

แบบจำลองการฉีดพลาสติก ในสภาวะของเหลว Simulation Polymer Molding in Filling Stage

ดร. จารุวัตร เจริญสุข และ เมธี ไบงาม

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร (02) 326-9987, โทรสาร (02) 326-9053

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอ การประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการจำลองการไหล และการกระจายตัวของพลาสติกเหลว ในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ตัวแปรที่สนใจศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ พลาสติกเหลว, อุณหภูมิแม่พิมพ์, ความดันฉีด และความเร็ว สกรูฉีด ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรม ในการไหลของพลาสติกเหลวที่เงื่อนไขต่าง ๆ กัน รวมถึงการ เกิด Weld line ในแม่พิมพ์ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญ ค่าที่เหมาะสม ของตัวแปรที่สนใจศึกษาได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ ในขั้นตอน การฉีดพลาสติกจริง โดยผลลัพธ์ที่ได้เมื่อเทียบกับการ วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีความสอดคล้องกัน มาก และช่วยลดเวลาในขั้นตอนการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม ด้วยการทดลองฉีดจริงแบบ Trial and error ได้มาก

Abstract

This paper presents the use of CAE software to simulate flow of plastic in liquid stage on injection molding process. The parameter considered in this work are melting temperature, mold temperature, pressure and speed of screw feed. The results obtained in this work show the characteristic of flow at different condition. Also, the reasons of weld line problem are investigated. The suitable value of the parameters are applied in the real molding process. The result obtained at this stage consistent with the results obtained by using CAE software and helps cut down time consuming in finding the suitable parameter by trial and error in real experiment.

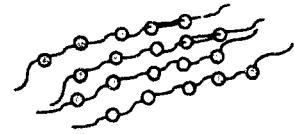
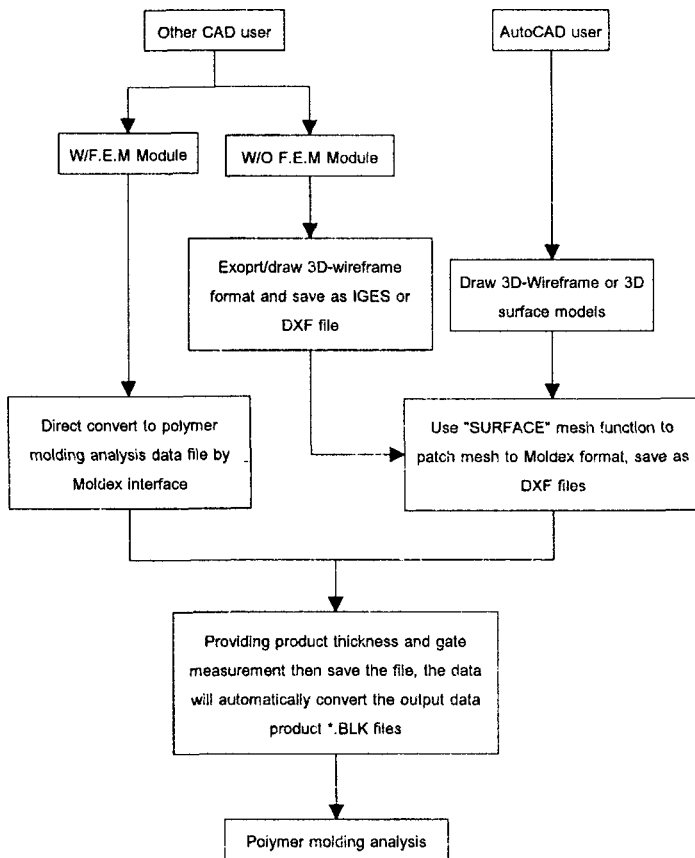
1. บทนำ

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์พลาสติกมีบทบาทมากขึ้น ต่อชีวิตประจำวัน โดยในอุตสาหกรรม ได้มีการผลิตสินค้าให้เพียงพอ ต่อผู้บริโภค ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องเกิดความเสียหายน้อยที่สุด และหนึ่งในปัญหาที่พบบ่อยคือ การเกิดเส้นแนวเชื่อม Weld line ในชิ้นงาน โดยในงานวิจัยที่ได้นำเสนอต่อไปนี้มุ่ง เน้นแก้ปัญหาการเกิดเส้นแนวเชื่อม Weld line ในชิ้นงาน เครื่องทำน้ำอุ่น และพลาสติกที่ใช้คือ (ABS Acrylonitrile Butadiene Styrene) ในการฉีดพลาสติกแต่ละครั้ง จะมีตัวแปรควบคุมคือ อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก, อุณหภูมิแม่พิมพ์, ความดันฉีด และ ความเร็ว Screw feed เดิมการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์ หนึ่งชิ้นจะใช้วิธีการทดลอง ซ้ำๆ Trial error จนกว่าจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดความเสียหาย น้อยที่สุด ซึ่งวิธีดังกล่าวจะเสียเวลานาน และยังสิ้นเปลือง วัสดุเป็นจำนวนมาก โดยในงานวิจัยนี้ได้้นำโปรแกรม คอมพิวเตอร์ช่วยในส่วนของการสุ่มทดลอง Trial error เพื่อ หาค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสม ที่ทำให้เกิดเส้นแนวเชื่อม Weld line น้อยที่สุด

วัตถุประสงค์

1. ลดวัสดุก่อนทำการผลิตจริงเนื่องจากการ สุ่มทดลอง Trial error
2. หาเวลาที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์หนึ่งชิ้น
3. กำหนดค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมเช่น อุณหภูมิ, ความเร็วสกรู, และ ความดัน
4. ลดปัญหาการเกิด รอยแนวเชื่อมของพลาสติก Weld line กับผลิตภัณฑ์ที่ผลิต

2. ขั้นตอนการสร้าง 3D Mesh สำหรับ Moldex



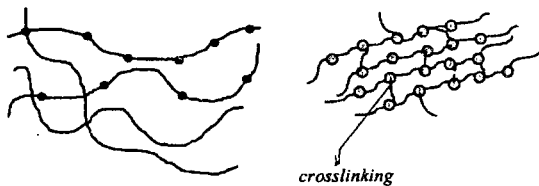
รูปที่ 2 แสดงถึงลักษณะเส้นใย Thermoplastics

ตารางที่ 1 แสดงถึง Layer Control ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ด้วย AutoCAD

Type	Element Type	Definition for layer name	Color
POINT	Entrance Melt	EM\$	Green
	Entrance Gas	EG\$	Green
	Entrance Coolant	EC\$	Green
LINE	Runner Cold	RC\$1000X	Red
		RC\$1000-2000X	
	Runner Hot	RH\$1000X	Red
		RH\$1000-2000X	
	Channel Melt	CM\$1000X	Red
		CM\$1000-2000X	
	Channel Gas	CG\$1000X	Red
		CG\$1000-2000X	
	Channel Coolant	CC\$1000X	Red
3DFACE	Face Cavity	FC\$1000X	Not define
		FC\$1000-2000-3000-4000X	
	Face Base	FB\$	Not define

3. คุณสมบัติของ เม็ดพลาสติก

3.1 Thermosetting คือ พลาสติกที่มีรูปร่างถาวรเมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตโดยใช้ความร้อน Heat และแรงอัด Compression หรือผ่านกรรมวิธีการผลิตประเภทหล่อพลาสติก Casting ซึ่งจะไม่สามารถหลอมละลายนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น อามิโน อีพอกซี , ฟีนอลิก, โพลีเอสเตอร์, ซิลิโคน, ยูเรเทน ฯลฯ



รูปที่ 1 แสดงถึงลักษณะเส้นใยพลาสติกแบบ Thermosetting

3.2 Thermoplastic คือ พลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกหลังจากนำไปหล่อทำเป็นผลิตภัณฑ์ เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลมีลักษณะไม่ถาวร เช่น แอซเซทอล , อะคริลิก, ฟลูออโรคาร์บอน ฯลฯ

4. พารามิเตอร์ที่สำคัญในการฉีด

เพื่อให้ชิ้นงานที่ทำการฉีดมีคุณภาพที่ดี จะต้องคำนึงถึงเงื่อนไขที่สำคัญในการฉีด โดยทั่วไป จะพิจารณาเงื่อนไขดังนี้

4.1 อุณหภูมิพลาสติกเหลว

อุณหภูมิพลาสติกเป็นอุณหภูมิของพลาสติกเหลวที่ออกมาจากหัวฉีดในขณะทำการฉีด อุณหภูมิของพลาสติกเหลวที่ใช้ในการฉีดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกซึ่ง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้พลาสติก (ABS Acrylonitrile Butadiene Styrene) ซึ่งมีอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง [9] 200 °C – 270 °C

4.2 อุณหภูมิแม่พิมพ์

เราสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของน้ำหรือน้ำมันที่ไหลเข้าหมุนเวียนอยู่ในแม่

พิมพ์ ซึ่งอุณหภูมิในการปรับตั้งก็ขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ [9] พลาสติก (ABS Acrylonitrile Butadiene Styrene) อุณหภูมิแม่พิมพ์อยู่ในช่วง 50-90 °C

4.3 เวลาในการฉีด

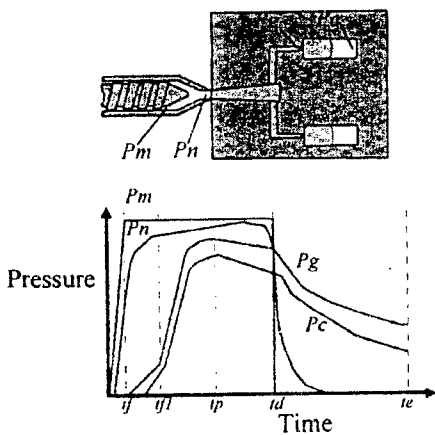
เวลาที่ใช้ในการฉีดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ ผู้ปฏิบัติการไม่สามารถจะปรับตั้งค่าได้โดยตรงที่ตัวเครื่องฉีด เพราะจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของ Screw Feed (ความเร็วฉีด) และระยะทางของพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าตัวป้อน

4.4 ความเร็วในการฉีด

ความเร็วในการฉีด เป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของ Screw feed เพื่อดันพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอนให้ไหลเข้าแม่พิมพ์ ความเร็วในการฉีดจะเกิดควบคู่ไปกับความดันฉีด เพราะต้นกำลังขับเคลื่อนมาจากจุดเดียวกัน ความเร็วในการฉีดจะเป็นตัวควบคุมความดันฉีด กล่าวคือถ้าเราใช้ความเร็วฉีดสูงขึ้นความดันฉีดก็จะมากขึ้นตาม แต่จะไม่เกินค่าสูงสุดที่เราตั้งไว้ให้กับเครื่องความดันฉีด

4.5 ความดันในการฉีด

ความดันฉีดเป็นความดันที่เกิดขึ้นได้ในหลายส่วน ซึ่งได้แสดงรายละเอียดไว้ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงถึงความดันที่เกิดขึ้นขณะฉีดพลาสติก ณ ตำแหน่งต่างๆ

P_m คือความดันเริ่มต้น ซึ่งจะอยู่บริเวณ Screw ฉีด

P_n คือความดันที่เกิดขึ้นบริเวณ ช่องแคบก่อนฉีดเข้าแม่พิมพ์

P_g คือความดันที่เกิดขึ้น บริเวณท่อทางไหลของพลาสติก

P_c คือความดันที่เกิดขึ้นภายในตัวแม่พิมพ์ ขณะทำการฉีด

5. สมการที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของพลาสติก สำหรับ Moldex

Newtonian fluid

$$\eta = \eta_0$$

Power law

$$\eta = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \dot{\gamma}^{n-1}$$

Modified cross model (01)

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + C\left(\eta_0 \dot{\gamma}\right)^{1-n}}$$

$$\eta_0 = B \exp\left(\frac{T_b}{T} + D \cdot P\right)$$

Modified cross model (02)

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\eta_0 \dot{\gamma} / \tau_s\right)^{1-n}}$$

$$\eta_0 = B \exp\left(\frac{T_b}{T} + D \cdot P\right)$$

Modified cross model (03)

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\eta_0 \dot{\gamma} / \tau_s\right)^{1-n}}$$

$$\eta_0 = D_1 \exp\left(\frac{-A_1(T - T_c)}{A_2 + T - T_c}\right)$$

$$T_c = D_2 + (D_3 \cdot P)$$

$$A_2 = A_{2b} + (D_3 \cdot P)$$

Constant sepc. Volume

$$V = V_0$$

Spencier Gilmore

$$V = V_0 + \frac{RT}{P + P_0}$$

Tait Model

$$V = V_0 \left(1 - C \ln\left(1 + \frac{P}{BT}\right)\right)$$

$$V_0 = b_1 \exp(-b_2 T)$$

$$BT = b_3 \exp(-b_4 T)$$

Modified Tait Model (01)

$$V = V_0 \left(1 - C \ln\left(1 + \frac{P}{BT}\right)\right)$$

$$V_0 = b_1 + b_2 T_{bar}$$

$$BT = b_3 \exp(-b_4 T_{bar})$$

$$T_{bar} = T - T_i$$

$$T_i = b_5 + b_6 P$$

Modified Tait Model (02)

$$V = V_0 \left(1 - C \ln\left(1 + \frac{P}{BT}\right)\right) + V_2$$

$$T_b = T - b_5$$

$$T_2 = b_5 + b_6 P$$

$$\text{if } (T \geq T_2)$$

$$V_0 = b_{1\perp} + b_{2\perp} T_b$$

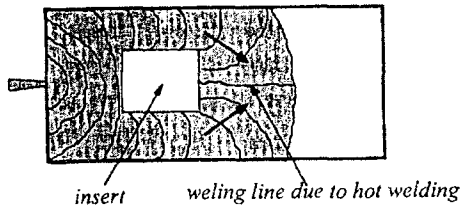
$$BT = b_{3\perp} \exp(-b_{4\perp} T_b)$$

$$V_2 = 0 \text{ else } V_0 = b_{1s} + b_{2s} T_b$$

$$BT = b_{3s} \exp(-b_{4s} T_b)$$

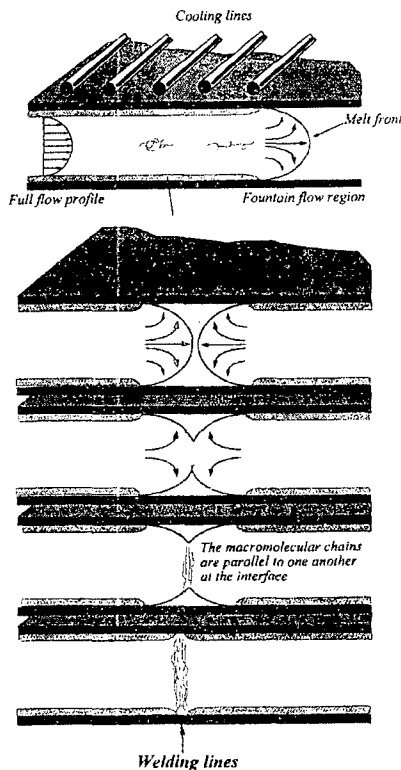
$$V_2 = b_7 \exp(b_8 T_b - b_9 P)$$

6. พฤติกรรม ที่ส่งผลทำให้เกิด เส้นแนวเชื่อม (Weld line)



รูปที่ 4 แสดงถึงลักษณะของการเกิดเส้นแนวเชื่อม Weld line เนื่องจากอุณหภูมิสูง

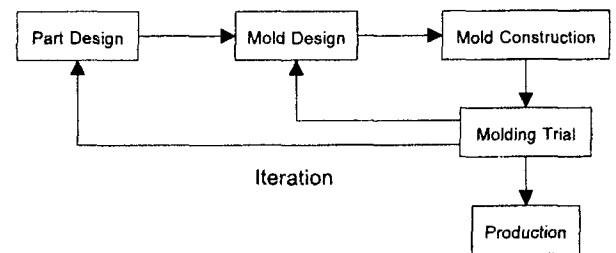
เส้นแนวเชื่อม Weld line เกิดขึ้นจากการไหลของพลาสติกเหลวผ่านช่องว่างหรือ Insert มาบรรจบกันโดยที่พลาสติกเหลวนั้นมีอุณหภูมิสูง ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4



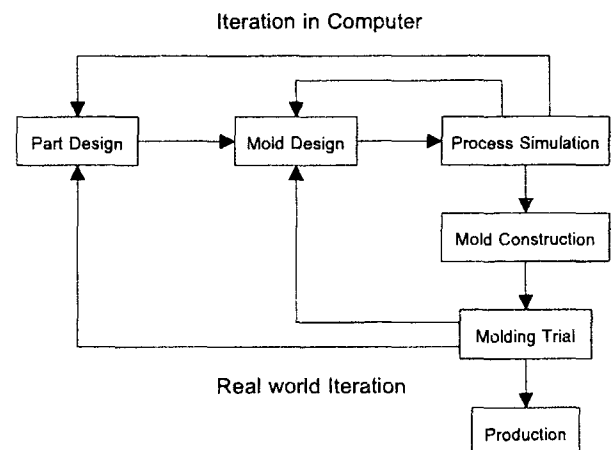
รูปที่ 5 แสดงถึงลักษณะของการเกิดเส้นแนวเชื่อม Weld line เนื่องจาก Molecular chain ที่วางตัวขนานกัน

ซึ่งจากการไหลรวมตัวกัน ของพลาสติกเหลวขณะฉีด บริเวณที่เริ่มหลอมรวมกันทำให้โครงร่างของ Molecular chain เรียงตัวในแนวขนาน เมื่อพลาสติกเย็นตัวลงบริเวณดังกล่าว จะทำให้เกิดรอยขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5

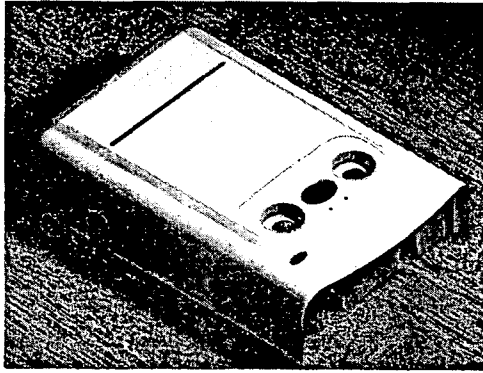
7. ขั้นตอนการทดสอบ



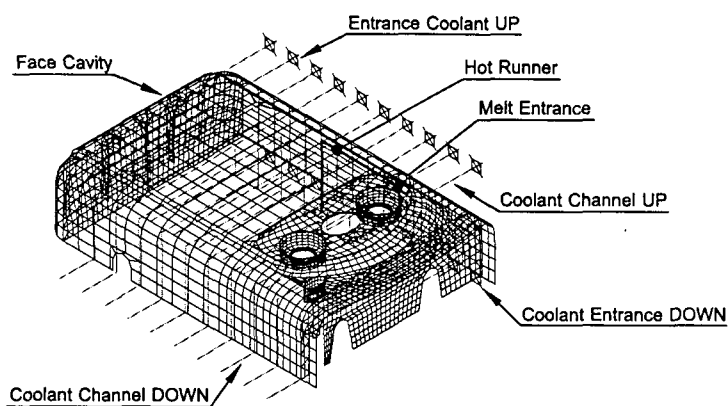
ทดลองหลังจากสร้าง Mold เสร็จแล้ว ในการหาค่าตัวแปรควบคุมก่อนนำไปผลิตจริง ใช้เวลาในการทดลองต่อแม่พิมพ์หนึ่งชิ้นประมาณ 18 – 20 ชั่วโมง สิ้นเปลืองวัสดุในการสุ่มทดลอง Trial error 100 –150 กิโลกรัม



ทดลองด้วยโปรแกรมก่อนสร้าง Mold ในการหาค่าตัวแปรควบคุมก่อนนำไปผลิตจริง ใช้เวลาในการทดลองต่อแม่พิมพ์หนึ่งชิ้นประมาณ 10 - 15 ชั่วโมง ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมนำไปสุ่มทดลองจริงสิ้นเปลืองวัสดุในการทดลอง 20 - 50 กิโลกรัม และผลิตภัณฑ์ที่ทำการสุ่มทดลอง Trial error ผ่านตามมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้

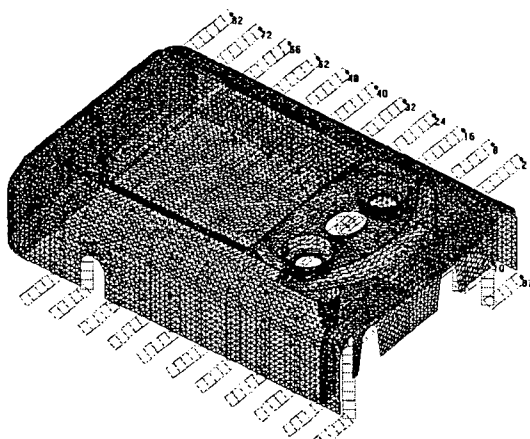


รูปที่ 6 หน้ากากเครื่องทำน้ำอุ่น



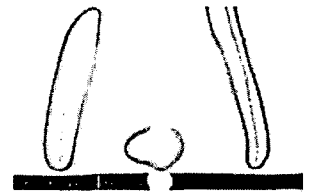
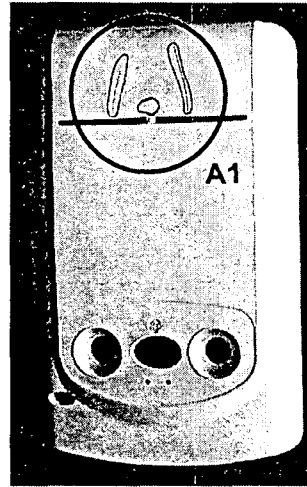
รูปที่ 7 แสดงลักษณะโครงสร้างของ Face Cavity หน้ากากเครื่องทำน้ำอุ่นด้วย AutoCAD

การสร้างพื้นผิว Surface 3 D หน้ากากเครื่องทำน้ำอุ่น ก่อนทำการ Mesh ในโปรแกรม Moldex สร้างขึ้นจาก AutoCAD โดยมีข้อกำหนดตามเงื่อนไขที่ได้ระบุไว้ใน Layer control ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย Face cavity, Cool channel, Hot runner, Cool entrance และ Melt entrance ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7



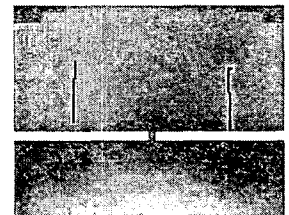
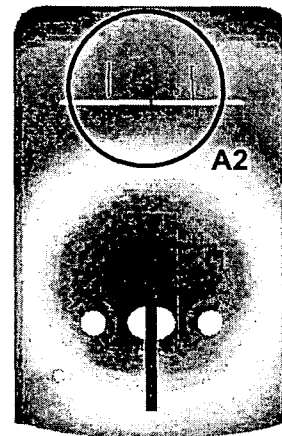
รูปที่ 8 แสดงลักษณะของการ Mesh Face Cavity

8. ผลการทดสอบ



รายละเอียด A1

รูปที่ 9 ผลิตรภัณฑ์ที่มีปัญหา เกิด Weld line ก่อนทำการแก้ไข

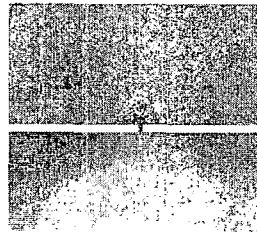
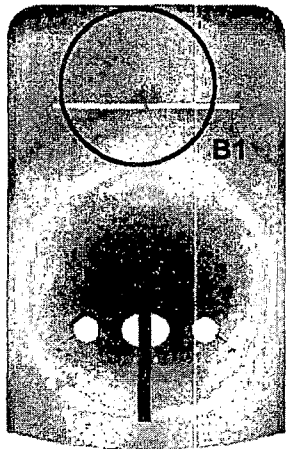


รายละเอียด A2

รูปที่ 10 ผลิตรภัณฑ์ที่วิเคราะห์ด้วย CAE

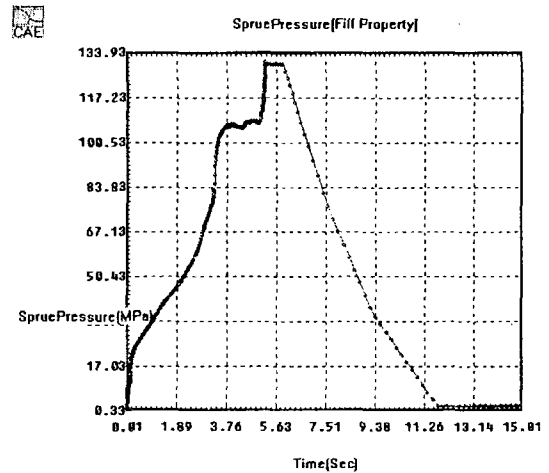
ตารางที่ 2 Traditional Approach to a New Produce

Stage	Description	Parameter	Units
Flow	Fill Time	5.000	Second
	Melt Temp	260.000	Celsius
	Mold Temp	60.000	Celsius
	Injection Pressure	200.000	Mpa
Pack	Pack Time	8.000	Second
	Pack Pressure	120.000	Mpa

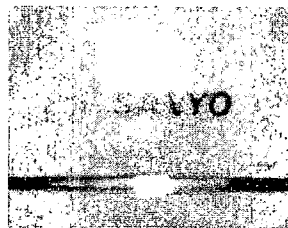
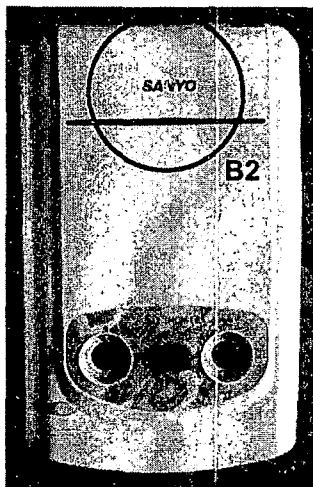


รายละเอียด B1

รูปที่ 11 ผลิตภัณฑ์ที่วิเคราะห์ด้วย CAE



รูปที่ 13 กราฟแสดง Cycle การฉีดพลาสติกด้วย CAE Software

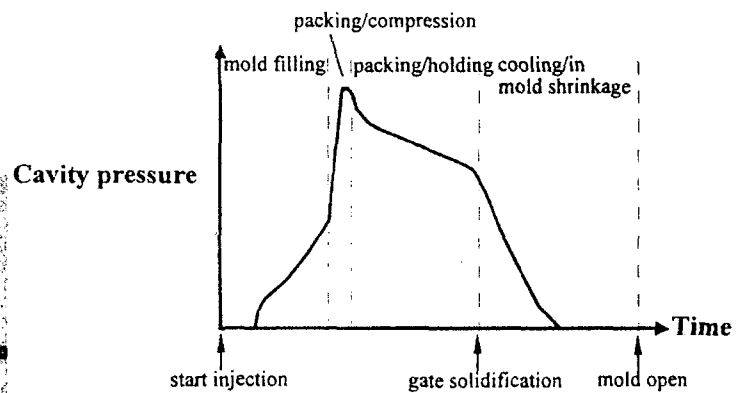


รายละเอียด B2

รูปที่ 12 ผลิตภัณฑ์ที่ได้แก้ไขปัญหาลิ้นแนวเชื่อมแล้ว

ตารางที่ 3 แสดงถึง CAE Approach Concurrent Engineering

Stage	Description	Parameter	Units
Flow	Fill Time	5.000	Second
	Melt Temp	265.000	Celsius
	Mold Temp	70.000	Celsius
	Injection Pressure	180.000	Mpa
Pack	Pack Time	10.000	Second
	Pack Pressure	130.000	Mpa



รูปที่ 14 กราฟแสดง Cycle การฉีดพลาสติกทางทฤษฎี

จากกราฟที่แสดงไว้ข้างต้นในรูปที่ 13 แสดงถึงขั้นตอนการฉีดพลาสติกซึ่งแบ่งออกได้ 3 ส่วนคือในส่วนของการฉีด Mold fill จะใช้เวลาอยู่ระหว่าง 0.01 - 3.76 Sec ในส่วนของการอัดความดัน Packing/Compression จะใช้เวลาอยู่ระหว่าง 3.76 - 5.63 Sec และในส่วนของการ Packing/holding จะใช้เวลาอยู่ระหว่าง 5.63 - 15.01 Sec โดยในส่วนของการหล่อเย็น Cooling ไม่ได้นำเสนอไว้ เพราะในปัญหาการเกิดเส้นแนวเชื่อม Weld line จะมีผลต่อเมื่ออยู่ในสภาวะ Mold Filling และ Packing/Holding

จากกราฟในรูปที่ 14 ได้แสดงขั้นตอนการฉีดพลาสติกในทางทฤษฎีโดยแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนคือ Mold filling, Packing compression, Packing/holding and Cooling

8. แนวทางแก้ไขสำหรับปัญหาการเกิดเส้นแนวเชื่อม Weld line

ตารางที่ 4 แสดงถึงสาเหตุและการแก้ไขปัญหา การเกิดเส้นแนวเชื่อม

ส่วนที่แก้ไข	สาเหตุที่ส่งผลให้เกิด Weld line	การแก้ไข
เครื่องฉีดและขั้นตอนการฉีด	การหลอมละลายพลาสติกไม่ดี	ปรับความเร็วในการฉีดพลาสติกให้สูงขึ้น
		ปรับการฉีดในช่วง Holding ให้สูงขึ้น
		ปรับอุณหภูมิของพลาสติกให้สูงขึ้น
		ปรับอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้สูงขึ้น
	พลาสติกไม่ได้อุณหภูมิ	ปรับความดัน Packing/Hold ให้สูงขึ้น
		ลดความเร็วรอบของ Screw feed
		เพิ่มระยะเวลาในการหล่อเย็น
	การระบายอากาศไม่ดี	ขั้นตอนสุดท้ายของความเร็วในการฉีดช่วงแรกให้ช้าลง ปรับแรงดันแม่พิมพ์ให้น้อยลง
		ทำความสะอาดแม่พิมพ์
	มีวัตถุอื่นอยู่ตรงจุดเชื่อมต่อ	อย่าพ่นน้ำยาหล่อลื่นแม่พิมพ์มากเกินไป
		เพิ่มระยะเวลาในการอบเม็ดพลาสติกให้เพียงพอ
แม่พิมพ์และวัตถุดิบ	-	ปรับระยะห่างจากทางเข้า Runner ถึงรอยเส้นให้สั้นลง
		ปรับทางเข้าช่อง Runner ให้เหมาะสม
		ปรับการระบายอากาศให้ดี
		ปรับการไหลของพลาสติกให้ดี

6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วนำค่าที่ได้ไปผลิตจริงจะเห็นได้ว่าจำนวนของ Weld line ได้มีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัดดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 12 ซึ่งก่อนและหลังการแก้ไขค่าตัวแปรที่สนใจได้แสดงไว้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ตารางเปรียบเทียบเวลาและน้ำหนักของวัสดุที่สูญเสียไป

Description	Times of trial and error [Hour]	Material Lost [Kg]
Traditional Approach	18 - 20	100 - 150
CAE Approach	10 - 15	20 - 50

และจากผลลัพธ์ดังกล่าวที่ช่วยลดปัญหาการเกิด Weld line แล้วยังช่วยลดวัสดุและประหยัดเวลาในขั้นตอนทดลอง Trial error ก่อนฉีดจริงโดยได้แสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 6 ค่าตัวแปรที่สนใจก่อนการฉีด

Description	Traditional Approach	CAE Approach	Units
Machine capacity	350.00	350.00	Tons(m)
Melt Temp	260.00	265.00	Celsius
Mold Temp	60.00	70.00	Celsius
Resin (Hot resistant)	ABS	ABS	-
Fill Time	5.00	5.00	Second
Hold Time	8.00	10.00	Second
Open Time	3.00	3.00	Second
Eject Time	8.00	8.00	Second

จากเวลาที่ลดลงและจำนวนวัสดุที่สูญเสียลดลง เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ต่อบริษัทผู้ผลิตในการช่วยลดต้นทุนการผลิต และยังสามารถผลิตสินค้าสู่ท้องตลาดอย่างมีคุณภาพ

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์ยุทธนา ธนุสร สำหรับข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยฉบับนี้ บิดา, มารดา และเพื่อนคู่ใจที่ให้อกำลังใจและช่วยเหลือเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] William S. Janna. " Introduction to fluid mechanics ". Third edition, Boston : PWS Publishing, 1993
- [2] A.J.Baker. " Finite element Computational Fluid Mechanics ". Second edition, New York: McGraw-Hill, 1985
- [3] SAS IP, Inc, " ANSYS Theory reference. Eighth Edition "
- [4] Advanced CAE Technology, Inc. 3D-C-MOLD QUICKFILL, 1987-1999
- [5] Saeed Moaveni " Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS " Prentice-Hall, Inc. 1999

- [6] A.J. Baker " Finite Element Computational Fluid Mechanics " McGraw-Hill, Inc 1985
- [7] John D. Anderson, Jr. " Computational Fluid Dynamics " McGraw-Hill, Inc 1995
- [8] Frank M. White " Fluid Mechanics " McGraw-Hill, Inc New-York 1986
- [9] HsinChu. "Moldex Theoretical Guide" Coretech Corporation, Inc. 1995 - 1996
- [10] พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์. " พลาสติก ". พิมพ์ครั้งที่ 9, กรุงเทพมหานคร : มิตรนราการพิมพ์, 2532
- [11] วิโรจน์ เตชะวิญญธรรม. " งานฉีดพลาสติก ". กรุงเทพมหานคร : เม็ดทรายพริ้ง ดึง, 2540