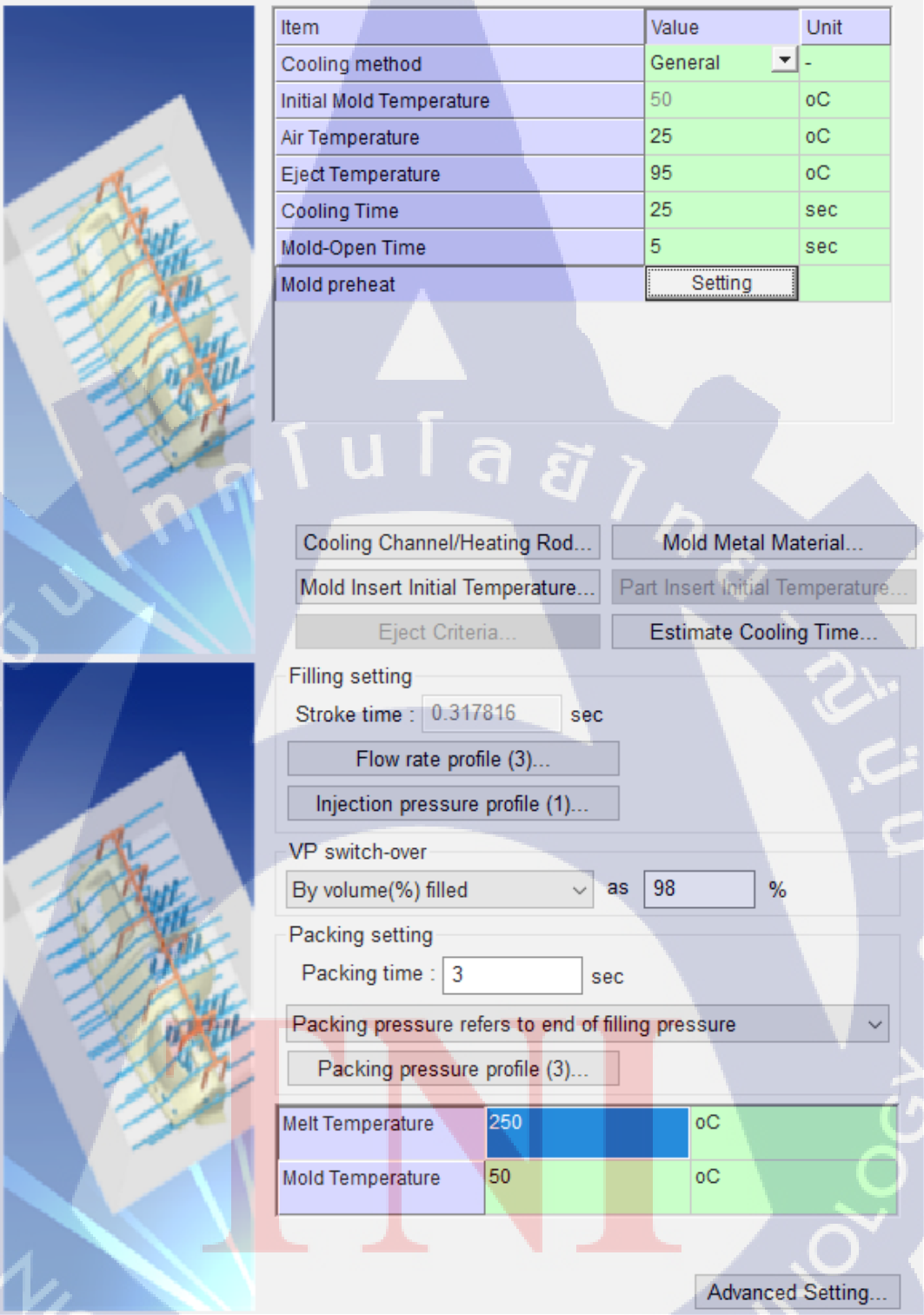
Heating rod ID	Heating method	Value	Unit

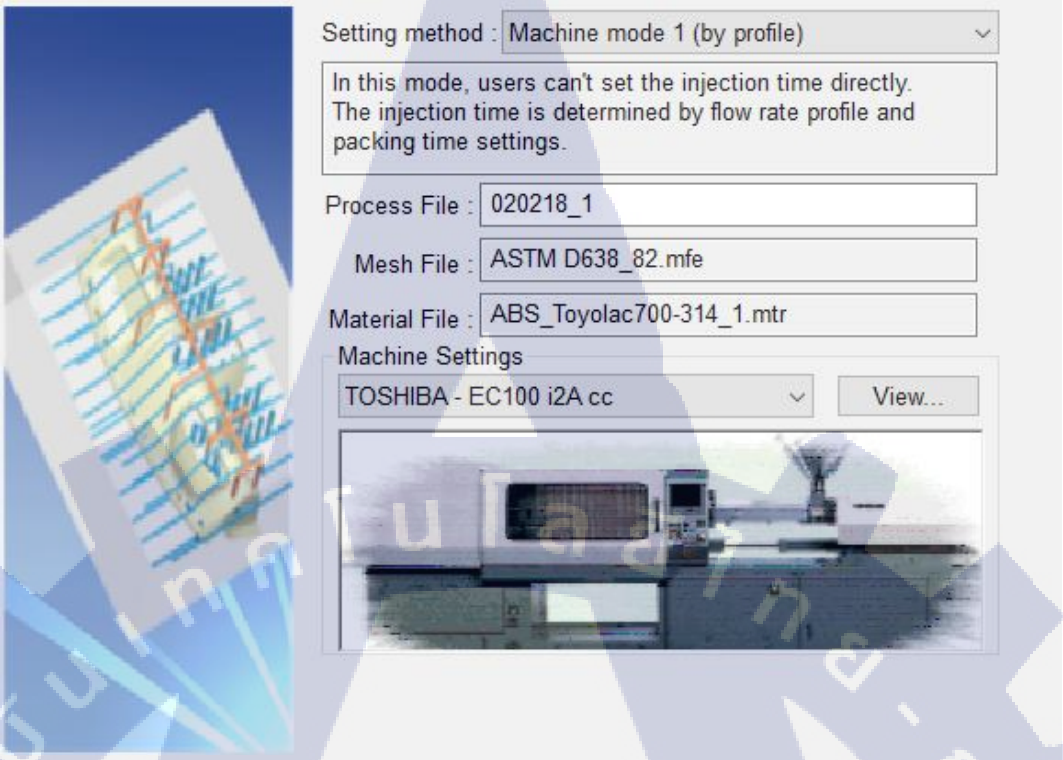
Apply current setting to all

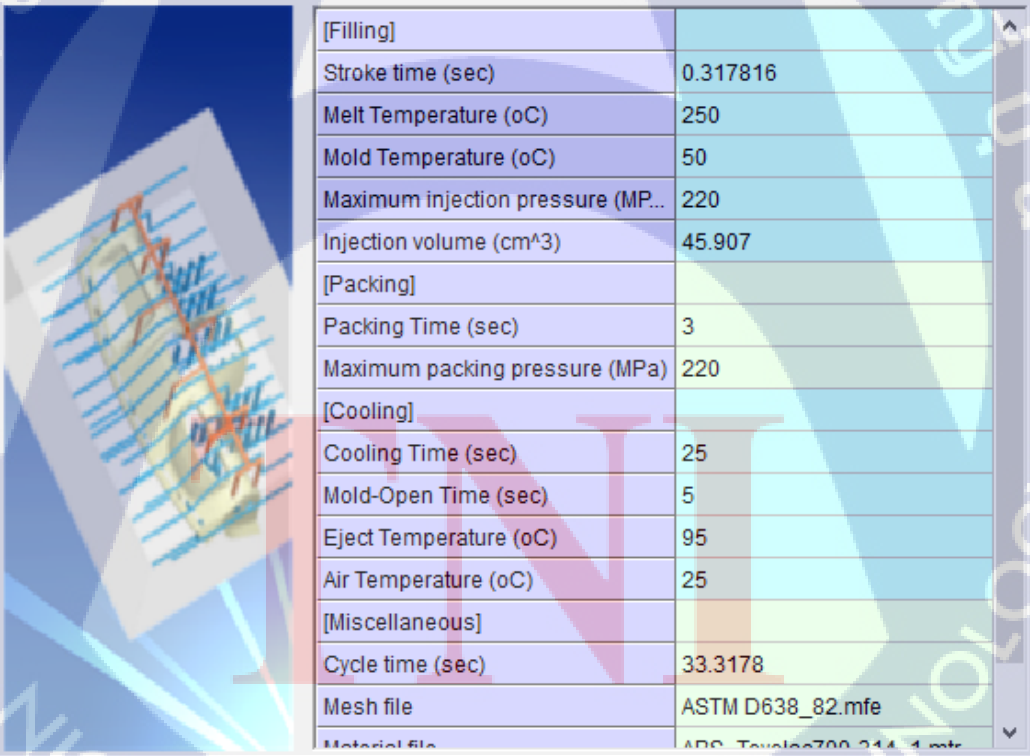
Mold metal ID	Material
Mold Metal [Moldbase material]	S55C
Mold Insert-1 [Mold insert material]	P20

Material properties :

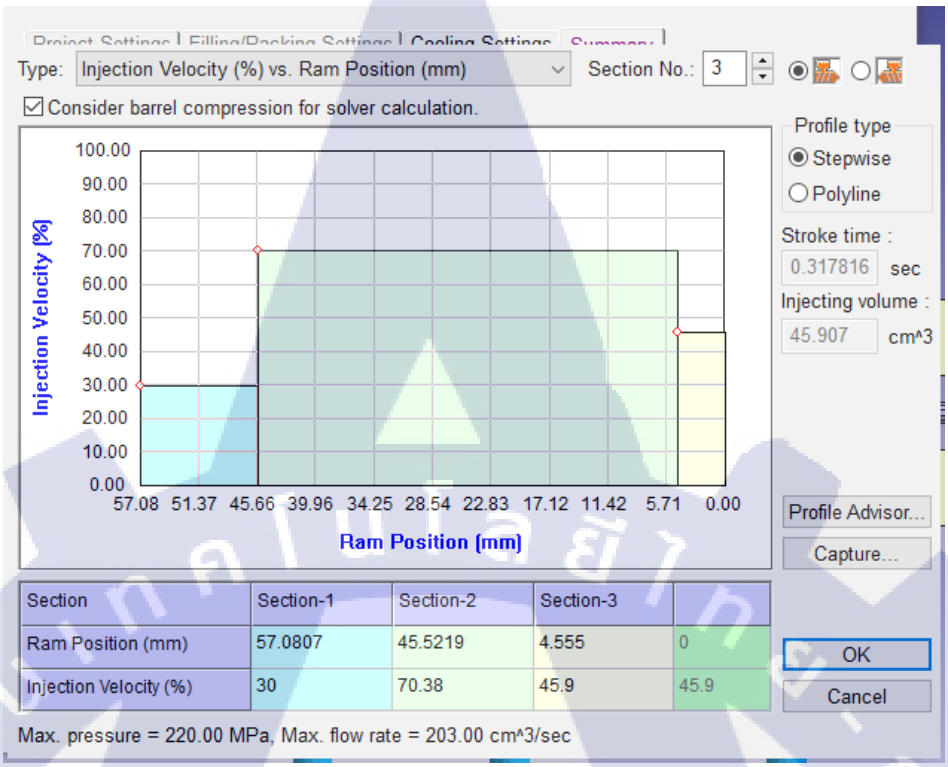
Mold metal ID	Mold Metal [Moldbase material]	-
Density	7.85	g/cm^3
Heat Capacity	4.86e+006	erg/g.K
Thermal conductivity	4.69e+006	erg/sec.cm.K
Elastic modulus	2.05941e+012	dyne/cm^2
Poisson ratio	0.29	-
CLTE	1.19e-005	1/K

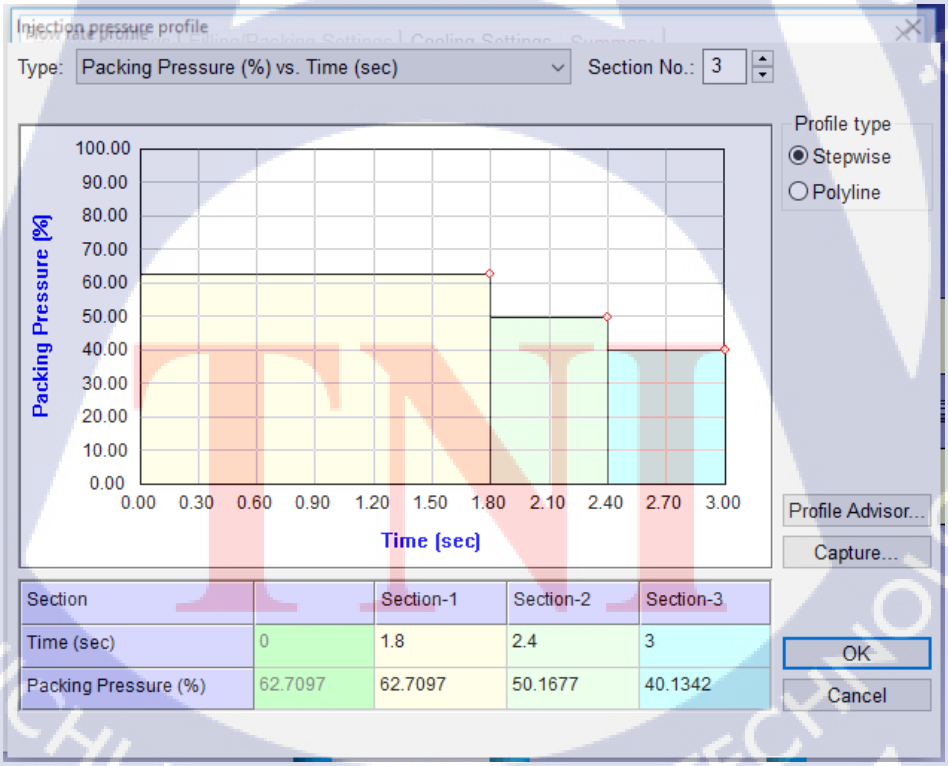

Item
Value
Unit
Cooling method
General
-
Initial Mold Temperature
50
oC
Air Temperature
25
oC
Eject Temperature
95
oC
Cooling Time
25
sec
Mold-Open Time
5
sec
Mold preheat
Setting
Cooling Channel/Heating Rod...
Mold Metal Material...
Mold Insert Initial Temperature...
Part Insert Initial Temperature...
Eject Criteria...
Estimate Cooling Time...
Filling setting
Stroke time : 0.317816 sec
Flow rate profile (3)...
Injection pressure profile (1)...
VP switch-over
By volume(%) filled
as 98 %
Packing setting
Packing time : 3 sec
Packing pressure refers to end of filling pressure
Packing pressure profile (3)...
Melt Temperature
250
oC
Mold Temperature
50
oC
Advanced Setting...





[Filling]	
Stroke time (sec)	0.317816
Melt Temperature (oC)	250
Mold Temperature (oC)	50
Maximum injection pressure (MP...	220
Injection volume (cm^3)	45.907
[Packing]	
Packing Time (sec)	3
Maximum packing pressure (MPa)	220
[Cooling]	
Cooling Time (sec)	25
Mold-Open Time (sec)	5
Eject Temperature (oC)	95
Air Temperature (oC)	25
[Miscellaneous]	
Cycle time (sec)	33.3178
Mesh file	ASTM D638_82.mfe
Material file	ABS_Toyolac700-314_1.mtr


Type: Injection Velocity (%) vs. Ram Position (mm)
Section No.: 3
Consider barrel compression for solver calculation.
Profile type
Stepwise
Polyline
Stroke time :
0.317816 sec
Injecting volume :
45.907 cm^3
Injection Velocity [%]
100.00
90.00
80.00
70.00
60.00
50.00
40.00
30.00
20.00
10.00
0.00
57.08 51.37 45.66 39.96 34.25 28.54 22.83 17.12 11.42 5.71 0.00
Ram Position [mm]
Profile Advisor...
Capture...
Section | Section-1 | Section-2 | Section-3
Ram Position (mm) | 57.0807 | 45.5219 | 4.555 | 0
Injection Velocity (%) | 30 | 70.38 | 45.9 | 45.9
OK
Cancel
Max. pressure = 220.00 MPa, Max. flow rate = 203.00 cm^3/sec


Injection pressure profile
Type: Packing Pressure (%) vs. Time (sec)
Section No.: 3
Profile type
Stepwise
Polyline
Packing Pressure [%]
100.00
90.00
80.00
70.00
60.00
50.00
40.00
30.00
20.00
10.00
0.00
0.00 0.30 0.60 0.90 1.20 1.50 1.80 2.10 2.40 2.70 3.00
Time [sec]
Profile Advisor...
Capture...
Section | Section-1 | Section-2 | Section-3
Time (sec) | 0 | 1.8 | 2.4 | 3
Packing Pressure (%) | 62.7097 | 62.7097 | 50.1677 | 40.1342
OK
Cancel

ภาคผนวก จ.

บทความการประชุมวิชาการ

The 8th TSME International Conference on Mechanical Engineering
12-15 December 2017
Bangkok, Thailand

AMM014

Study of Heating and Cooling Temperature of Injection Molding to Effect on Gloss of Plastic Injection Parts

Krit Chasuriyakul[1,*], Wiroj Thasana[1] and Thiradet Khajifa[1]

[1]Advanced Design and Manufacturing Technology Research Laboratory (ADMT)
Faculty of Engineering, Thai-Nichi Institute of Technology
1771/1 Pattanakarn Rd., Suanluang, Bangkok 10250, Thailand
[*]Corresponding Author: kritchaisuriyakul@gmail.com

Abstract. Injection molding process is one of the most extensively used for manufacturing plastic processes due to high productivity, high efficiency and also the manufacturing of the net shape or complex design parts. In general, the finished plastic parts are a growing trend towards using in automotive part, electronic appliance and require more direct appearance surfaces. Nowadays, plastic injection parts do not need to be painted or coated for the manufacturing processes and weld marks on the surface parts must be completely eliminated. The objective of this study is to focus on the effect of gloss in plastic part using ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) materials and design of experiment by using Response Surface Methodology (RSM) to independent temperature variables. This research represents the optimize efficiency of the thermal factor in molding effect to gloss parameter on plastic injection parts and provides the estimate of the parameter related to high-temperature behavior in molding before injection process. The result of experiments have been obtained the measuring point of cavity temperature at 70 ºC, the injection temperature at 240 ºC, and injection speed 120 mm/sec on the 95% confidence interval.

Keywords: Injection molding, Heating and cooling, Gloss, Response surface methodology

1. Introduction

At the present, plastics manufacturing by using injection molding machines have been used in widespread. Especially, the production of plastic parts such as automotive parts or electronic component parts etc [1]. The parts have been designed the accuracy of control processes shows a surface appearance and color tones, which are the focus on value-added and manufacture reduction. To improve mold ability and physical properties of the plastic material have used in various injection molding processes directly. By the way, the main manufacturing process can be reduced or replaced by previous processes from a good design earlier. Workpieces or parts does not have the effect on other influence in the painting and assembly processes. As more indirect benefits result will not invest about new booth paint and reduce lead time, which in many methods in order to protect inherent defects on final products to anti-scratch proof and eliminate waste.

The injection molding processes include filling, packing, cooling and ejecting processes, generally, cooling stage takes up more than half of cycle time. Therefore, mold temperature has a significant effect on a molding cycle and productivity, but low mold temperature may be melted a plastics not well, and do not fulfill in impression and usually means lower quality in conventional injection molding (CIM) process. In the CIM, mold temperature is kept at constant during cycle time although

in the fact it fluctuates in the relatively small range of temperature due to the quality of injection parts. In manufacturing commonly used the continuous cooling method by circulating coolant in cooling channel, in order to target better quality and high productivity, mold temperature must be lower than the transition temperature of plastic material [2-3].

In real manufacturing, plastic injection mold mostly uses the simulation to predict the finished injection parts. Finite element method (FEM) has been applied the analysis of injection processes in order to reduce the machine setting time [4-5]. Shih-Chih, Ni et al. [6] have proposed the control of bending of the plastic injection parts. The principle of mold temperature based on experimental design. For this reason, a new technology in injection molding has been required to commercial. Rapid heat cycle molding (RHCM) technology has developed and attached in the near future. The difference between CIM and RHCM processes is mold temperature control ability. The constant temperature was controlled in each injection cycle by heating and cooling, which has been applied in the last century. In RHCM process, the cavity mold temperature heated up higher than thermal deflection temperature of plastic about 10 °C before melt plastic filling, and then cooling mold down quickly when packing stage is completed to eject parts. Higher temperature molding situation, frozen layer in RHCM process gives the result to melt flow resistance can be reduced, but CIM process that frozen layer can be completely eliminated. From this reason, injection pressure and clamping force parameter required of injection machine are decreased. On other properties of melt plastic when filling stage can be reduced weld line on part surface significantly by increase mold temperature. Meanwhile, several types of research in a literature using RHCM molding process demonstrates rapid heating and take more effectively lengthen the melt flow path [7-8], improve the part surface appearance in automotive and electronic component parts [9].

In RHCM process benefits on increasing productivity and shorten cycle time are necessary. The heating method mainly uses in industries to achieve this purpose include induction heating, infrared heating, gas-assisted heating and convection heating using hot fluids such as oil, water or steam [10-11]. However, the parameter not yet clear about appropriate parameter to predict the deflection problem. Sivaraos et al. [12] have proposed to a comparison about experimental design between Taguchi method and Respond surface methodology (RSM), the results show RSM are more clearly predicted and significant of all combinations of interactions and squared terms.

A corresponding RHCM process designed and constructed by FEM analyses and experiment to evaluate thermal stress analysis also performed to evaluate thermal stress distribution in cavity molding proposed to alleviate the thermal stress. Finally, the surface appearance quality of plastic part on RHCM process was improved gloss surface compared with more benefits directly. Therefore, the objective of the present research is to propose the optimize efficiency of the thermal factor in molding effect to gloss parameter on plastic injection parts.

2. Mold Structure and Principle of Heating Technology

2.1 Mold and parameter design

Figure 1 illustrates the typical molding structure for developed heating technology with the hot oil convection heating method. The heating channel is installed in cavity plate due to injection parts appearance shown on this side only when the temperatures of the cavity side are elevated to preset mold temperature controller unit will turn off to stop heating, and then the mold is closed for melt plastic filling. Finishing injection part as shown in figure 2.

The plastic material used for the parts is acrylonitrile butadiene styrene (ABS) typed resin Toyolac grade 700 - 314 supplied from Toray Plastics. It has the density of 1.04 g/cm^3 and mass flow rate of 23 g/10min. Before injection processes dying ABS material of 80°C for 4 hours and feed to the barrel. The recommended processing parameter setting in table 1. All parameters carried on injection molding machine using Toshiba Machine model EC100S with I2A Barrel type, this model specification on maximum clamping force 100 tons.

Table 1. Processing parameter in injection experimental.

Processing parameter	Typical value
Injection temperature (°C)	200 - 240
Mold temperature (°C)	50 - 90
Injection speed (mm/sec)	100 - 140
Ejection temperature (°C)	95
Injection filling time (sec)	0.5
Packing time (sec)	3.5
Injection pressure (Mpa)	140
Cooling time (sec)	30 - 45

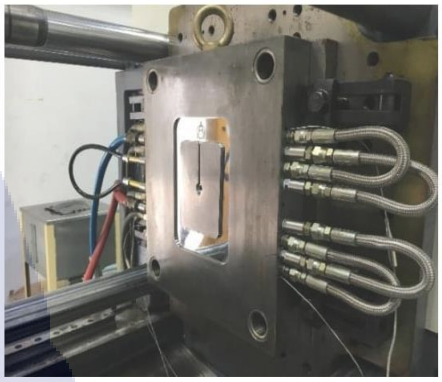


Figure 1. Injection molding design with the hot oil heating.

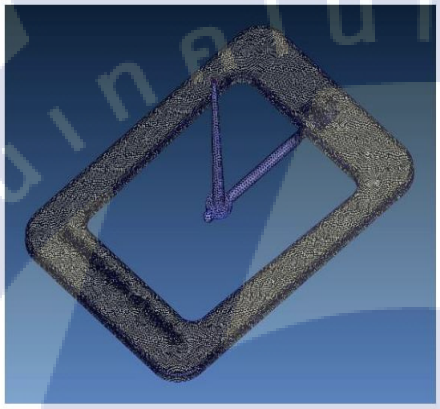


Figure 2. Structure of plastic injection part.

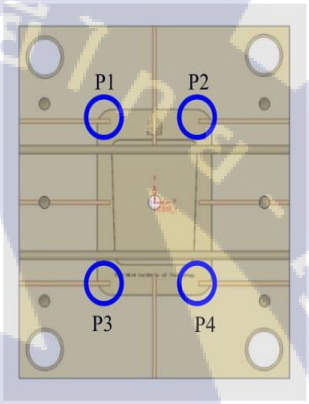


Figure 3. Thermocouples channel design on cavity molding.

2.2 Thermal response and gloss measurement design

As shown in figure 3 identifiers 'P1', 'P2', 'P3' and 'P4' are four positions on cavity side for measuring temperature responses. Using thermocouples type J in research due to the short range of temperature measuring and well responsibility. The used material of cavity plate is a type of plastic mold steel, typed S50C, supplied by Taikin standard mold base Co., Ltd., Thailand.

Point measurement of gloss on injection parts was set to close corners of injection parts, totals 4 point same thermocouples measurement points. Cause of this research focuses on thermal design effect on plastic injection parts. In value added product surface research gloss appearance on the surface measured by gloss unit (GU) with gloss level measurement method. It is also compatible with the standard ASTM D523 using a portable gloss-meter model NHG268 supplies from Shenzhen 3nh technology Co., Ltd., China. The planning of DOE and data analysis was carried out using the statistical software package of Minitab 17.

2.3 Design of experiments (DOE)

The method of defining and investigating all conditions in experiments involving multiple factors in known as Design of experiments (DOE). According to DOE are widely used in many factors examples Full-factorial design, Taguchi method and Response surface methodology to performing an experiment, varying the levels of all factors simultaneously rather than one, allows for interactions between the factors.

2.3.1. Response surface methodology (RSM)

Response surface methodology can be described as s technique on complex calculation processes. To approach a suitable experimental design that integrated all of the independent variables and set equations on the theoretical value of an output [13]. In RSM can predict response result by the regression equation. First order use for linear surface and second order use nonlinear or curved surface, shown as in equation (1) and (2) respectively.

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \varepsilon \tag{1}$$

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \tag{2}$$

2.3.2 Central Composite Design (CCD)

Response surface methodology comprised of several methods to design the experimental procedures and one of them is Central Composite Design (CCD). Optimization carried out with CCD can allow screening of a broad range of parameters as well as the role of each factor [14]. In addition, CCD is also able to evaluate a single variable or the cumulative effect of the variables on the response. Although this ability is shared with the other types of experimental design such as full factorial and partial factorial method, it differs in a way that the experimental runs are reduced.

In figure 4 shows CCD components including factorial points, Axis points and center point using 3 variables factor mold cavity temperature (MT), injection temperature (HEN) and injection speed (VI). The combination with center point 5 points, which used totals all of 19 experiments. The researcher using 3 factors on rotatable design choose α = 1.68 and $-\alpha$ = -1.68 for axis points

Table 2 shows experimental design and levels design on chosen parameter 3 factors and 5 levels on CCD. Each experiment produced injection parts total 5 pieces and before next experiment ejects plastic parts 10 shots for equilibrium thermal system and condition in molding frequently.

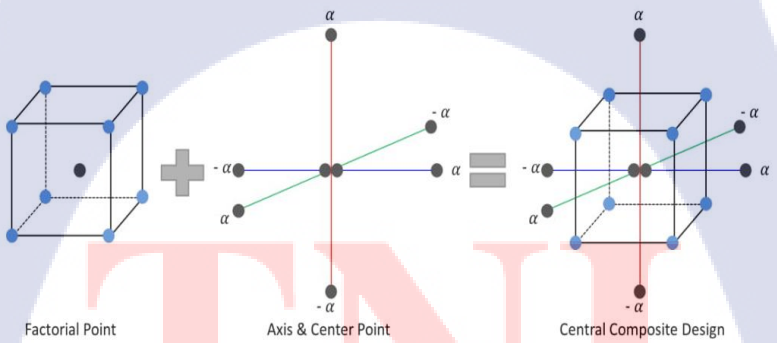


Figure 4. Central Composite Design (CCD) design for three factors.

Table 2. Experimental design parameters and levels.

Parameter	Code	Level				
		$-\alpha$	-1	0	1	α
Cavity temperature (°C)	MT	53.2	60	70	80	86.8
Injection temperature (°C)	HEN	203.2	210	220	230	236.8
Injection speed (mm/sec)	VI	103.2	110	120	130	136.8

3. Experimental Evaluation of Thermal Response

3.1 Experimental analysis data

Using design DOE by surface response method, the influence of independent variables was investigated. And in combination with CCD measure at point P1-P4 by gloss-meter with ASTM D523 standard on measurement angle 60°, using statistic model for calculating average data 3 times per measurement point. The result of gloss unit of the experiment as shown in Table 3.

Table 3. Experimental result using Central Composite Design for three factors.

Central Composite design	Run/Trail No.	Cavity temperature (°C)	Injection temperature (°C)	Injection speed (mm/sec)	Gloss Unit (GU)
Factorial point	1	60	210	110	85.26
	2	80	210	110	89.11
	3	60	230	110	91.68
	4	80	230	110	90.24
	5	60	210	130	83.55
	6	80	210	130	89.62
	7	60	230	130	92.74
	8	80	230	130	91.85
Axis point	9	53.2	220	120	89.05
	10	86.8	220	120	90.80
	11	70	203.2	120	85.58
	12	70	236.8	120	93.29
	13	70	220	103.2	88.07
	14	70	220	136.8	91.08
Center point	15	70	220	120	90.62
	16	70	220	120	92.02
	17	70	220	120	91.94
	18	70	220	120	92.07
	19	70	220	120	91.75

3.2 Data analysis

The statistical software package "Minitab 17" was used to analyze data results obtained from the experiments. Using 95% confidence interval ($\alpha = 0.05$), A normal probability plot shown in figure 5 is used to relative magnitude and statistical significance. In the figure, points do not fall close to straight line (red point) usually signal factors with the significant effects. And figure 6 shown Pareto chart confirm the result displayed in figure 5 all of three factors have passed the reference line at 2.26 and factor of injection temperature (HEN) having the largest effect on gloss surface. On remaining parameter mold cavity temperature (MT) and injection speed (VI) was followed effects by respectively.

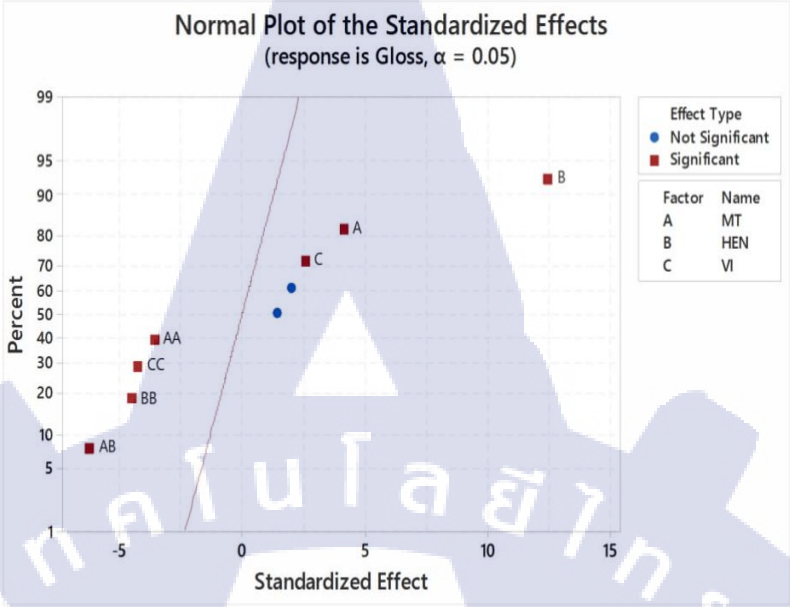


Figure 5. Normal probability plot response

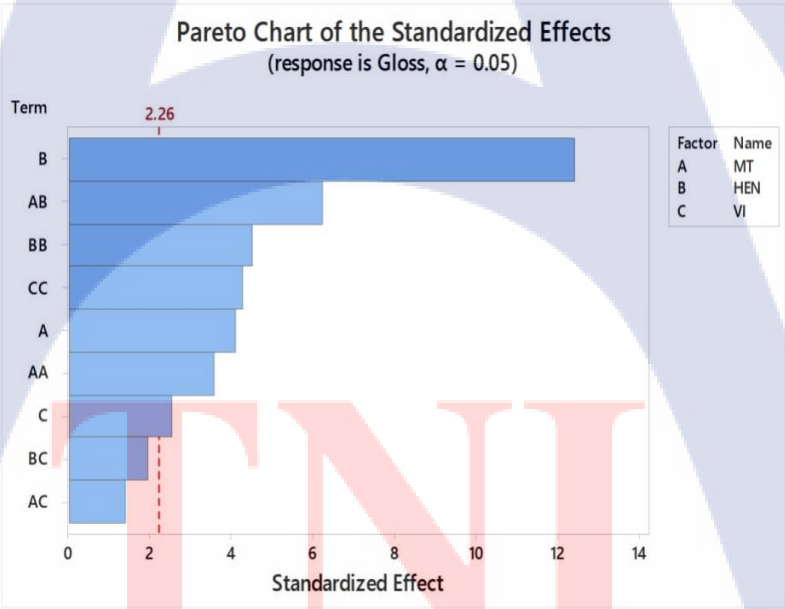


Figure 6. Pareto chart response on gloss unit

From Table 4, the results can produce more evidence to support the influence of three factors which matter on surface appearance or gloss unit. Using 95% confidence interval, the p-value found for MT, HEN, and VI is less than 0.05. This three factors can be indicated on the main effect term on gloss appearance. In addition, the square term is significant for all factors but interaction term is not clearly relation on injection speed. Only on injection temperature could be influenced on interaction term.

Table 4. Estimated effects and coefficients for response surface methodology on gloss.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
MT	1	8.147	8.1471	16.86	0.003
HEN	1	74.707	74.7073	154.64	0
VI	1	3.121	3.1211	6.46	0.032
MT*MT	1	6.241	6.241	12.92	0.006
HEN*HEN	1	9.849	9.8486	20.39	0.001
VI*VI	1	8.754	8.7536	18.12	0.002
MT*HEN	1	18.743	18.7425	38.8	0
MT*VI	1	0.963	0.9626	1.99	0.192
HEN*VI	1	1.867	1.8673	3.87	0.081
Lack-of-Fit	5	2.88	0.576	1.57	0.341
Pure Error	4	1.468	0.3669		
Total	18	131.186			

The result of mathematical on RSM can be created as contour plot on figure 7 and surface plot in figure 8, both plots hold the value of VI at the center point of CCD. In that figure HEN become more is better on gloss appearance but on manufacturing ABS material can be used in the range of 200 - 240 °C, if temperature more than 240 °C effect opposite properties on gloss appearance may be dull surface. On MT parameter having effect followed by data analysis was chosen the level at 0.5 on experiments about 70 - 75 °C to best condition for mold temperature control.

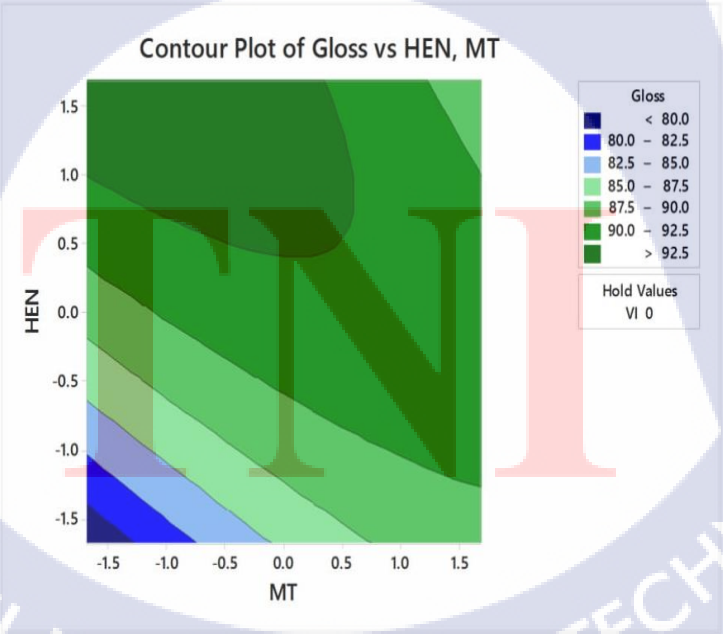


Figure 7. Contour plot of gloss unit on nozzle temperature and cavity temperature.

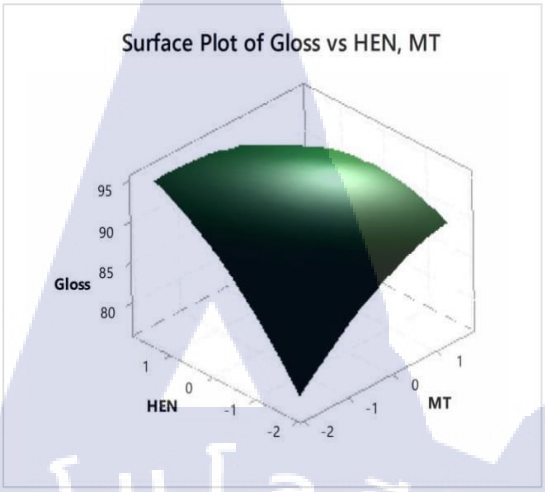


Figure 8. Surface plot of gloss unit on nozzle temperature and cavity temperature.

3.3 Mathematical modeling

For the experiment on gloss unit can predict equation to find the best condition, analyzed data output on R-square value is 96.69% total reliability can predicted equation on gloss unit. And reasonable data can check by lack of fit data shown in table 4, p-values is 0.341 more than 0.05 so that gloss unit equation can write in equation (3)

$$\textit{Gloss unit} = 91.691 + 0.772\ MT + 2.339\ HEN + 0.478\ VI - 0.676\ MT*MT - 0.849\ HEN*HEN - 0.801\ VI*VI - 1.531\ MT*HEN + 0.347\ MT*VI + 0.483\ HEN*VI \quad (3)$$

3.4 Appearance of injection experimental

Appearance surface of ABS injection parts on gloss shown in figure 9, in the left part produced on low-temperature molding affected gloss surface part to opaque or not shine. The heater on molding temperature unit control cavity temperature equilibriums on each cycle can be produced gloss surface to be shiny and make more valuable on parts. In the experiment, comparison molding temperature between 40°C and 70°C respectively.

Figure 9. Comparison between ABS cover part on normal condition (left) and high heating processes (right).

4. Conclusion

In the present research study, the surface appearance of parts will be added value and more benefits on plastic injection parts. Heating molding by hot oil and water impingement cooling is developed to control the temperature of each cycle to constant. First cavity surface molding must be polished and shiny on proposed. Moreover, the injection parameter having the effect to gloss appearance on confidence interval. Base on the results, the following conclusions are obtained.

Parameter on thermal response was chosen on molding temperature and injection temperature. The result of independent variables on gloss surface is clearly confirmed by mathematics software has shown that injection temperature at end nozzle has the largest effect on gloss. The parameter of mold cavity temperature and injection speed was followed effects by respectively. The proposed method provides optimise value data using cavity temperature 70 ºC the injection temperature 240 ºC, and injection speed 120 mm/sec on 95% confidence interval.

However, this research setting center point of injection temperature (HEN) at 220 ºC cause of normal melt temperature of ABS plastic is 200 – 240 ºC. If adjust range of CCD upward on setting parameter it possible to make higher gloss appearance surface. So that concerned to cavity temperature when melt plastic was injected into cavity molding should be freezing or cooling stage behaviour on melt plastic to rigid plastic. The upper side of axis point of cavity temperature (MT) level is higher more than efficient rate of heating transfer out from melten plastic by cooling fluid. Due to cooling time too long in each cycle can be effect on shrinkage in finishing parts and gloss appearance could be reduce. And injection speed (VI) parameter make the high pressure in molding during injection cycle could be heat temperature up inside cavity but this parameter on previous research have too long can effect on warpage parts cause of gloss unit measure on parts will reduce too.

The future work will focus on designing and fabricating on RHCM technology with developed technology and proposed on new cavity insert for complicated shapes, and optimizing the another parameter to improve the heating and cooling efficiency, scratch proof and strength on plastic parts.

Acknowledgements

The authors would like to thank Daiwa Kasei (Thailand) Co,. Ltd. for supported injection molding machine and Advance Design & Manufacturing Technology Research Laboratory (ADMT) in the name of Thai-Nichi Institute of Technology for supporting this research.

References

[1] H.S. Park, X.P. Dang, A. Roderburg and B. Nau 2013 *J. CIRP Journal of Manuf. Sci. and Technol.* **6** 44-52
[2] Xiaoxin W, Guoqun Zh and Guilong W 2013 *J. Materials & Design* **47** 779-92
[3] Cheng-Long Xiao and Han-Xiaong Huang 2014 *J. Applied Thermal Engineering* **73** 710-20
[4] Gui-long W, Guo-qun Zh and Xiao-xin W 2014 *J. Materials and Design* **59** 310-22
[5] Z. Shayfull, S. Sharif, Azlan Mohd Zain, R. Mohd Saad and M.A. Fairuz 2013 *J. Mat. and Manuf. Proc.* **28** 884-91
[6] Shih-Chih Nian, Chih-Yang Wu and Ming-Shyan Hu. 2015 *J. International Communication in Heat and Mass Tranfers* **61** 102-10
[7] D.G. Yao and B. Kim 2002 *J. Polym. Plast. Technol. Eng.* **41** 819-32
[8] P.C Chang and S.J. Hwang 2006 *J. Appl. Polm. Sci.* **102** 3704-13
[9] G. Lucchetta and M. Fiorotto 2013 *J. Mech. Eng.* **59** 683-88
[10] D.G. Yao, B. Kim 2002 *J. Polym. Eng. Sci.* **42** 2471-81
[11] M.H. Wang, J.J. Dong, W.H. Wanh, J. Zhou, et al. 2013 *J. Adv. Manuf. Technol* **68** 2407-17
[12] Sivaraos , K.R. Milkey, A.R. Samsudin, A.K. Dubey and P. Kidd 2014 *Jordan Journal of Mech. and Indus. Eng.* **8(1)** 35-42
[13] Khairul Anwar Mohamad Said and Mohamed Afizal Mohamed Amin 2015 *J. Appl. Sci. & Proc. Eng.* **2(1)** 8-17
[14] S. Şahin, C. and Demir, H. Malyer 2011 *J. Analytical Methods* **(3)** 944