



# วิทยานิพนธ์

การออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์ฉีดเพื่อวิเคราะห์การจัดเรียงตัว  
ของเส้นใยเสริมแรงภายในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

**DESIGN AND DEVELOPMENT OF INJECTION MOLD FOR  
DETERMINATION  
OF FIBER ORIENTATION IN INJECTION MOLDED PART**

นายพิชัย จรรย์ธรรมานุกูล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551





## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์ฉีดเพื่อวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงภายในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

Design and Development of Injection Mold for Determination of Fiber Orientation in Injection Molded Part

นามผู้วิจัย นายพิชัย จริยธรรมานุกูล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

( อาจารย์อัญชญา วงษ์โต, Ph.D. )

กรรมการ

( อาจารย์คุณยุต เอี่ยมสะอาด, Ph.D. )

กรรมการ

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิพัฒน์ ภูมิปัญญาคุณ, วศ.ม. )

กรรมการ

( อาจารย์สมเจตน์ พิชรพันธ์, Dr.-Ing. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์ฉีดเพื่อวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงภายในชิ้นงานที่  
ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

Design and Development of Injection Mold for Determination  
of Fiber Orientation in Injection Molded Part

โดย

นายพิชัย จรรย์ธรรมานุกูล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2551

พิชัย จริยธรรมานุกูล 2551: การออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์ฉีดเพื่อวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงภายในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป ปรินญาวิวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ปรธานกรรมการที่ปรึกษา: อาจารย์อัญชญา วงษ์โต, Ph.D. 92 หน้า

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่สามารถผลิตชิ้นงานทดสอบได้ในหลายลักษณะยกตัวอย่างเช่น สามารถปรับเปลี่ยนความหนาของชิ้นงาน ลักษณะและตำแหน่งของทางเข้า ตลอดจนสามารถปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลของพลาสติกหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ได้ โดยการนำเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ CAD CAE CAM มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบชิ้นงาน การวิเคราะห์การไหลของพลาสติกหลอมเหลวที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ฉีด และกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ ตามลำดับ นอกจากนี้แม่พิมพ์ฉีดที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาอิทธิพลของรอยเชื่อมประสาน (Weldline) และอิทธิพลของความหนาชิ้นงานที่มีต่อการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วและสมบัติเชิงกลที่ได้ของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้ว 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

จากผลการเปรียบเทียบการไหลที่เกิดขึ้นจริงภายในแม่พิมพ์และผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมจำลองการไหล 2.5 และ 3 มิติ พบว่า การวิเคราะห์รูปร่างการไหลแบบ 3 มิติให้ผลการวิเคราะห์การไหลที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์และผลการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงานที่สอดคล้องกับผลการทดลองจริง จากผลการศึกษาอิทธิพลของรอยเชื่อมประสานที่มีต่อสมบัติเชิงกล แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสานให้สมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกและสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงลดลงอย่างมาก เนื่องจากการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการรับแรงและโพรงอากาศที่เกิดขึ้นตรงบริเวณรอยเชื่อมประสาน หากพิจารณาอิทธิพลของความหนาชิ้นงานที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกและสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน พบว่าเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากความหนาของชั้นแกนกลางที่เพิ่มมากขึ้นตามความหนาของชิ้นงาน นอกจากนี้ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าความหนาของชิ้นงานไม่มีอิทธิพลต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกและสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนความหนาของชั้นแกนกลางต่อความหนาของชิ้นงานทั้งหมดที่ไม่เปลี่ยนแปลง ที่บริเวณรอยเชื่อมประสาน

Pichai Jariyathammanukul 2008: Design and Development of Injection Mold for Determination of Fiber Orientation in Injection Molded Part. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Ms. Anchana Wongsto, Ph.D. 92 pages.

This research was to study the application of CAD/CAE/CAM in designing and manufacturing the plastic injection mold which can be changes into various characteristic such as different thickness of specimen, types and positions of gate and flow direction of molten polymer, respectively. The effects of weld line and thickness of specimen on the fiber orientation and mechanical properties of polypropylene filled with 30 wt% glass fiber was also investigated from this plastic injection mold.

The 2.5 and 3-D analysis results from the simulation program were compared to the actual flow inside the mold. Good agreement of the flow pattern and the fiber orientation were shown from the 3-D simulation results. Effect of weld line tended to decrease tensile and impact strength significantly due to the perpendicular orientation of glass fiber to the flow direction including voids inside the weldline area. Considering the effect of specimen thickness on the tensile and impact strength, it was found that tensile strength decreased with an increase of thickness, while no change in the impact strength. This is due to an increase of core layer as the thickness of specimen increase. The results also showed that the tensile and impact strength of specimen with weld line were independent on thickness of specimen. This associated with the ratio between thickness of core layer and thickness of specimen was constant at the weld line area.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

\_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์อัญชญา วงษ์โต ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษา ตลอดจนการให้ความช่วยเหลือแก้ไขปัญหาต่างๆ ขอขอบพระคุณ อาจารย์สมเจตน์ พิชรพันธ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์คุณยุต เอี่ยมสะอาด ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัฒน์ ฐิธิปัญญาคุณ กรรมการที่ปรึกษา และรองศาสตราจารย์ ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบคุณคุณอนุศักดิ์ กาญจนี ฝ่ายพิมพ์ฉีคพลาสติก สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIPT) และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ รวมทั้งรุ่นน้องทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ชี้แนะและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

พิชัย จริยธรรมานุกูล

พฤษภาคม 2551

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	26
อุปกรณ์	26
วิธีการ	27
ผลและวิจารณ์	54
สรุปและข้อเสนอแนะ	66
สรุป	66
ข้อเสนอแนะ	67
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	68
ภาคผนวก	71
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	92

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การหัดตัวของพลาสติกชนิดต่างๆ	20
2	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อน้ำหล่อเย็นที่เหมาะสมกับความหนาของชิ้นงาน	37
3	ความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ฉีดภายใต้เงื่อนไขชิ้นงานที่ต่างกัน	41
4	คำสั่งมาตรฐานของรหัสคำสั่งตามอักษร A-Z	43
5	ค่าพารามิเตอร์ในการฉีดขึ้นรูป	48

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ส่วนประกอบของเครื่องฉีดขึ้นรูป	7
2	วัฏจักรของกระบวนการฉีดพลาสติก	9
3	ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น	10
4	การจัดวางควาวิตี้ในรูปแบบต่างๆ	13
5	ระบบป้อนภายในแม่พิมพ์ฉีด	13
6	การสัมผัสของรัศมีโค้งระหว่างหัวฉีดกับหัวปลอกกรีต	14
7	ภาพตัดขวางของทางลักษณะต่างๆ	15
8	อัตราส่วนของทางวิ่งที่มีรูปทรงหน้าตัดต่างๆกัน	15
9	แสดงระยะต่างๆของการวางท่อน้ำหล่อเย็น	17
10	ระบบนำปลดชิ้นงานด้วยก้านกระทุ้งในแม่พิมพ์ฉีด	18
11	แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Specific modulus กับ Specific strength ของเส้นใยแต่ละชนิด	22
12	การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงานที่มีลักษณะแบบ skin-core	24
13	แสดงลักษณะชิ้นงานที่ออกแบบเพื่อทำการฉีดขึ้นรูป	27
14	วิธีการขั้นตอนในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก	28
15	แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น	30
16	ลักษณะการจัดวางควาวิตี้ภายในแม่พิมพ์	31
17	เส้นทางวิ่งของพลาสติกหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์	32
18	รูปหน้าตัดของทางวิ่งแบบคางหมู	33
19	ขนาดหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมูของทางวิ่งที่ทำการออกแบบ	34
20	ทางเข้าแบบพัด	35
21	ทางเข้าแบบด้านข้าง	35
22	รูปแบบทางวิ่งและทางเข้าที่ได้ออกแบบไว้	36
23	ขนาดของหน้าตัดทางวิ่งและทางเข้าบริเวณด้านข้างของชิ้นงาน	36
24	การจัดวางตำแหน่งก้านกระทุ้งบริเวณชิ้นงานและทางวิ่ง	37

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	พื้นที่ภาพถ่ายในส่วนที่รับแรงดันของแม่พิมพ์ขณะทำการฉีดขึ้นรูป	38
26	ขั้นตอนการจำลองการไหลของพลาสติกหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ฉีด ขณะทำการฉีดขึ้นรูป	40
27	การแบ่งเอลิเมนต์แบบชิ้นงานเพื่อทำการวิเคราะห์	41
28	ทางเดินของใบมีดในการกัดขึ้นรูปชิ้นส่วนแม่พิมพ์	44
29	กระบวนการเจียรระโนนผิวเตรียมเหล็กชิ้นงานก่อนทำการผลิตแม่พิมพ์	44
30	กระบวนการกัดโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต	45
31	การกัดขึ้นรูปที่มุมของชิ้นงาน	46
32	การคว้านรูโดยใช้เครื่องกัด	46
33	ส่วนของแม่พิมพ์เมื่อผ่านกระบวนการผลิต	47
34	รูปร่างของชิ้นงานทดสอบ	48
35	การปรับตำแหน่งวาล์วเพื่อฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน	49
36	ตำแหน่งการตัดชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้ว	50
37	ลักษณะชิ้นงานและตำแหน่งการตัดชิ้นงาน เพื่อทดสอบสมบัติการต้านทาน ต่อแรง กระแทก	51
38	เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบ IZOD	51
39	ชิ้นงานทดสอบแรงดึง	52
40	เครื่อง Universal Testing Machine	53
41	ผลการทดลองการฉีดที่ปริมาตรแตกต่างกัน	54
42	(ก) การวิเคราะห์รูปร่างการไหลแบบ 2 มิติ ที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ฉีดที่ ปริมาตรการฉีดแตกต่างกัน  (ข) ผลการเปรียบเทียบการฉีดจริงและการวิเคราะห์แบบ 2 มิติที่ปริมาตร การฉีดเท่ากับ 70%	56

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
43	<p>ก) การวิเคราะห์รูปร่างการไหลแบบ 3 มิติ ที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ฉีดที่ปริมาตรการฉีดแตกต่างกัน</p> <p>(ข) ผลการเปรียบเทียบการฉีดจริงและการวิเคราะห์แบบ 3 มิติที่ปริมาตรการฉีดเท่ากับ 70%</p>	57
44	<p>การเปรียบเทียบตำแหน่งของรอยเชื่อมประสานที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานที่ทดลองฉีดจริงกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมจำลองการไหลแบบ 2 และ 3 มิติ</p>	58
45	<p>การเปรียบเทียบการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสานระหว่าง การตรวจวัดจริงและผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมจำลองการไหลแบบ 3 มิติ</p>	59
46	<p>การเปรียบเทียบการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสานระหว่างการตรวจวัดจริงและผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมจำลองการไหลแบบ 3 มิติ</p>	60
47	<p>(ก) รูปร่างการไหลที่บริเวณด้านหน้าของพลาสติกหลอมเหลวที่มีลักษณะแบบพาราโบลา</p> <p>(ข) การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในพลาสติกหลอมเหลวขณะไหล</p>	60
48	<p>การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วที่บริเวณด้านหน้าของพลาสติกหลอมเหลวยังคงอยู่ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหล</p>	61
49	<p>ค่าการต้านทานต่อแรงกระทำของชิ้นงานทดสอบที่มีและไม่มีรอยเชื่อมประสานของ ชิ้นงานที่มีความหนา 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร</p>	62
50	<p>ค่าการต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบที่มีและไม่มีรอยเชื่อมประสานของชิ้นงานที่มีความหนา 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร</p>	63
51	<p>การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วที่ตำแหน่งรอยเชื่อมประสาน</p>	64
52	<p>อัตราส่วนของชั้นแกนกลางต่อความหนาทั้งหมดของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสานที่ขนาดความหนาชิ้นงานต่างๆกัน</p>	64

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
53	อัตราส่วนของชั้นแกนกลางต่อความหนาทั้งหมดของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อม ประสานที่ขนาดความหนาชิ้นงานต่างๆกัน	65
<b>ภาพผนวกที่</b>		
ก1	ผลการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อม ประสานชิ้นงานหนา 2 มิลลิเมตร	73
ก2	ผลการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อม ประสานชิ้นงานหนา 4 มิลลิเมตร	74
ก3	ผลการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อม ประสานชิ้นงานหนา 6 มิลลิเมตร	75
ก4	ผลการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม ประสานชิ้นงานหนา 2 มิลลิเมตร	76
ก5	ผลการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม ประสานชิ้นงานหนา 4 มิลลิเมตร	77
ก6	ผลการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อม ประสานชิ้นงานหนา 6 มิลลิเมตร	78
ข1	การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 0.5 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน	80
ข2	การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 1 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน	81
ข3	การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 1.5 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน	82
ข4	การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 2 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน	83

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข5 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 2.5 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน	84
ข6 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 3 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน	85
ข7 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 0.5 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน	86
ข8 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 1 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน	87
ข9 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 1.5 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน	88
ข10 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 2 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน	89
ข11 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 2.5 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน	90
ข12 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 3 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน	91

**คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ**

CAD	=	Computer Aided Design
CAE	=	Computer Aided Engineering
CAM	=	Computer Aided Manufacturing
CMC	=	Ceramic Matrix Composite
CNC	=	Computer Numerical Control
MMC	=	Metal Matrix Composite
PMC	=	Polymer Matrix Composite
UTM	=	Universal Testing Machine

## การออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์ฉีดเพื่อวิเคราะห์การจัดเรียงตัว ของเส้นใยเสริมแรงภายในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

### Design and Development of Injection Mold for Determination of Fiber Orientation in Injection Molded Part

#### คำนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนพลาสติกในประเทศไทย ได้พัฒนาอย่างรวดเร็วโดยส่วนใหญ่ถูกผลิตขึ้นจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งจำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์ฉีดเป็นอุปกรณ์สำคัญในกระบวนการผลิต แม่พิมพ์ฉีดที่มีคุณภาพและมีความเที่ยงตรงสูงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้มีคุณภาพสูงด้วยเช่นกัน

อย่างไรก็ตามโดยมากปัญหาที่พบในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์และการปรับตั้งเครื่องฉีดที่ใช้เวลานานเนื่องจากการลองผิดลองถูก (Trial and error) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตรงตามแบบที่ลูกค้ากำหนด ดังนั้นจึงได้มีการนำเทคโนโลยี CAD/CAE/CAM มาประยุกต์ใช้ร่วมกับทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์ เพื่อช่วยลดเวลาในการออกแบบและลดเวลาในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ฉีด

ขั้นตอนในการออกแบบแม่พิมพ์เริ่มจากการนำ เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์ เพื่อทำการออกแบบชิ้นงานพลาสติกและชิ้นส่วนต่างๆ ของแม่พิมพ์ ฉีดพลาสติกรวมไปถึงการทดลองประกอบของชิ้นส่วนต่างๆของแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน จากนั้นนำแบบแม่พิมพ์ที่ได้ทำการออกแบบไว้มาจำลองสภาวะการไหลของพลาสติกหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ฉีดโดย เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) เพื่อวิเคราะห์การไหลของพลาสติกหลอมเหลวในแม่พิมพ์ขณะฉีดขึ้นรูปและข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นงานพลาสติกภายหลังจากการฉีดขึ้นรูป ซึ่งสามารถแก้ไขปรับปรุงแบบจนกระทั่งได้แบบที่เหมาะสม หลังจากนั้นจึงนำแบบแม่พิมพ์ที่ได้รับการออกแบบอย่างถูกต้องแล้วไปทำการผลิต โดยการใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing, CAM) ร่วมกับเครื่องจักร

อัตโนมัติที่ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control, CNC) ซึ่งเทคโนโลยี CAD/CAE/CAM สามารถลดความผิดพลาด ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีด ส่งผลก่อให้เกิดการลดต้นทุนการผลิตทั้งในแง่ของเวลาและกำลังคน

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก โดยการนำเทคโนโลยี CAD/CAE/CAM มาประยุกต์ใช้ร่วมกับทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์ ทำการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เพื่อผลิตชิ้นงานทดสอบรูปแบบต่างๆ โดยลักษณะพิเศษของแม่พิมพ์ที่ทำการออกแบบคือ ทางเข้าของพลาสติกหลอมเหลวมีทั้งทางเข้าแบบพัด (Fan gate) และทางเข้าแบบด้านข้าง (Side gate) อยู่ในแม่พิมพ์เดียวกัน แม่พิมพ์ถูกออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนทิศทางการไหล (Flow direction) ขนาดความหนาของชิ้นงานและทางเข้าได้ตามต้องการ รวมถึงความสามารถในการวิเคราะห์รอยเชื่อมประสาน (Weldline) ที่เกิดขึ้น

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปพลาสติก โดยใช้เทคโนโลยี CAD/CAE/CAM
2. เพื่อศึกษา อิทธิพลของลักษณะคavity รวมถึงลักษณะและตำแหน่งทางเข้า ที่มีต่อการจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงภายในชิ้นงาน และสมบัติเชิงกลที่ได้

## การตรวจเอกสาร

Chun (1999) ศึกษาลักษณะการไหลของพลาสติกหลอมเหลวในกรณีการฉีดขึ้นรูปโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์สภาวะการไหลของพลาสติกหลอมเหลวเพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนตำแหน่งทางเข้าของพลาสติกหลอมเหลวและความหนาที่ตำแหน่งต่างๆของชิ้นงาน ที่มีต่อการเกิดรอยเชื่อมประสานและฟองอากาศในชิ้นงาน พบว่าขนาดความหนาของด้านต่างๆในชิ้นงาน ขวดยุทธศาสตร์ ที่ต่างกันจะมีผลต่อการเกิดรอยเชื่อมประสานและฟองอากาศในชิ้นงาน โดยความหนาแต่ละด้านที่เพิ่มขึ้นมีผลให้รอยเชื่อมประสานและฟองอากาศในชิ้นงานลดลงแต่อาจเป็นการใช้วัสดุมากเกินไปจนความจำเป็น

Kim et al. (2003) ได้ศึกษาแนวทางการออกแบบตำแหน่งทางเข้าพลาสติกหลอมเหลว สำหรับชิ้นส่วนรถยนต์ที่มีบานพับ โดยศึกษาจากรูปแบบการไหลของพลาสติกหลอมเหลวที่ตำแหน่งทางเข้าต่างๆกัน พบว่าตำแหน่งทางเข้าของพลาสติกหลอมเหลวที่เหมาะสมที่สุดคือ ตำแหน่งที่ทำให้เกิด Flow hesitation บริเวณบานพับน้อยที่สุด เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดข้อบกพร่องขึ้นที่ชิ้นงานพลาสติก

Ozdemir et al. (2004) ได้ศึกษากระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก โดยทำการบันทึกภาพการไหลของพลาสติกหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ฉีดภายใต้สภาวะความดันและความเร็วในการฉีดที่แตกต่างกันด้วยกล้องวิดีโอ และนำภาพที่ได้ทำการบันทึกไว้มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์การไหลของพลาสติกหลอมเหลวที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์การไหล ซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการฉีดพลาสติกหลอมเหลว (Fill time) ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าแตกต่างจากเวลาที่ใช้นี้จริง นอกจากนี้ในการทดสอบบางกรณีเกิดการฉีดที่ไม่เต็มแบบ (Short shot) เนื่องจากความดันที่ใช้ในการฉีดต่ำเกินไปแต่ภายใต้เงื่อนไขการฉีดเดียวกันผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าพลาสติกหลอมเหลวสามารถทำการฉีดได้อย่างสมบูรณ์

Aisa et al. (2005) โดยทำการผลิตแม่พิมพ์ขนาดใหญ่ เพื่อฉีดขึ้นรูปถังขยะปริมาตร 1100 ลิตร โดยใช้เทคโนโลยี CAE แสดงให้เห็นถึงวิธีการออกแบบและการวิเคราะห์ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีข้อจำกัดในการออกแบบ เช่น ความดันในการฉีดที่มากเนื่องจากชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ แต่ต้องไม่มากเกินไปจนเกินกว่าแรงปิดแม่พิมพ์ของเครื่องฉีด

Tang et al. (2005) ได้ออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเพื่อทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ในการทดสอบการยุบตัวของชิ้นงาน (Sink mark) และได้ทำการวิเคราะห์เชิงความร้อน โดยใช้โปรแกรม Unigraphics ในการออกแบบ ร่วมกับโปรแกรม Lusas Analyst จากผลการวิเคราะห์ พบว่าโดยส่วนมากการยุบตัวของชิ้นงาน จะเกิดที่บริเวณใกล้กับท่อน้ำหล่อเย็น เมื่อเปรียบเทียบกับ บริเวณอื่นในชิ้นงานเดียวกัน

สุรศิษฐ์ (1994) ออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับตัวใบกังหันน้ำขนาดเล็ก โดยใช้เทคโนโลยี CAD/CAE/CAM และได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบการไหลของพลาสติก หลอมเหลวในขณะที่ทำการฉีดขึ้นรูปกับการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานจริง พบว่า เทคโนโลยี CAD/CAE/CAM สามารถช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์และเชื่อถือได้สูง

สมพร (1994) ได้เสนอการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและขึ้นรูปแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก โดยสร้างแบบชิ้นงานพัสดุมุดอากาศ โดยใช้โปรแกรม STRIM 100 มาช่วยในการออกแบบและขึ้นรูปแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ซึ่งทำให้การออกแบบแม่พิมพ์มีความรวดเร็วและสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อรรถพล (2002) ใช้เทคโนโลยี CAD/CAE/CAM โดยการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดฝาเกลียวพลาสติกและปรับตั้งพารามิเตอร์ของเครื่องฉีดพลาสติก โดยแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบชิ้นงานฉีด การออกแบบแม่พิมพ์ฉีด การวิเคราะห์ชิ้นงานฉีด กระบวนการผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์ และการคำนวณค่าที่ใช้ในการปรับตั้งพารามิเตอร์เครื่องฉีด ซึ่งสามารถกำหนดแนวทางการวางแผนกระบวนการผลิตสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและนำเสนอข้อมูลการผลิตเพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ผลิตกับลูกค้าให้เกิดความเข้าใจตรงกัน

Kim et al. (2001) ได้ทำการศึกษาการเรียงตัวของเส้นใยในระหว่างกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยเปรียบเทียบภาพที่ได้จาก Soft X-ray photograph กับผลที่ได้จากการผลการวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์การไหล Mold flow ผลจากการศึกษาพบว่า ผลที่ได้มีความสอดคล้องกันในกรณีที่อัตราส่วนของเส้นใยเสริมแรงในชิ้นงานมีปริมาณน้อย และไม่สามารถทำนายการจัดเรียงตัวของเส้นใยได้ในกรณีที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยมาก

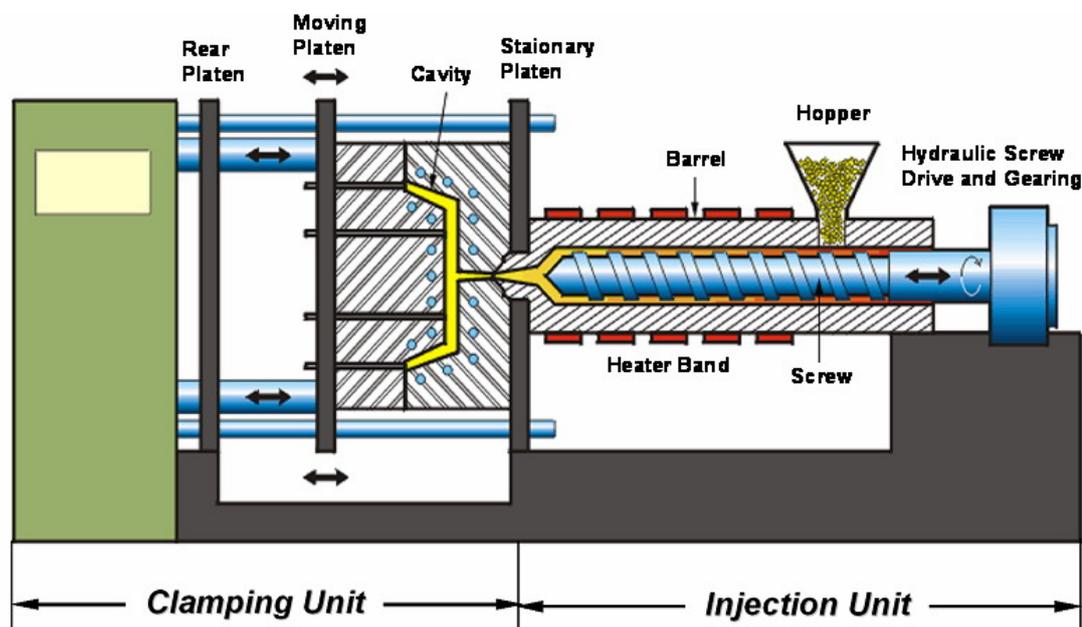
Patcharaphun (2007) ศึกษาถึงวิธีการทำนายค่าความต้านแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่ฉีดขึ้นรูปแบบแซนวิช (Sandwich injection) ในการศึกษาได้นำการปรับปรุง กฎของการผสม (Rule of mixture) โดยพิจารณาจากอัตราส่วนพื้นที่ระหว่างชั้นผิว (Skin layer) และชั้นแกนกลาง (Core layer) สำหรับการคำนวณหาความต้านแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบแซนวิช

ธนาลิทธิ (2544) ได้ทำการศึกษากาโรไลของพลาสติกหลอมเหลว เปรียบเทียบกับโปรแกรมจำลองการไหลของพลาสติกหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ โดยทำการเก็บค่าอุณหภูมิในจุดที่พลาสติกหลอมเหลวไหลผ่านในระหว่างกระบวนการฉีดขึ้นรูป พบว่าผลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิมีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองการไหล

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 1. กระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก

กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป คือ กระบวนการฉีดขึ้นรูปดังแสดงในภาพที่ 1 เนื่องจากสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อน และให้อัตราการผลิตที่สูง โดยขั้นตอนกระบวนการฉีดขึ้นรูป คือ เม็ดพลาสติกถูกป้อนเข้าทางกรวยเติม (Hopper) ซึ่งเม็ดพลาสติกจะถูกหลอมเหลวจนเป็นเนื้อเดียวกันจากการให้ความร้อนแก่เม็ดพลาสติกโดยใช้อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heaters) ร่วมกับการหมุนของสกรูเกลียวหนอน (Screw) ทำให้เกิดความร้อนจากแรงเฉือน (Shear heating) จากนั้นเกลียวหนอนถูกทำให้เคลื่อนที่เพื่ออัดพลาสติกหลอมเหลวให้ไหลผ่านหัวฉีด (Nozzle) เข้าสู่แม่พิมพ์ (Mold) จนไหลเต็มคาวีตี้ ซึ่งมีขนาดและรูปร่างตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำการผลิต โดยภายในแม่พิมพ์มีการติดตั้งระบบน้ำหล่อเย็น (Cooling system) เพื่อให้พลาสติกหลอมเหลวเย็นตัวลง ก่อนนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดขึ้นรูป

เครื่องฉีดพลาสติกประกอบด้วยส่วนสำคัญสองส่วนคือ ชุดฉีด (Injection unit) และ ชุดเปิดและปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit)

ชุดฉีดเป็นส่วนที่ทำหน้าที่นำพาสติคหลอมเหลวจากกรวยเติมเพื่อให้เกิดการหลอมเหลวภายในกระบอกฉีด (Barrel) และทำหน้าที่ฉีดพลาสติกหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ หลังจากขึ้นงานเย็นตัวลงและถูกนำปลดออกจากแม่พิมพ์แล้วจะทำการหลอมเม็ดพลาสติกใหม่เพื่อรอจังหวะในการฉีดครั้งต่อไป

ชุดเปิดและปิดแม่พิมพ์ (Clamping unit) ทำหน้าที่เคลื่อนที่เพื่อเปิดและปิดแม่พิมพ์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยมีสองส่วนคือ หน้าแปลนด้านที่ฉีดพลาสติกเข้าซึ่งเป็นด้านอยู่กับที่ (Stationary platen) และหน้าแปลนอีกด้านหนึ่งทำหน้าที่เคลื่อนที่เพื่อเปิดและปิด (Moving platen)

แม่พิมพ์ (Mold) เป็นส่วนที่รับพลาสติกหลอมเหลวจากหัวฉีดของเครื่องฉีดพลาสติก เพื่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ โดย รูฉีด (Sprue) ทำหน้าที่รับพลาสติกหลอมเหลวจากหัวฉีดของชุดฉีด ผ่านระบบทางวิ่ง (Runner) และทางเข้า (Gate) เข้าสู่ควาวิตี พลาสติกหลอมเหลวเริ่มเย็นตัวภายในควาวิตี ด้วยการทำงานของระบบหล่อเย็น เมื่อพลาสติกเย็นจนแข็งตัวแล้ว แม่พิมพ์จะเลื่อนเปิดออกและขึ้นงานถูกนำปลดออกด้วย ระบบนำปลดขึ้นงาน (Ejector system)

## 1.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูป มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.1.1 การหลอมเหลวพลาสติก (Melting process) คือ ขั้นตอนในการหลอมเหลวเม็ดพลาสติกจนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน ด้วยความร้อนจากอุปกรณ์ให้ความร้อนและจากการหมุนของสกรูเกลียวหนอนทำให้เกิดความร้อนจากแรงเฉือน

1.1.2 การฉีดพลาสติกหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ (Mold filling process) คือ ขั้นตอนของการฉีดพลาสติกหลอมเหลวผ่านหัวฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยแรงดันจากการขับเคลื่อนในแนวนอนของสกรูเกลียวหนอน

1.1.3 การให้แรงดันคงค้าง (Holding pressure phase) เมื่อพลาสติกหลอมเหลวถูกฉีดเข้าจนเต็มคavity และเมื่อพลาสติกหลอมเหลวเริ่มแข็งตัวทำให้เกิดการหดตัวของพลาสติก (Shrinkage) ในขั้นตอนนี้ต้องมีการให้แรงดันคงค้างต่อเนื่องทำให้เกิดการเติมเนื้อพลาสติกภายในคavity เพื่อชดเชยเพื่อชดเชยการหดตัวของชิ้นงานพลาสติกในระหว่างการเย็นตัว

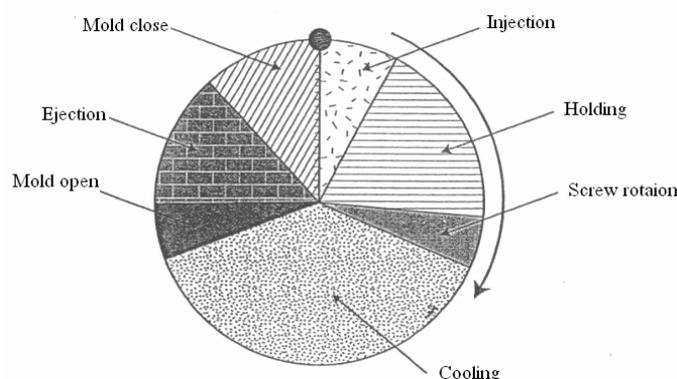
1.1.4 สกรูเกลียวหนอนหมุนเพื่อให้พลาสติกหลอมเหลวไหลไปที่บริเวณด้านหน้าของสกรูเกลียวหนอนเพื่อรอทำการฉีดในรอบต่อไป

1.1.5 การเย็นตัวของพลาสติกในแม่พิมพ์ (Cooling phase) ในขั้นตอนนี้ ทั้งอุณหภูมิและความดันของพลาสติกหลอมเหลวลดลงอย่างต่อเนื่อง เป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานานที่สุดในหนึ่งรอบการผลิตของกระบวนการฉีดขึ้นรูป

1.1.6 การเปิดแม่พิมพ์ (Mold open) แม่พิมพ์ถูกเปิดเพื่อรอทำการปลดนำชิ้นงานโดยก้านกระทุ้ง

1.1.7 การนำปลดชิ้นงาน (Ejection) เมื่อแม่พิมพ์เปิดออก ชิ้นงานจะถูกนำปลดด้วยกลไกทำให้ชิ้นงานหลุดออกจากคavity

1.1.8 แม่พิมพ์ปิด (Mold close) เมื่อนำปลดชิ้นงานแล้วแม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าประกบกันเพื่อรอทำการฉีดในรอบต่อไป โดยสามารถแสดงขั้นตอนกระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นวัฏจักร (Cycle Time) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 วัฏจักรของกระบวนการฉีดพลาสติก

ที่มา: ณรงค์ฤทธิ์ (2548)

## 2. แม่พิมพ์ฉีด

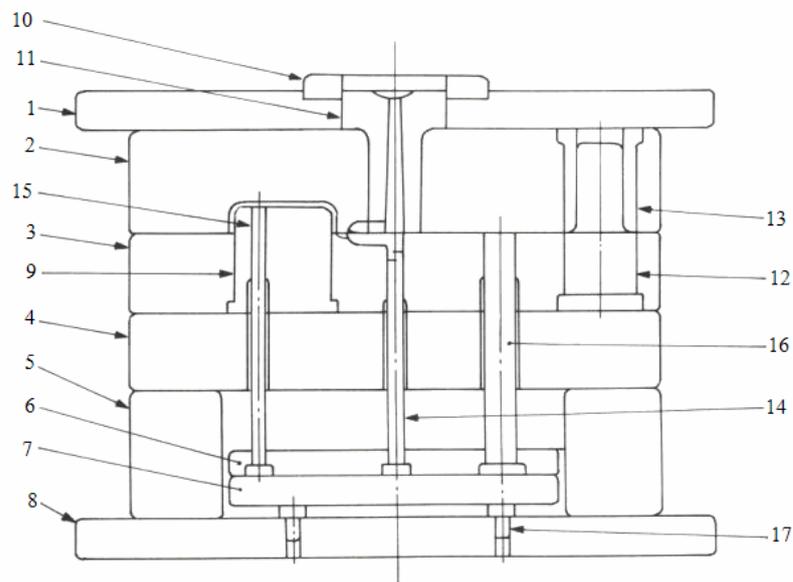
ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติก ส่วนสำคัญที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ แม่พิมพ์ โดยในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ แม่พิมพ์เป็นตัวทำให้เกิดรูปร่างของชิ้นงานตามที่ต้องการ ซึ่งแม่พิมพ์ฉีดที่ใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรมมีอยู่ด้วยกันมากมายหลายชนิด สามารถแบ่งเป็นประเภทต่างๆได้ดังนี้

1. แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น (Two plate mold) เป็นแม่พิมพ์แบบง่ายที่ใช้ผลิตชิ้นงานที่ปราศจากร่องหรือปาด ลักษณะของแม่พิมพ์ชนิดนี้ มีเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์ (Parting line) เส้นเดียว หรือมีช่องเปิดสำหรับปลดชิ้นงาน ทางวิ่ง และรูฉีดเพียงช่องเดียวเท่านั้น
2. แม่พิมพ์ฉีดแบบแยกด้านข้าง (Split mold) เป็นแม่พิมพ์ฉีดที่ออกแบบสำหรับชิ้นงานที่มีร่องหรือปาด้านนอก ส่วนของคาวีตี้สามารถแยกเป็นชิ้นส่วนหลายชิ้นที่สามารถเลื่อน และควบคุมให้อยู่ในตำแหน่งด้วยกรอบบังคับ (Chase bolster) ชิ้นส่วนที่ประกอประกกันเป็นคาวีตี้ของแม่พิมพ์เคลื่อนที่แยกด้านข้างได้โดยอาศัยอุปกรณ์หรือกลไกต่างๆ เช่น สลักเฉียง สปริง เป็นต้น
3. แม่พิมพ์ฉีดแบบคลายเกลียว (UnscREWing mold) เป็นแม่พิมพ์ที่ออกแบบสำหรับผลิตชิ้นงานที่มีร่องหรือปาด้านใน เช่น ชิ้นงานที่มีเกลียว ในการขึ้นรูปเกลียวอาศัยส่วนคอร์ที่ เป็นเกลียว และออกแบบให้มีระบบปลดหรือคลายเกลียวโดยอัตโนมัติ

4. แม่พิมพ์ฉีดแบบสามแผ่น (Three plate mold) เป็นแม่พิมพ์ที่ออกแบบให้มีเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์ 2 เส้น หรือมีช่องเปิดของแม่พิมพ์ 2 ช่อง ส่วนใหญ่ใช้ในกรณีที่ต้องการให้มีระบบปลดทางวิ่งและทางเข้าออกจากชิ้นงานโดยอัตโนมัติ

5. แม่พิมพ์ฉีดทางวิ่งร้อน (Hot runner injection mold) เป็นแม่พิมพ์ที่ออกแบบมาเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากระบบป้อนของแม่พิมพ์ ทำให้ไม่มีรูฉีด ทางวิ่งและทางเข้าติดอยู่ที่ชิ้นงาน เมื่อสิ้นสุดกระบวนการการฉีด เป็นการช่วยประหยัดพลาสติกที่ต้องสูญเสียไปกับระบบป้อน อีกทั้งยังช่วยลดระยะเวลาในการผลิตต่อรอบ ระบบป้อนของแม่พิมพ์สามารถออกแบบโดยมีชุดให้ความร้อน (Heater) ฝังอยู่ เพื่อให้ความร้อนแก่ระบบป้อน ทำให้พลาสติกที่อยู่ในระบบป้อนอยู่ในสถานะหลอมเหลวตลอดเวลา พร้อมทั้งจะถูกฉีดเข้าสู่ทิวสำหรับผลิตชิ้นงานในรอบต่อไปได้ แม่พิมพ์ชนิดนี้มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้น จึงเหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่หรือในกรณีที่วัสดุที่ใช้ในการผลิตไม่สามารถนำมาทำการผลิตซ้ำ (Reprocessing) ได้

แม่พิมพ์แต่ละชนิดมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันออกไป โดยส่วนประกอบพื้นฐานของแม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น (Two plate mold) ดังแสดงในภาพที่ 3 มีดังนี้



ภาพที่ 3 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น

ที่มา: ชาลี (2546)

1. แผ่นยึดบน (Fixed base plate) ทำหน้าที่ยึดส่วนที่อยู่กับที่ของแม่พิมพ์ เข้ากับหน้าแปลนด้านอยู่กับที่ของเครื่องฉีด

2. แผ่นคาวิตี (Fixed cavity plate) เป็นแผ่นที่มีไว้สำหรับประกอบส่วนคาวิตี (Cavity insert) เจาะช่องน้ำหล่อเย็น และต่อสายยางสำหรับน้ำหล่อเย็นในแม่พิมพ์ส่วนที่อยู่กับที่
3. แผ่นคอร์ (Core plate) เป็นแผ่นที่มีไว้สำหรับประกอบอินเสิร์ตส่วนคอร์ (Core insert) โดยปกติแล้วมีช่องน้ำหล่อเย็นอยู่ด้วย
4. แผ่นรองหลัง (Support core plate) เป็นแผ่นรองรับชิ้นส่วนของอินเสิร์ตส่วนคอร์ต่างๆ หรือส่วนของแผ่นคอร์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงหรือเจาะท่อน้ำหล่อเย็นเป็นต้น ซึ่งในการออกแบบแม่พิมพ์ ส่วนแผ่นรองหลังอาจมีหรือไม่มีก็ได้ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการออกแบบ
5. หมอนรอง (Spacer block) เป็นส่วนที่ประกอบอยู่กับส่วนเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ เพื่อเว้นระยะให้มีช่องว่างสำหรับการเคลื่อนที่ของก้านกระทุ้ง ความสูงของหมอนรองจะขึ้นอยู่กับช่วงความยาวของการนำปลดชิ้นงาน (Ejector stroke) รวมกับความหนาของแผ่นกระทุ้ง (Ejector plate) และแผ่นยึดก้านกระทุ้ง (Ejector retainer plate) และหัวของสลักยัน (Stop button) ที่ไหลออกมา
6. แผ่นยึดก้านกระทุ้ง (Ejector retainer plate) ทำหน้าที่ยึดก้านกระทุ้งให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องและเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเดิมได้อย่างคล่องตัว
7. แผ่นปลด (Ejector plate) ทำหน้าที่รักษาตำแหน่งของก้านกระทุ้งในแนวนอนไว้ขณะเคลื่อนที่ไปและกลับ
8. แผ่นฐานยึดล่าง (Bottom clamping plate) ทำหน้าที่ยึดแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องฉีดพลาสติก ด้านเคลื่อนที่โดยใช้สกรูยึดเข้าด้วยกัน แผ่นยึดล่างมีขนาดเท่าแผ่นยึดบนและบริเวณตรงกลางของแผ่นทำการเจาะรูสำหรับเพลากะทุ้งจากเครื่องฉีด
10. แหวนบังคับศูนย์กลาง (Locating ring) จะต้องมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางพอดีกับรูสวมที่ด้านหน้าแปลนของเครื่องฉีด ทำหน้าที่บังคับให้แม่พิมพ์วางตัวอยู่ในตำแหน่งแนวการฉีด โดยที่หัวฉีดต้องสัมผัสกับปลอกกรูฉีดพอดี
11. ปลอกกรูฉีด (Sprue bushing) เป็นส่วนของแม่พิมพ์ที่สัมผัสโดยตรงกับหัวฉีด การประกบที่แนบกันสนิทระหว่างหัวฉีดกับปลอกกรูฉีด ทำให้ไม่เกิดการรั่วของพลาสติกหลอมเหลวในขณะฉีด
12. เพลาน้ำ (Guide pin) ทำหน้าที่กำหนดตำแหน่งการปิดของแม่พิมพ์ เพื่อให้แม่พิมพ์ทั้งสองส่วนเคลื่อนที่เข้าหากัน โดยไม่เกิดการเอียงศูนย์กลาง
13. ปลอกนำ (Guide bushing) จะติดอยู่กับส่วนอยู่กับที่ของแม่พิมพ์โดยมีตำแหน่งตรงกันกับเพลาน้ำ
14. สลักดึงแกนรูฉีด (Sprue puller) ทำหน้าที่ในการดึงให้ชิ้นงานติดออกมากับส่วนที่เคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานติดค้างอยู่บนแม่พิมพ์

15. ก้านกระทุ้ง (Ejector pin) มีลักษณะเล็กและยาว ทนต่อแรงกดและทนต่อการสึกกร่อนได้ดี มีหน้าที่ในการนำปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์
16. สลักคืนกลับ (Return pin) มีหน้าที่ทำให้ก้านกระทุ้งเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเดิมหลังจากทำการนำปลดชิ้นงานเสร็จ หรืออาจใช้เป็น สปริงคืนกลับ
17. สลักยัน (Stop pin) การติดสลักยันในแม่พิมพ์สามารถช่วยลดพื้นที่ในการรับแรงกระแทกระหว่างแผ่นปลดกับแผ่นฐานยึดล่างของแม่พิมพ์

### 3. การออกแบบแม่พิมพ์ฉีด

#### 3.1 การหาจำนวนและวางตำแหน่งควาวิตี

การออกแบบจำนวนควาวิตีภายในแม่พิมพ์นั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณการผลิตและปริมาตรสูงสุดที่สามารถฉีดได้ของเครื่องฉีดที่ใช้ในการผลิต ซึ่งสามารถคำนวณได้จากปริมาตรรวมของชิ้นงานทุกควาวิตีรวมกันซึ่งต้องน้อยกว่าปริมาตรที่เครื่องฉีด ทำการฉีดได้สูงสุด (Maximum shot size) ซึ่งในการออกแบบแม่พิมพ์ให้มีจำนวนควาวิตีมากพอที่ผลิตชิ้นงานได้ตามจำนวนที่ต้องการ สิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงคือ การจัดวางตำแหน่งของควาวิตีให้เหมาะสม โดยยึดหลักที่สำคัญอยู่ 3 ประการคือ

3.1.1 ควรวางควาวิตีให้ใช้เนื้อของแม่พิมพ์น้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อประหยัดวัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์

3.1.2 ควรออกแบบให้ทางวิ่ง (Runner) สั้นที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดความดันตก (Pressure drop) ซึ่งอาจส่งผลให้พลาสติกหลอมเหลวไม่สามารถไหลเข้าเต็มเต็มควาวิตีที่อยู่ไกลหรืออยู่ปลายทางวิ่งได้

3.1.3 จัดวางตำแหน่งควาวิตีภายในแม่พิมพ์ให้มีความสมดุลดังแสดงในภาพที่ 4 หากการจัดวางควาวิตีไม่สมดุล คือมีพื้นที่ที่รับแรงดันจากการฉีดมากทางไปด้านใดด้านหนึ่งแล้ว อาจส่งผลทำให้แม่พิมพ์แยกออก ทำให้เกิดครีบ (Flash) ขึ้นที่ชิ้นงานได้ และการไหลของพลาสติกหลอมเหลวในแม่พิมพ์ที่จัดวางควาวิตีเป็นรูปวงกลมมีความสมดุลมากกว่าในแบบเรียงแถว

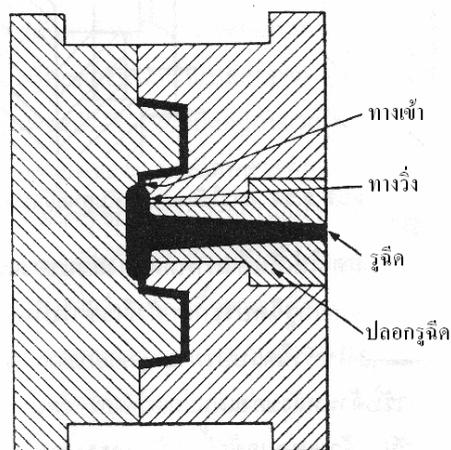
จำนวนควาวิตี	การจัดวางเรียงแถว	การจัดวางรูปวงกลม
1		
2		
3		
4		
5		
6		

ภาพที่ 4 การจัดวางควาวิตีในรูปแบบต่างๆ

ที่มา: สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน (2549)

### 3.2 การออกแบบระบบป้อน

ภายในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกมีระบบป้อนซึ่งประกอบไปด้วยรูฉีด ทางวิ่งและทางเข้า เพื่อนำพลาสติกหลอมเหลวจากหัวฉีดของเครื่องฉีดไปยังแต่ละควาวิตี ดังแสดงในภาพที่ 5

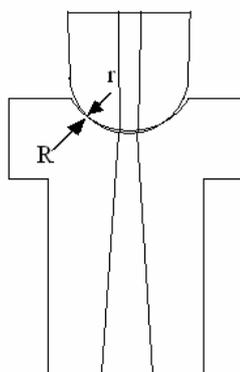


ภาพที่ 5 ระบบป้อนภายในแม่พิมพ์ฉีด

ที่มา: ชาลี (2546)

### 3.2.1 การออกแบบปลอกกรูชนิด

ในกระบวนการฉีดพลาสติก พลาสติกหลอมเหลวจากกระบอกฉีดไหลเข้าสู่แม่พิมพ์โดยผ่านหัวฉีดซึ่งสัมผัสโดยตรงกับปลอกกรูชนิดในปลอกกรูชนิดมีช่องทางไหลเป็นทรงกรวยซึ่งเรียกว่ารูฉีด ปลอกกรูชนิด โดยทั่วไปมีรัศมีโค้งรับสัมผัสกับรัศมีหัวฉีด โดยรัศมีของหัวฉีดควรมีขนาดเล็กกว่าขนาดรัศมีของปลอกกรูชนิดเล็กน้อยเพื่อให้ชิ้นส่วนทั้งสองมีการสัมผัสกันพอดี เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วไหลของพลาสติกหลอมเหลว ในขณะที่ทำการฉีด หัวฉีดและปลอกกรูชนิดจะประกบกันอย่างสนิทพอดีหาก  $R = r + 1$  เมื่อ  $r$  คือรัศมีหัวฉีด  $R$  คือรัศมีปลอกกรูชนิดดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การสัมผัสของรัศมีโค้งระหว่างหัวฉีดกับหัวปลอกกรูชนิด

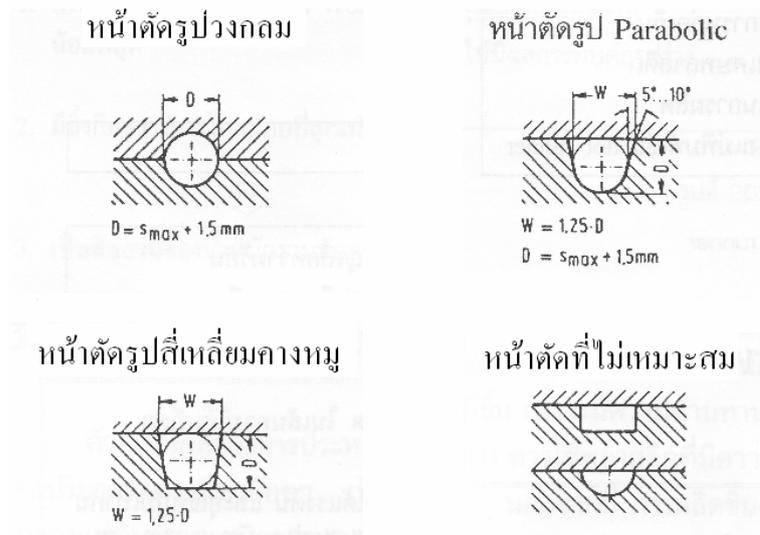
### 3.2.2 แหวนบังคับศูนย์ (Locating ring)

แหวนบังคับศูนย์ อยู่ในตำแหน่งผิวด้านหน้าของแม่พิมพ์ ทำหน้าที่เพื่อกำหนดให้แม่พิมพ์อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมบนหน้าแปลนของเครื่องฉีดพลาสติก แหวนบังคับศูนย์จะถูกสวมเข้ากับรูทรงกระบอกบริเวณหน้าแปลนยึดของเครื่องฉีด และอยู่ในแนวศูนย์กลางเดียวกันกับกระบอกฉีด ทำให้พลาสติกหลอมเหลวสามารถไหลจากกระบอกฉีดผ่านหัวฉีดเข้าสู่ระบบป้อนของแม่พิมพ์ได้อย่างสะดวก

### 3.2.3 การออกแบบระบบทางวิ่ง

ทางวิ่งคือร่องที่กัดเซาะขึ้นภายในแม่พิมพ์ เพื่อให้รูฉีดและภาวดีเชื่อมต่อถึงกัน ทางวิ่งส่วนใหญ่อยู่บนผิวแบ่งส่วนแม่พิมพ์ (Parting plane) ผิวของทางวิ่งต้องเรียบเพื่อให้พลาสติกหลอมเหลวสามารถไหลได้อย่างสะดวก และไม่เกิดการติดขัดเมื่อทำการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

รูปทรงหน้าตัดของทางวิ่งในแม่พิมพ์ฉีดมีหลายลักษณะดังแสดงในภาพที่ 7 ยกตัวอย่าง เช่น แบบกลม (Round) และแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) เป็นต้น การออกแบบทางวิ่งให้มีประสิทธิภาพ มีหลักในการพิจารณาคือ ทางวิ่งควรมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเนื้อพลาสติกน้อยที่สุด กล่าวคือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดต่อพื้นที่ผิวสัมผัสควรมีค่ามากดังแสดงในภาพที่ 8 เพื่อลดการสูญเสียแรงดันและความร้อนในขณะที่พลาสติกหลอมไหลผ่านทางวิ่ง ชาลี (2546)



ภาพที่ 7 ภาพตัดขวางของทางลักษณะต่างๆ

ที่มา: สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน (2549)

แบบกลม	แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส	แบบครึ่งวงกลม	แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า							
0.25 D	0.25 D	0.153 D	<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">d =</td> <td><math>\frac{D}{2}</math></td> <td>0.166 D</td> </tr> <tr> <td><math>\frac{D}{4}</math></td> <td>0.1 D</td> </tr> <tr> <td><math>\frac{D}{6}</math></td> <td>0.071 D</td> </tr> </table>	d =	$\frac{D}{2}$	0.166 D	$\frac{D}{4}$	0.1 D	$\frac{D}{6}$	0.071 D
d =	$\frac{D}{2}$	0.166 D								
	$\frac{D}{4}$	0.1 D								
	$\frac{D}{6}$	0.071 D								
$\text{อัตราส่วน} = \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดของทางวิ่ง}}{\text{พื้นที่ผิวสัมผัส}}$										

ภาพที่ 8 อัตราส่วนของทางวิ่งที่มีรูปทรงหน้าตัดต่างๆกัน

ที่มา: ชาลี (2546)

### 3.2.4 การคำนวณหาขนาดทางวิ่ง

พื้นที่หน้าตัดของทางวิ่ง ควรมีขนาดใหญ่เพียงพอที่ให้พลาสติกหลอมเหลวไหลผ่านได้และสามารถเติมเต็มทุกควิตี้ภายในแม่พิมพ์ก่อนเกิดการแข็งตัว หากทางวิ่งมีความยาวมาก ส่งผลให้เกิดการต้านทานในการไหลมากขึ้น ดังนั้นระยะห่างระหว่างควิตี้กับรูฉีดของแม่พิมพ์ จึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดหน้าตัดของทางวิ่ง ซึ่งขนาดของทางวิ่งที่เลือกใช้ควรเป็นขนาดที่สามารถหามัดกัดได้โดยไม่ต้องกัดหลายรอบและใช้มีดหลายขนาดในการกัดร่องทางวิ่ง

สูตรในการคำนวณหาขนาดทางวิ่ง ชาลี (2546) คือ

$$D = \frac{\sqrt{W} \times \sqrt[4]{L}}{3.7} \quad (1)$$

เมื่อ

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางทางวิ่ง (mm)

W = น้ำหนักของชิ้นงาน (g)

L = ความยาวทางวิ่ง (mm)

### 3.2.5 การออกแบบทางเข้า

ทางเข้า คือ ร่องหรือช่องทางเล็กๆที่เชื่อมต่อระหว่าง ทางวิ่งกับควิตี้เข้าด้วยกัน ขนาดพื้นที่หน้าตัดควรมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับทางวิ่งและรูฉีด เนื่องจาก

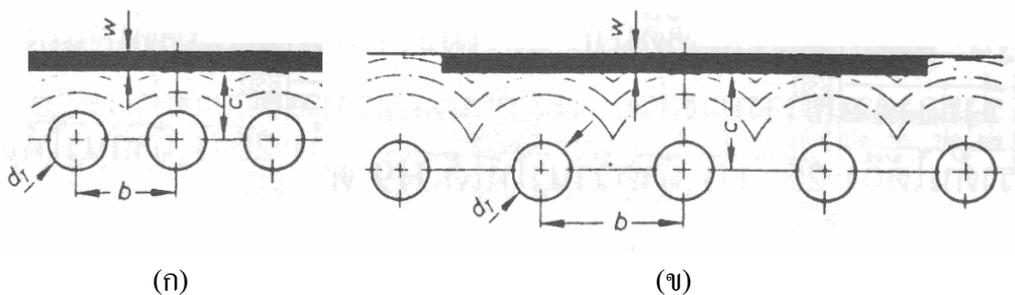
1. ในขณะที่พลาสติกหลอมเหลวไหลผ่านทางเข้าซึ่งมีขนาดเล็กทำให้ความเร็วในการไหลของพลาสติกหลอมเหลวเพิ่มมากขึ้น
2. ขนาดทางเข้าที่มีขนาดเล็ก ทำให้ทางเข้าเกิดการเย็นตัวและแข็งตัวได้รวดเร็ว หลังจากทีพลาสติกหลอมเหลวไหลเข้าจนเต็มควิตี้และทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้พลาสติกหลอมเหลวที่อยู่ในควิตี้ไหลย้อนกลับออกจากควิตี้ ในขณะที่ทำการถอดสกรูเกลียวหนอน
3. สามารถปลดทางเข้าออกจากชิ้นงานได้ง่าย และเหลือรอยตำหนิบนชิ้นงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ขนาดทางเข้าสามารถพิจารณาในรูปของพื้นที่หน้าตัดและความยาวทางเข้า (Gate land) ขนาดของทางเข้าขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ สมบัติในการไหลของพลาสติกที่ใช้ฉีด ความหนาของผนังชิ้นงาน ปริมาตรการไหลของพลาสติกที่ฉีดเข้าไปในควิตี้ อุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลว และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ใช้ เป็นต้น

### 3.3 ระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์

หน้าที่หลักของระบบหล่อเย็น คือ ลดอุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลวที่ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ ทำให้พลาสติกแข็งตัวและพร้อมที่จะถูกปลดออกจากแม่พิมพ์ได้อย่างรวดเร็ว การหล่อเย็นโดยปกติแล้วใช้น้ำหรืออากาศ เป็นสารหล่อเย็น แต่โดยทั่วไปนิยมใช้น้ำในการหล่อเย็นมากที่สุด ข้อควรพิจารณาในการออกแบบระบบหล่อเย็นได้แก่

1. ท่อน้ำหล่อเย็นไม่ควรอยู่ใกล้ผิวตัวมากเกินไป เพราะ อาจทำให้ชิ้นงานพลาสติกมีการหดตัวเร็วเกินไป ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดรอยร้าว (Crack) หรือ โกงงอ (Warpage) ได้ ดังแสดงในภาพที่ 9 ระยะห่างระหว่างท่อน้ำหล่อเย็นกับชิ้นงานลักษณะที่ 1 มีระยะห่างไม่เหมาะสมคือท่อน้ำหล่อเย็นอยู่ใกล้หลุมแบบชิ้นงานมากเกินไป ในขณะที่ลักษณะที่ 2 มีระยะห่างของท่อน้ำที่เหมาะสม น้ำหล่อเย็นควรปริมาณเพียงพอที่รักษาอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้อยู่ในเกณฑ์ระหว่างที่เครื่องฉีดทำการผลิตในอัตราสูงสุด
2. การต่อท่อน้ำหล่อเย็นหรือการติดตั้งระบบน้ำหล่อเย็นควรติดตั้งอยู่ที่ด้านที่ไม่มีมีการปฏิบัติงาน เพื่อไม่ให้ขัดขวางการทำงานของผู้ปฏิบัติงาน
3. อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกไม่ควรแตกต่างกันมากเกินไป เนื่องจากการที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ตำแหน่งต่างๆ แตกต่างกันมากอาจส่งผลให้เกิดความยุ่งยากในการนำปลดชิ้นงานที่แข็งตัวไม่เท่ากัน



ภาพที่ 9 แสดงระยะต่างๆ ของการวางท่อน้ำหล่อเย็น (ก) ไม่เหมาะสม (ข) เหมาะสม

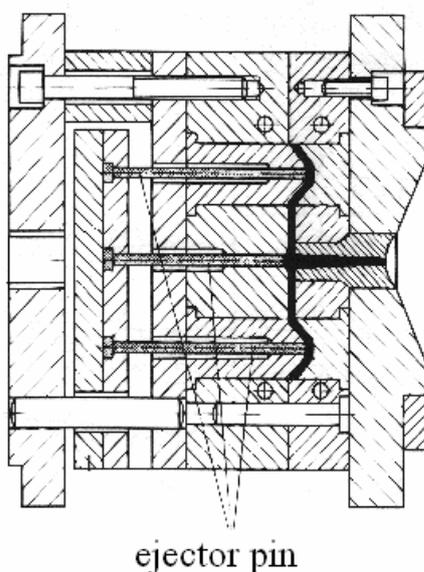
ที่มา: สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน (2549)

### 3.4 ระบบนำปลดชิ้นงาน

การนำปลดชิ้นงาน หมายถึง การนำเอาชิ้นงานพลาสติกที่แข็งตัวแล้วออกจากแม่พิมพ์โดยระบบนำปลดชิ้นงาน ซึ่งมีหลักการสำคัญอยู่ 3 ประการคือ

1. ในการนำปลดชิ้นงานต้องไม่ทำให้ชิ้นงานเสียรูปไป
2. การนำปลดชิ้นงาน ชิ้นงานควรหลุดออกจากแม่พิมพ์ทุกครั้งที่ทำกรนำปลด
3. ใช้เวลาในการนำปลดชิ้นงานออกน้อยที่สุดและทำการนำปลดโดยอัตโนมัติ

หลักการขั้นต้นของการนำปลดชิ้นงานคือ ผิวของควาวิตต้องขัดให้เรียบและมีความเรียบในทิศทางการปลดออก ระบบนำปลดชิ้นงานที่ใช้กันโดยส่วนใหญ่ได้แก่การใช้ก้านกระทุ้ง ดังแสดงในภาพที่ 10 เมื่อส่วนเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์เคลื่อนที่ถอยหลังจนชนเพลากะทุ้งบนเครื่องฉีด ซึ่งทำให้แผ่นปลดดันก้านกระทุ้งเลื่อนไปข้างหน้า ดันชิ้นงานให้หลุดออกจากแม่พิมพ์ จำนวนของก้านกระทุ้ง ต้องมีจำนวนมากพอที่สามารถดันชิ้นงานให้หลุดออกจากควาวิตได้พร้อมกัน โดยที่ชิ้นงานพลาสติกไม่มีการบิดหรือติดอยู่ภายในแม่พิมพ์



ภาพที่ 10 ระบบนำปลดชิ้นงานด้วยก้านกระทุ้งในแม่พิมพ์ฉีด

ที่มา: เทคโนโลยีพลาสติก (2546)

### 3.5 ระบบระบายอากาศ (Venting system)

เมื่อพลาสติกหลอมเหลวถูกฉีดเข้าไปในคาวีตี้ อากาศภายในคาวีตี้จะถูกพลาสติกหลอมเหลวเข้าแทนที่ โดยดันอากาศออกตรงบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นแม่พิมพ์ทั้งสอง หากภูระบบระบายอากาศไม่เพียงพอหรือได้รับการออกแบบให้อยู่ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม อากาศที่อยู่ภายในคาวีตี้นี้อาจถูกอัดด้วยความดันซึ่งอาจทำให้อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงถึง 800 – 1000°C ส่งผลให้เกิดรอยไหม้ (Burn mark) ที่บริเวณขอบหรือมุมของชิ้นงานได้

ดังนั้นแม่พิมพ์ที่ดี ควรได้รับการออกแบบให้มีช่องระบายอากาศไว้ เพื่อให้อากาศสามารถระบายออกจากแม่พิมพ์ได้อย่างอิสระ การระบายอากาศผ่านทางผิวแบ่งแม่พิมพ์ หรือ ทางก้านกระทุ้ง ทำได้โดยการปาดผิว (Grinding) ให้มีความลึกไม่เกิน 0.05 มิลลิเมตร และกว้างไม่เกิน 3 มิลลิเมตร โดยหากมีความลึกมากเกินไปพลาสติกหลอมเหลวอาจไหลเข้าไปทำให้เกิดครีป (Flash) บนชิ้นงานได้

ตำแหน่งที่ควรทำช่องระบายอากาศภายในแม่พิมพ์ คือ

1. บริเวณที่อยู่ห่างจากทางเข้ามากที่สุดชิ้นงานที่สมมาตรกัน
2. บริเวณที่พลาสติกหลอมเหลวไหลมาบรรจบกันภายในคาวีตี้ (Weldline position)
3. บริเวณผิวที่ลึกที่สุดภายในแผ่นคาวีตี้ของแม่พิมพ์

### 3.6 การเลือกวัสดุในการทำแม่พิมพ์

เนื่องจากแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกต้องรับแรงเสียดสีและความร้อนจากการไหลของพลาสติกหลอมเหลว รวมถึงแรงกระแทกและแรงอัดในการปิดแม่พิมพ์ ดังนั้นวัสดุที่ใช้ในการทำชิ้นส่วนต่างๆ ของแม่พิมพ์จึงควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. ทนต่อการเสียดสีสูงและทนต่อการกัดกร่อนได้ดี เพื่อให้แม่พิมพ์ใช้ได้ยาวนาน
2. ขยายตัวน้อยในช่วงอุณหภูมิขณะทำการฉีดพลาสติก เพื่อให้ได้ขนาดและรูปทรงของชิ้นงานที่แน่นอน
3. สามารถทำการแปรรูปได้ง่าย ส่วนใหญ่จะเป็นงานปาดผิว และงานกัด (Milling)
4. ต้องคงรูปเมื่อทำการชุบแข็งและสามารถขัดผิวเรียบได้ตามรูปร่างที่ต้องการ

### 3.7 การประมาณการหดตัว

พลาสติกหลอมเหลวที่ถูกฉีดเข้าไปในคาวีตี้เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการแข็งตัวและเกิดการหดตัว พลาสติกแต่ละชนิดมีอัตราการหดตัวที่ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1 ในการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อให้ได้แม่พิมพ์ที่มีประสิทธิภาพ ปัจจัยสำคัญต้องนำมาพิจารณา นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นคือ การหดตัวของพลาสติก (Shrinkage) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกมีผลให้ชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปมีขนาดเล็กกว่าขนาดที่ออกแบบไว้ ดังนั้นในการออกแบบแม่พิมพ์จากแบบชิ้นงานที่กำหนดให้ ควรเพิ่มขนาดเพื่อชดเชยการหดตัวของพลาสติกเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดถูกต้องตรงตามแบบที่กำหนด

ตารางที่ 1 การหดตัวของพลาสติกชนิดต่างๆ

Material	Shrinkage
ABS	0.005–0.007
Acetal, axially	0.021–0.026
Acetal, radially	0.018–0.020
Acrylic	0.004–0.007
EVA	0.007–0.020
Nylon 6	0.006–0.014
Nylon 66, axially	0.012–0.033
Nylon 66, radially	0.020–0.028
Polycarbonate	0.006–0.008
PE	0.015–0.050
PE, 30% Glass reinforced	0.004–0.0045
PET (bottle grade)	0.005–0.012
PP	0.012–0.022
PP, 30% Glass reinforced	0.004–0.0045
PS	0.002–0.006
PS, 30% Glass reinforced	0.0005–0.0010
PVC	0.003–0.008
PVC, 30% Glass reinforced	0.001–0.002

ที่มา: Rees (1995)

อัตราการหดตัวของชิ้นงานในแต่ละจุดอาจมีค่าไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบช่องทางน้ำหล่อเย็น (Cooling path) การหดตัวในทิศทางที่ขนานกับทิศทางการไหลของพลาสติกที่แตกต่างกับอัตราการหดตัวในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล รวมถึงอัตราการหดตัวของชิ้นงานในส่วนที่หนามีค่ามากกว่าในส่วนที่บางซึ่งโดยปกติแล้วอัตราการหดตัวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดความหนาของชิ้นงาน

การหัดตัวของชิ้นงานเป็นการหัดตัวตามปริมาตรกล่าวคือ ชิ้นงานเกิดการหัดตัวทั้งด้านกว้าง ด้านยาว และด้านหนา ของชิ้นงาน ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มค่าหัดตัวเข้าไปในขนาดของแม่พิมพ์แต่ละด้านตั้งแต่ในส่วนของการขึ้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ชิ้นงานพลาสติกที่มีขนาดถูกต้อง

#### 4. วัสดุคอมโพสิต (Composite materials)

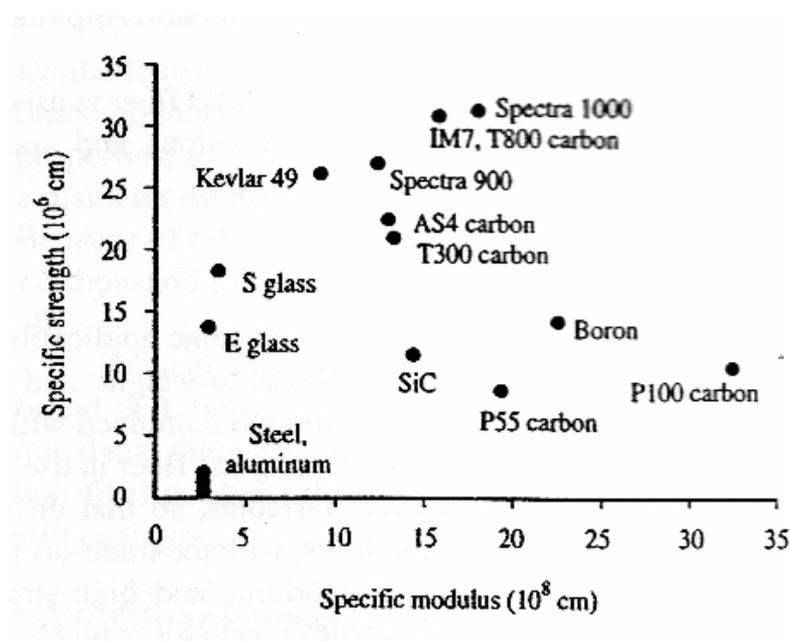
วัสดุคอมโพสิต คือวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุที่มีสมบัติต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ที่องค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันและต้องไม่ละลายเข้าด้วยกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติทางกายภาพหรือทางกลบางอย่างให้ดีขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ค่าความถ่วงจำเพาะลดลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีน้ำหนักเบา เป็นต้น วัสดุคอมโพสิตโดยปกติแล้วประกอบด้วยวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) และวัสดุเมตริกซ์ (Matrix) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทหลัก คือ

4.1 วัสดุเซรามิกคอมโพสิต (Ceramic Matrix Composite, CMC) ใช้เซรามิกเป็นวัสดุเมตริกซ์ เช่น อะลูมินาแคลเซียม อะลูมินอซิลิเกต วัสดุเสริมแรงโดยส่วนใหญ่นิยมใช้เส้นใยคาร์บอน และ ซิลิกอนคาร์ไบด์ วัสดุคอมโพสิตประเภทนี้สามารถใช้งานได้ในพื้นที่อุณหภูมิสูง เช่น กังหันใบพัดของเครื่องยนต์ไอพ่น เป็นต้น

4.2 วัสดุโลหะคอมโพสิต (Metal Matrix Composite, MMC) ใช้โลหะเป็นวัสดุเมตริกซ์ เช่น อะลูมิเนียม แมกนีเซียม และไทเทเนียม โดยวัสดุเสริมแรงที่นำมาผสม ได้แก่ เส้นใยคาร์บอน และ วัสดุเซรามิกพวกกลุ่มคาร์ไบด์ และ กลุ่มไนไตรด์ เป็นต้น พบมากในผลิตภัณฑ์กลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์

4.3 วัสดุพลาสติกคอมโพสิต (Polymer Matrix Composite, PMC) ใช้พลาสติกเป็นวัสดุเมตริกซ์ และวัสดุเสริมแรงสามารถเลือกใช้ได้หลายชนิด เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นใยโลหะจำพวกสแตนเลสและอลูมิเนียม เป็นต้น วัสดุพลาสติกผสมเส้นใยเสริมแรง เป็นวัสดุที่มีประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้งาน ตัวอย่างผลิตภัณฑ์วัสดุพลาสติกคอมโพสิต ที่พบเห็นโดยส่วนมากได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากไฟเบอร์กลาส และผลิตภัณฑ์ในกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น

โดยปกติพลาสติกมีสมบัติเชิงกลต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุกลุ่มโลหะ แต่ด้วยเหตุผลที่ว่า พลาสติกสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรายละเอียดซับซ้อนได้ง่าย และมีน้ำหนักเบา โดยขณะที่วัสดุเสริมแรงมีสมบัติเด่นในเรื่องของสมบัติเชิงกล ดังแสดงในภาพที่ 11 การผสมพลาสติกเข้ากับวัสดุเสริมแรงทำให้รวมสมบัติเด่นของพลาสติกและสมบัติเชิงกลที่เด่นของวัสดุเสริมแรงเข้าด้วยกัน ส่งผลให้ได้วัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติดีขึ้น โดยพลาสติกที่เป็นวัสดุเมทริกซ์ ทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงไปยังวัสดุเสริมแรงภายในวัสดุคอมโพสิต ซึ่งวัสดุเสริมแรงที่นิยมใช้ได้แก่ เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใย อะรามิด (Aramid fiber) และเส้นใยแก้ว (Glass fiber) เป็นต้น



ภาพที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Specific modulus กับ Specific strength ของเส้นใยแต่ละชนิด

ที่มา: Jang (1994)

เส้นใยคาร์บอน เป็นเส้นใยที่มีประสิทธิภาพสูงโดยมีสมบัติเด่นคือ ความแข็งแรงสูงไม่บิดงอได้ง่าย ทนต่อความชื้น กรด และด่าง แต่เนื่องจากด้วยราคาของเส้นใยคาร์บอนที่ค่อนข้างสูง จึงทำให้มีการใช้งานอยู่ในวงจำกัด ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นส่วนอากาศยาน อุปกรณ์ทางการแพทย์ และถึง ความดัน เป็นต้น

เส้นใยอะรามิด เป็นเส้นใยที่มีคุณภาพสูงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย เนื่องจากมี จุดเด่นคือน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงและความเหนียวสูง นิยมใช้ในงานด้านอากาศยาน และอุปกรณ์ป้องกันกระสุน เป็นต้น

เส้นใยแก้ว เป็นเส้นใยที่นิยมใช้ในการนำมาผสมกับพลาสติกเพื่อทำวัสดุคอมโพสิตมากที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นคือ มีความแข็งแรงสูง มีรูปทรงที่เสถียร มีความเป็นฉนวน ไม้ดูดความชื้น ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ขึ้นรูปได้ง่าย และต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าเส้นใยคาร์บอน และเส้นใยอะรามิด เส้นใยแก้วที่สำคัญสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ

E glass (Electrical grade) เป็นเส้นใยแก้วที่มีการนำมาใช้งานมากที่สุด E glass เป็นแก้วที่ได้จากสารประกอบ Lime aluminium borosilicate ซึ่ง มีความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ประมาณ 3.44 GPa และมีค่าโมดูลัส (Modulus of Elasticity) 72.3 GPa

S glass (High Strength grade) มีค่าอัตราส่วนของความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงกว่าและมีราคาแพงกว่า E glass ค่าการต้านทานแรงดึงของ E glass มีค่าประมาณ 4.48 GPa และมีค่าโมดูลัสประมาณ 85.4 GPa

ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกคอมโพสิต มีด้วยกันหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การขึ้นรูปโดยมือ (Hand lay up) กระบวนการพ่นขึ้นรูป (Spray up) กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากวัสดุพลาสติกคอมโพสิต เริ่มเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มากขึ้น เนื่องจากให้กำลังการผลิตสูงตลอดจนสามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรายละเอียดและความซับซ้อนได้อย่างแม่นยำ

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต คือ

1. สมบัติของเส้นใยเสริมแรง ชนิดของเส้นใยเสริมแรงที่แตกต่างกันส่งผลให้สมบัติเชิงกลแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลถึงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตด้วย
2. สมบัติของวัสดุเมทริกซ์
3. อัตราส่วนผสมของปริมาณเส้นใยเสริมแรง (Fibre volume fraction)

4. การจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง (Fiber orientation) สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมขึ้นอยู่กับทิศทางที่เส้นใยเสริมแรง โดยวัสดุผสมจะมีความเหนียวและความแข็งแรงในทิศทางที่เส้นใยเสริมแรงจัดเรียงตัวในแนวทิศทางของแรงที่กระทำ ดังนั้นสิ่งที่ต้องพิจารณาในการออกแบบชิ้นงานที่ทำจากวัสดุผสมคือ ขนาดและทิศทางของแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน

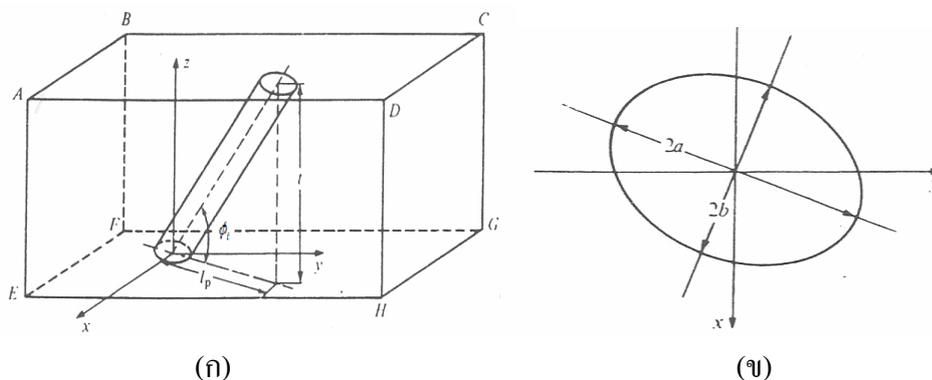
#### 5. การจัดเรียงตัวของเส้นใยภายในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Fiber Orientation in injection mold parts)

การตรวจวัดการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงานฉีดขึ้นรูปอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2 Sanouf et al. (1985) ในการตรวจสอบค่ามุมที่เส้นใยแก้วกระทำกับระนาบในกรณีที่ทำ การวิเคราะห์ตามภาคตัดขวางของชิ้นงาน

$$\phi_i = \cos^{-1} \left( \frac{b}{a} \right) \quad (2)$$

เมื่อ	$a$	คือ	ระยะแกนเอกของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยแก้ว ( $\mu\text{m}$ )
	$b$	คือ	ระยะแกนโทของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยแก้ว ( $\mu\text{m}$ )
	$\phi_i$	คือ	มุมที่เส้นใยจัดเรียงตัวเมื่อเทียบกับทิศทางการไหล

โดยลักษณะมุมที่เส้นใยแก้วในกรณีที่ทำ การวิเคราะห์ตามภาคตัดขวางของชิ้นงาน และระยะแกนของด้าน  $a$  และ  $b$  แสดงในภาพที่ 12 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 12 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ก) แสดงตำแหน่งของมุมเอียง  $\phi_i$  (ข) แสดงระยะ  $a$  และ  $b$

ในกรณีที่ระยะแกนเอกและแกนโทของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยแก้วมีค่าเท่ากัน ค่ามุมที่ได้จากการตรวจสอบมีค่าเท่ากับ 1 หรือกล่าวได้ว่าหน้าตัดของเส้นใยแก้วมีลักษณะเป็นวงกลม นั่นคือการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วมีทิศทางเดียวกับทิศทางกรไหลของพลาสติกหลอมเหลว

หลังจากทำการวัดค่ามุมของเส้นใยแล้ว ค่ามุมที่ได้ถูกใช้ในการคำนวณค่าการจัดเรียงตัวของเส้นใยในทิศทางกรไหล (The second order orientation tensor,  $a_{11}$ ) ซึ่งสมการนี้แสดงดังสมการที่ 3 Advani and Tucker (1987)

$$a_{11} = \frac{1}{N_{\phi_i}} \sum_{n=1}^{N_{\phi_i}} \cos^2 \phi_i \quad (3)$$

เมื่อ  $\phi_i$  คือ มุมที่เส้นใยจัดเรียงตัวเมื่อเทียบกับทิศทางกรไหลซึ่งมีจำนวน  $N_{\phi_i}$  เส้น (โดยปกติแล้วจำนวนตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ควรใช้อย่างน้อย 500 ตัวอย่าง) สำหรับการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วในทิศทางกรไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยสมบูรณ์นั้น ค่า  $a_{11}$  จะมีค่าเท่ากับ 1 และเมื่อการจัดเรียงตัวของเส้นใย มีลักษณะแบบสุ่มหรือการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบค่า  $a_{11}$  จะมีค่าเท่ากับ 0.5 ในขณะที่ หากการจัดเรียงตัวของเส้นใยอยู่ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางกรไหล ค่า  $a_{11}$  มีค่าเท่ากับ 0

## อุปกรณ์และวิธีการ

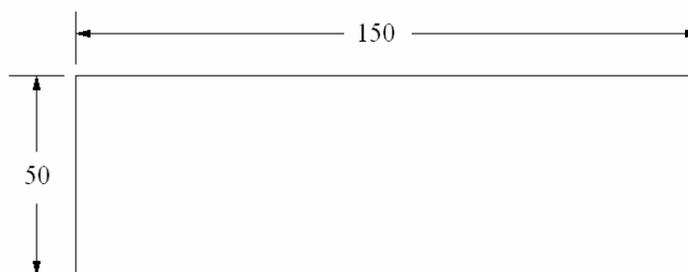
### อุปกรณ์

1. เครื่องกัด (Blond Makino รุ่น BMC60 )
2. เครื่องกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (Sodick รุ่น A530D)
3. เครื่องฉีดพลาสติก (ARBURG รุ่น 320C 500-250)
4. เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Gotech รุ่น GT-7045)
5. เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Hounsfield รุ่น H50KS)
6. เครื่องขัดผิวชิ้นงาน (Polishing machine)
7. เครื่องเจียรระไน (Okamoto รุ่น 63DX )
8. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Nikon รุ่น Eclipse Me600 Nikon)
9. โปรแกรมเขียนแบบ (Solidworks 2004)
10. โปรแกรมวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ฉีด (Moldflow 5.1)
11. เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)
12. เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนผสมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 30% โดยน้ำหนัก
13. เหล็กเกรด S50C

## วิธีการ

### 1. การออกแบบชิ้นงานทดสอบ

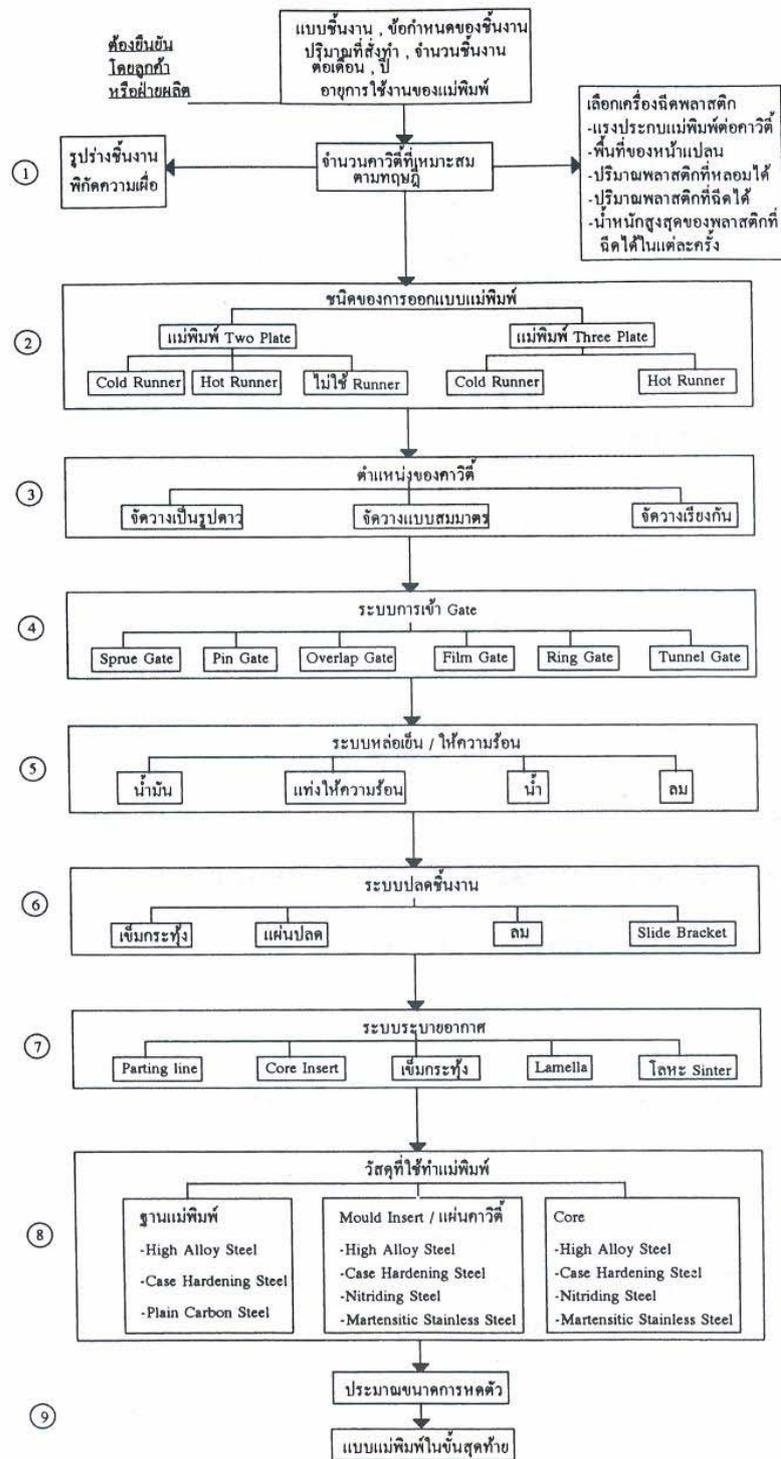
ก่อนทำการออกแบบแม่พิมพ์ต้องออกแบบและเขียนแบบชิ้นงานที่ต้องการทำการฉีดขึ้นรูป ก่อนเป็นอันดับแรก ชิ้นงานทดสอบที่ได้ทำการออกแบบ มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาดความกว้างเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ความยาวเท่ากับ 150 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 13 ซึ่งความหนาของชิ้นงานนี้จะกำหนดให้มีขนาดความหนาคือ 2, 4, และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ



ภาพที่ 13 แสดงลักษณะชิ้นงานที่ออกแบบเพื่อทำการฉีดขึ้นรูป

### 2. การออกแบบแม่พิมพ์

ลำดับขั้นตอนในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก แบ่งเป็นขั้นตอนหลักๆ ได้ 9 ขั้นตอน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนมีการกำหนดองค์ประกอบต่างๆ ภายในแม่พิมพ์ รวมถึงการคำนวณและกำหนดขนาดส่วนประกอบของแม่พิมพ์ ซึ่งบางส่วนขึ้นอยู่กับเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ด้วย ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 วิธีการขั้นตอนในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

ที่มา: สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน (2549)

## 2.1 ขั้นตอนในการหาจำนวนคาวิตี้

ชิ้นงานทดสอบที่ทำการฉีดขึ้นรูปมีลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความกว้างเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ความยาวเท่ากับ 150 มิลลิเมตร และขนาดของความหนา มี 3 ขนาดคือ 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้เป็นตัวกำหนดในการออกแบบ คือ โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) มีค่าความหนาแน่น (Density) เท่ากับ 0.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{g/cm}^3$ ) ซึ่งนำมาคำนวณหาน้ำหนักของชิ้นงานที่มีความหนามากที่สุดเท่ากับ 45 กรัม

การคำนวณหาจำนวนคาวิตี้ที่เหมาะสมจากน้ำหนักชิ้นงานเทียบกับปริมาตรการฉีดสูงสุด (Maximum shot size) สามารถทำได้โดยคำนวณหาปริมาตรรวมพลาสติกทั้งหมดที่ฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ ซึ่งน้ำหนักของพลาสติกในรูฉีดและทางวิ่งภายในแม่พิมพ์ สามารถประมาณให้มีค่าเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักชิ้นงาน โดยการคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักชิ้นงาน} &= 45 \text{ กรัม} \\ \text{น้ำหนักรูฉีดและทางวิ่ง} &= 0.2 \times 45 = 9 \text{ กรัม} \\ \text{น้ำหนักทั้งหมด} &= \text{น้ำหนักชิ้นงาน} + \text{น้ำหนักรูฉีดและทางวิ่ง} \\ &= 45 + 9 = 54 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\text{จาก ความสัมพันธ์} \quad \rho = \frac{m}{V}$$

$$\therefore \text{ปริมาตรทั้งหมดของชิ้นงานรวมระบบป้อนเท่ากับ} = \frac{54}{0.91} = 59.34 \text{ ลบ.ซม.}$$

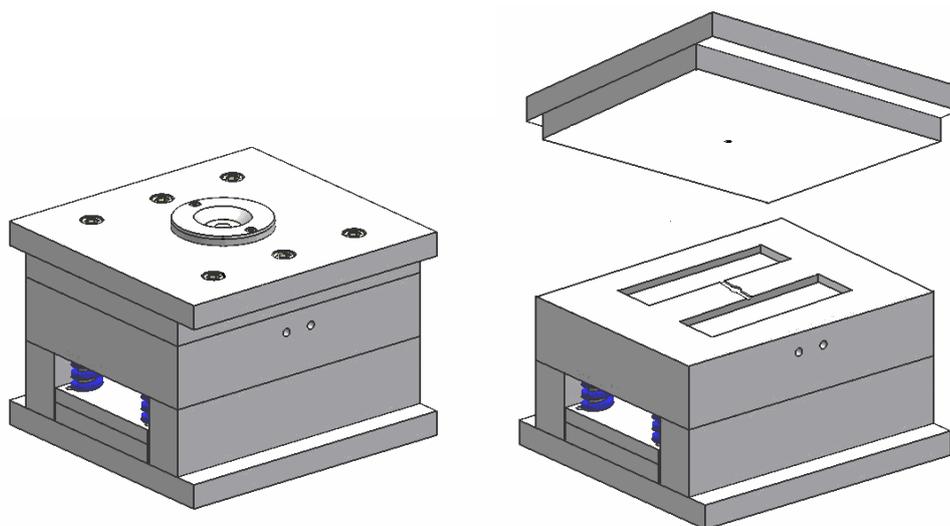
จากข้อมูลเครื่องฉีด ARBURG 320C 500-250 มีค่าปริมาตรการฉีดสูงสุดเท่ากับ 144 ลบ.ซม.

$$\therefore \text{จำนวนคาวิตี้ที่เหมาะสม} = \frac{144}{59.34} = 2.42$$

จากผลจำนวนคาวิตี้ที่คำนวณได้เท่ากับ 2.42 จึงกำหนดจำนวนคาวิตี้ที่เหมาะสมเท่ากับ 2 คาวิตี้ ดังนั้นจึงทำการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดที่ใช้กับเครื่องฉีดรุ่นดังกล่าว มีจำนวนคาวิตี้ภายในแม่พิมพ์เท่ากับ 2

## 2.2 ขั้นตอนในการเลือกชนิดของแม่พิมพ์

เนื่องจากชิ้นงานทดสอบที่ได้ทำการออกแบบไว้มีรูปร่างไม่ซับซ้อน ดังนั้นจึงออกแบบแม่พิมพ์เป็นแบบ 2 แผ่น ดังแสดงในภาพที่ 15 ซึ่งง่ายต่อการถอดประกอบแม่พิมพ์เพื่อเปลี่ยนอินเสิร์ต (Insert) อีกด้วย

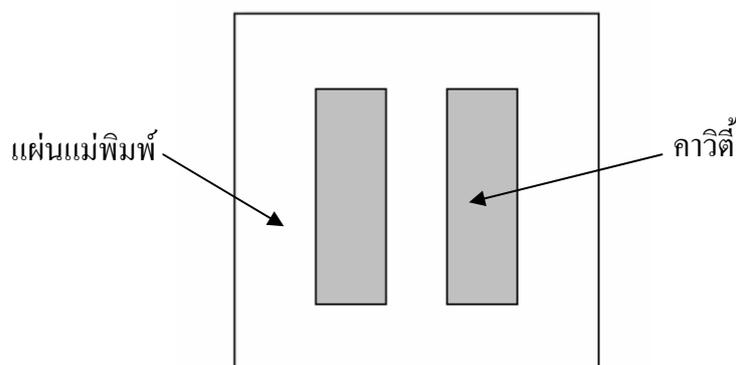


ภาพที่ 15 แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น

## 2.3 ขั้นตอนการจัดวางตำแหน่งคาวิตี

หลังจากคำนวณหาจำนวนคาวิตีได้แล้ว ต้องมีการจัดวางตำแหน่งคาวิตีให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อให้พลาสติกหลอมเหลวสามารถไหลเข้าเต็มเต็มทุกคาวิตีพร้อมกัน และผลลัพธ์ของแรงกระทำควรอยู่ที่จุดศูนย์กลางถ่วงของแม่พิมพ์ โดยหากคาวิตีอยู่ในตำแหน่งเยื้องศูนย์กลาง แม่พิมพ์จะรับแรงที่ไม่สม่ำเสมอและอาจเสียหายได้ ผลที่ตามมาคือ อาจเกิดครีบขึ้นที่ชิ้นงาน ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น

เมื่อพิจารณาจากตัวแปรที่มีผลต่อการวางตำแหน่งควาวิต์ คือ จำนวนของควาวิต์ รูปร่างขนาดของชิ้นงาน ชนิดของแม่พิมพ์ และชนิดของทางเข้า ตำแหน่งการจัดวางควาวิต์ที่เหมาะสมแสดงได้ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ลักษณะการจัดวางควาวิต์ภายในแม่พิมพ์

## 2.4 ขั้นตอนการออกแบบระบบป้อน

ช่องทางไหลสำหรับพลาสติกหลอมไหลจากหัวฉีดของเครื่องฉีดไปยังแต่ละควาวิต์ภายในแม่พิมพ์ รวมเรียกว่าระบบป้อน ซึ่งประกอบด้วย รูฉีด ทางวิ่ง และ ทางเข้า ตามลำดับ

### 2.4.1 การออกแบบปลอกกรูฉีด

ในกระบวนการฉีดพลาสติก พลาสติกหลอมไหลจากกระบอกฉีดจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์โดยผ่านหัวฉีด ซึ่ง หัวฉีดและปลอกกรูฉีดควรประกบกันอย่างสนิทพอดีโดยที่รัศมีของปลอกกรูฉีดต้องใหญ่กว่ารัศมีของหัวฉีด 1 มิลลิเมตร ซึ่งรัศมีหัวฉีดของเครื่องฉีด ARBURG 320C 500-250 เท่ากับ 35 มิลลิเมตร ดังนั้นขนาดของรัศมีปลอกกรูฉีดที่เลือกใช้มีค่าเท่ากับ 36 มิลลิเมตร

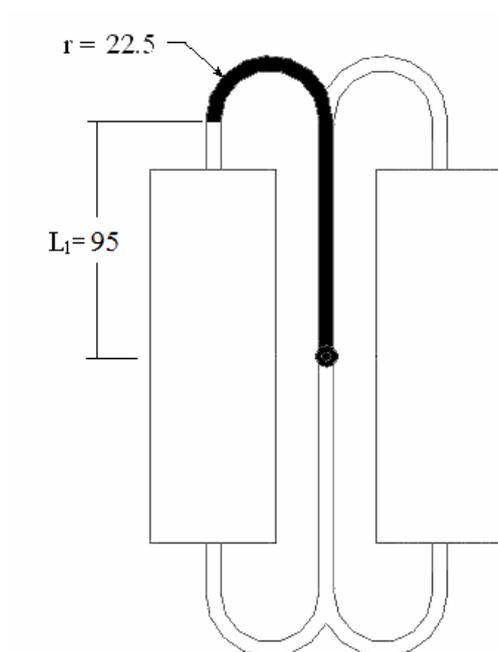
### 2.4.2 แหวนบังคับศูนย์

มีหน้าที่กำหนดตำแหน่งของแม่พิมพ์ให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมบนหน้าแปลนของเครื่องฉีดพลาสติก เมื่อทำการยึดแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องฉีดพลาสติก แหวนบังคับศูนย์ควรสวมเข้ากับรูทรงกระบอกบนหน้าแปลนส่วนที่อยู่กับที่ของเครื่องฉีดพอดี ซึ่งในการออกแบบแหวนบังคับศูนย์มีขนาดขึ้นอยู่กับเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้งาน จากข้อมูลเครื่องฉีด ARBURG 320C 500-

250 หน้าแปลนเครื่องฉีดส่วนที่อยู่กับที่มีรูทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 120 มิลลิเมตร ดังนั้นขนาดของแหวนบังคับศูนย์กลางที่เลือกใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์คือ 120 มิลลิเมตร

### 2.4.3 การออกแบบระบบทางวิ่ง

ทางวิ่งเป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างรูฉีดกับคาวีดี ซึ่งในการออกแบบระบบทางวิ่งต้องพิจารณาถึงรูปร่างหน้าตัดและขนาดของทางวิ่งที่เหมาะสมด้วย ภาพที่ 17 แสดงการออกแบบเส้นทางวิ่งของพลาสติกหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์



ภาพที่ 17 เส้นทางวิ่งของพลาสติกหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์

การคำนวณหาขนาดทางวิ่งต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- รูปทรงหน้าตัดของทางวิ่ง และปริมาตรของชิ้นงาน
- ความยาวของทางวิ่งหลักและทางวิ่งรอง
- ขนาดของมีดกัดเพื่อใช้ในการกัดขึ้นรูป

\

ขนาดของทางวิ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

$$\begin{aligned}
 \text{หาความยาวของทางวิ่ง } L &= L_1 + \pi r \\
 &= 95 + \frac{22}{7} \times 22.5 \\
 &= 165.71 \text{ มิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

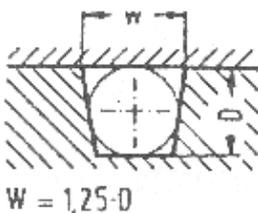
น้ำหนักของชิ้นงาน 1 ชิ้น เท่ากับ 45 กรัม

คำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางวิ่งตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 1

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{\sqrt{45} \times \sqrt{165.71}}{3.7} \\
 &= 6.5 \text{ มิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

จากผลลัพธ์ที่คำนวณค่า D ได้เท่ากับ 6.5 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาถึงขนาดมีดกัดที่ใช้ในการขึ้นรูปจึงกำหนดให้ทางวิ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 มม.

การเลือกรูปทรงหน้าตัดของทางวิ่ง ปัจจัยสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาเพื่อให้ทางวิ่งมีประสิทธิภาพสูงคือ ทางวิ่งควรมีอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดต่อพื้นที่ผิวสัมผัสกับพลาสติกหลอมเหลว น้อยที่สุด รวมถึงความยากง่ายในการกัดขึ้นรูปของทางวิ่ง ซึ่งการกัดขึ้นรูปทางวิ่งบนแผ่นแม่พิมพ์เพียงด้านเดียวสะดวกกว่าการกัดขึ้นรูปทางวิ่งบนผิวของแม่พิมพ์ทั้งสองด้าน

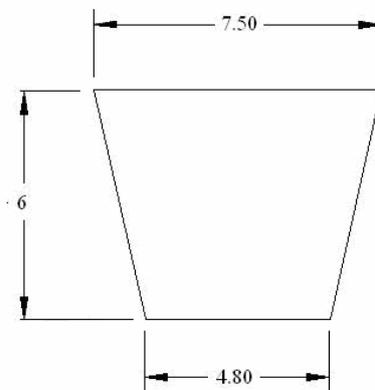


ภาพที่ 18 รูปหน้าตัดของทางวิ่งแบบคางหมู

ที่มา: สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน (2549)

เมื่อพิจารณาถึงข้อดีของรูปทรงหน้าตัดในแต่ละแบบ ทั้งในด้านของอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดต่อพื้นที่ผิวสัมผัส และความยากง่ายในการกัดขึ้นรูป รูปทรงหน้าตัดที่เลือกใช้คือ สี่เหลี่ยมคางหมูซึ่งมีขนาดสัมพันธ์กับขนาดของวงกลมดังแสดงในภาพที่ 18 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนำมาคำนวณหาขนาดด้านยาวของสี่เหลี่ยมคางหมูได้ดังนี้

ขนาดด้านยาวของสี่เหลี่ยมคางหมู (W) =  $1.25 \times D = 1.25 \times 6 = 7.5$  มิลลิเมตร  
นำขนาดด้านยาวมาสร้างสี่เหลี่ยมคางหมูได้ดังแสดงในภาพที่ 19

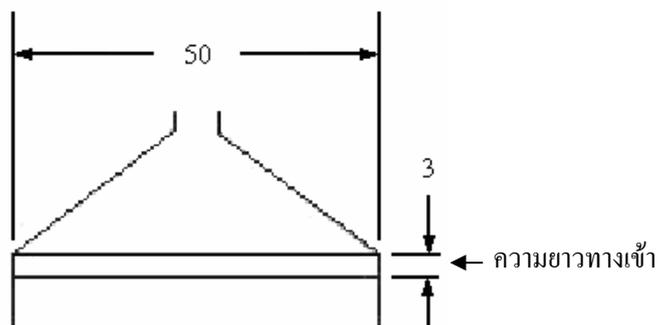


ภาพที่ 19 ขนาดหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมูของทางวิ่งที่ทำการออกแบบ

#### 2.4.4 การออกแบบทางเข้า

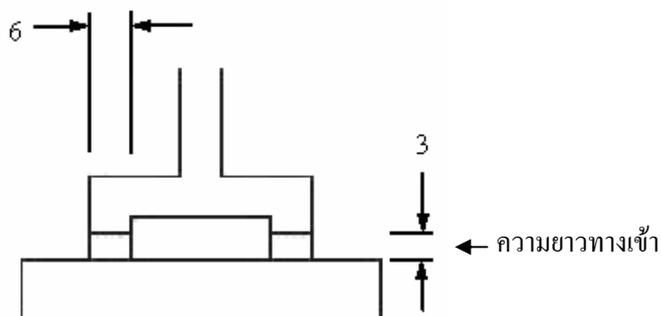
แม่พิมพ์นี้ได้ออกแบบให้มีทางเข้าสองแบบคือ แบบพัด (Fan gate) และ แบบเข้าด้านข้าง (Side gate) ซึ่งในแต่ละแบบสามารถเปลี่ยนขนาดความหนาของทางเข้าได้ โดยความหนาที่กำหนดไว้คือ 1, 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ทางเข้าแบบพัดที่ได้ทำการออกแบบไว้ดังภาพที่ 20 ซึ่งมีความกว้างตรงบริเวณทางเข้าเท่ากับขนาดความกว้างชิ้นงานคือ 50 มิลลิเมตร ส่วนที่เป็นความยาวทางเข้ามีขนาด 3 มิลลิเมตร



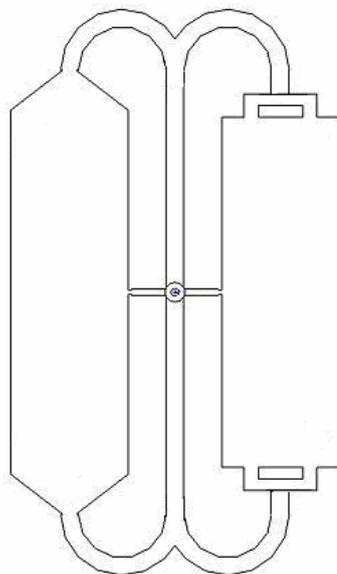
ภาพที่ 20 ทางเข้าแบบพัด

ทางเข้าแบบเข้าด้านข้างเป็นแบบเข้าสองจุดดังภาพที่ 21 ซึ่งความกว้างของทางเข้าแต่ละจุดเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ส่วนที่เป็นความยาวทางเข้ามีขนาด 3 มิลลิเมตร

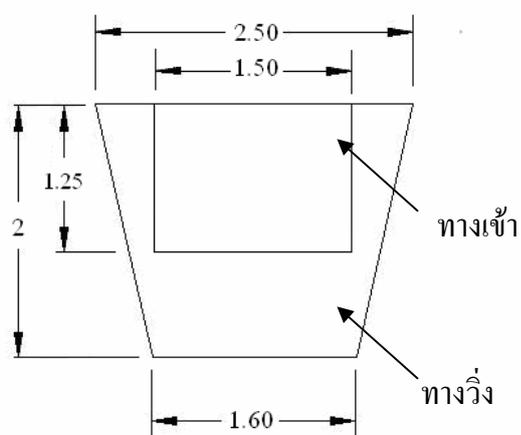


ภาพที่ 21 ทางเข้าแบบด้านข้าง

นอกจากนี้ยังได้ทำการออกแบบให้มีทางวิ่งและทางเข้าขนาดเล็กเข้าตรงบริเวณด้านข้างของชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 22 เพื่อใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของพลาสติกหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ที่ทำให้เกิดรอยเชื่อมประสานขึ้นในรูปแบบที่แตกต่างกัน โดยหน้าตัดของทางวิ่งที่เลือกใช้เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ส่วนหน้าตัดทางเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 22 รูปแบบทางวิ่งและทางเข้าที่ได้ออกแบบไว้



ภาพที่ 23 ขนาดของหน้าตัดทางวิ่งและทางเข้าบริเวณด้านข้างของชิ้นงาน

## 2.5 ระบบหล่อเย็น

การเลือกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อน้ำหล่อเย็นสามารถพิจารณาได้จากความหนาของชิ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อน้ำหล่อเย็นที่เลือกใช้คือ 10 มิลลิเมตร

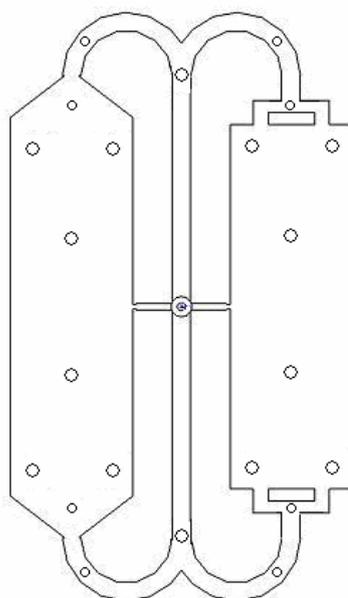
ตารางที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อน้ำหล่อเย็นที่เหมาะสมกับความหนาของชิ้นงาน

ความหนาชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อน้ำหล่อเย็น (มิลลิเมตร)
น้อยกว่า 2	8 - 10
น้อยกว่า 4	10 - 12
น้อยกว่า 6	12.-15

ที่มา: สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน (2549)

## 2.6 การออกแบบระบบนำปลดชิ้นงาน

ระบบปลดทำหน้าที่ดันปลดชิ้นงานให้หลุดออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งระบบนำปลดที่เลือกใช้ในแม่พิมพ์นี้เป็นแบบ ก้านกระทุ้ง (Ejector pin) โดยมีจำนวนและการจัดวางตำแหน่งเข็มก้านกระทุ้งดังแสดงในภาพที่ 24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มก้านกระทุ้งที่เลือกใช้มี 2 ขนาด คือ 3 และ 6 มิลลิเมตร



ภาพที่ 24 การจัดวางตำแหน่งก้านกระทุ้งที่บริเวณชิ้นงานและทางวิ่ง

## 2.7 ช่องระบายอากาศ

ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดควรมีช่องระบายอากาศเพื่อไม่ให้อากาศที่อยู่ภายในคาวิตีที่ถูกอัดตัวในขณะที่พลาสติกหลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ ซึ่งจะทำให้เกิดรอยไหม้ขึ้นที่ชิ้นงาน ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว ดังนั้นในการออกแบบช่องระบายอากาศในแม่พิมพ์นี้จึงได้ออกแบบให้มีช่องระบายอากาศที่บริเวณก้านกระทุ้งของแม่พิมพ์

## 2.8 การเลือกวัสดุในการทำแม่พิมพ์

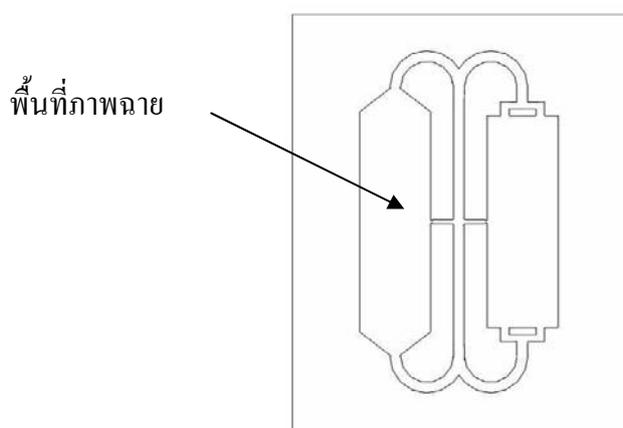
เนื่องจากแม่พิมพ์นี้ได้ออกแบบไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ดังนั้นจึงเลือกใช้วัสดุแม่พิมพ์เป็นเหล็กผสม S50C ซึ่งทนทานต่อการเสียดสีได้ดีและมีความแข็งแรงสูง

## 2.9 การประมาณการหดตัว

พลาสติกหลอมเหลวที่ถูกฉีดเข้าไปในคาวิตีเมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการหดตัว โดยพลาสติกแต่ละชนิดมีการหดตัวที่ไม่เท่ากัน การออกแบบแม่พิมพ์นี้ไม่ได้ทำการเผื่อค่าหดตัวไว้ เนื่องจากแม่พิมพ์นี้ได้ออกแบบเพื่อนำไปใช้ในการฉีดขึ้นรูปพลาสติกหลายชนิด

## 2.10 การคำนวณหาแรงปิดแม่พิมพ์

ในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานจะเกิดแรงดันขึ้นภายในแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นแรงผลักดันให้แม่พิมพ์เปิดออก ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นนี้ควรมีค่าน้อยกว่าแรงปิดแม่พิมพ์สูงสุดของเครื่องฉีด ซึ่งการออกแบบแม่พิมพ์นี้พื้นที่ภาพฉาย (Projection area) ของชิ้นงานมีลักษณะดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 พื้นที่ภาพฉายในส่วนที่รับแรงดันของแม่พิมพ์ขณะทำการฉีดขึ้นรูป

แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force)

$$F = P \times A \quad (4)$$

เมื่อ

P = ความดันในการฉีด (Injection pressure) มีค่าเท่ากับ 1,820 bar

A = พื้นที่ภาพฉายของชิ้นงาน เท่ากับ 194.72 ตารางเซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \text{แรงปิดแม่พิมพ์ฉีด} &= 1820 \times 194.72 \\ &= 354,390 = 35.4 \text{ Ton} \end{aligned}$$

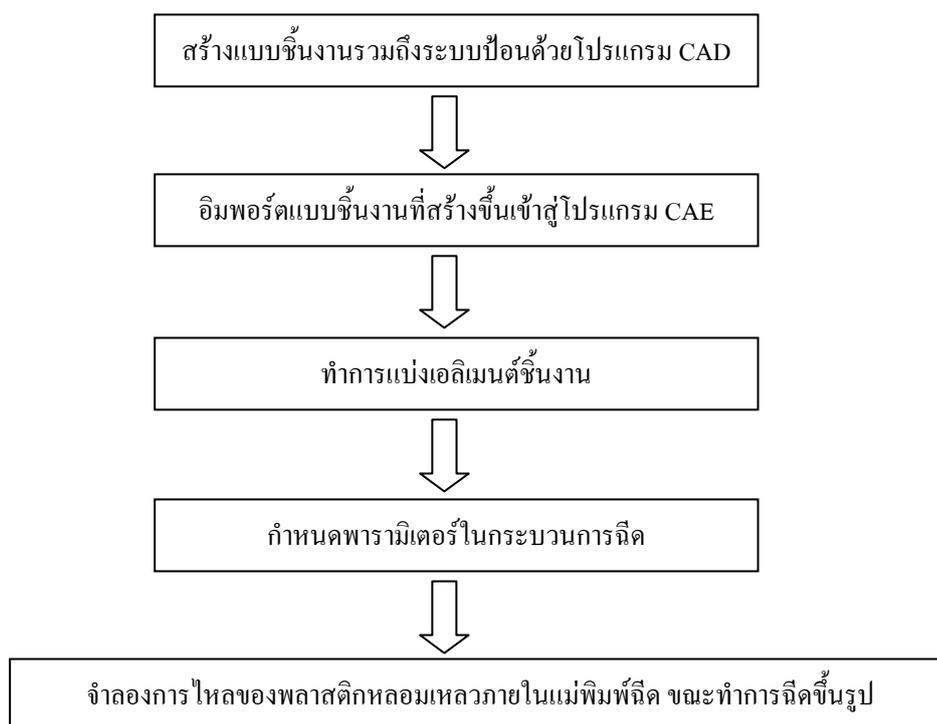
แรงปิดแม่พิมพ์ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 35.4 Ton ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากเครื่องฉีด ARBURG 320C 500-250 แล้วพบว่าสามารถใช้งานได้

### 3. การใช้เทคโนโลยี CAE ช่วยวิเคราะห์ในการออกแบบ

เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม CAE เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมได้อย่างกว้างขวาง ทั้งในด้านการพัฒนาและด้านการผลิต ในการออกแบบเราสามารถใช้นโยบาย CAE วิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกแบบไว้ เทคโนโลยีนี้ทำให้ผู้ออกแบบสามารถแก้ไขปัญหา และออกแบบผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม โดยไม่จำเป็นต้องสร้าง และทดสอบผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

เทคโนโลยี CAE สามารถจำลองการทำงานในกระบวนการการผลิต (Simulation) บนเครื่องคอมพิวเตอร์ ด้วยเทคนิคคอมพิวเตอร์กราฟิกทำให้มองเห็นการทำงานของกระบวนการผลิต ในการวิเคราะห์การไหลของพลาสติกหลอมเหลวในแม่พิมพ์คือ ทดลองคำนวณการฉีดพลาสติกหลอมเหลวให้เข้าเต็มควาดี การวิเคราะห์และศึกษาโดยการจำลองการฉีด สามารถทำให้เราทราบถึงปัญหาของการออกแบบแม่พิมพ์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป เช่น ความดันในการฉีดเต็มแบบ รอยเชื่อมประสานของผลิตภัณฑ์ และเวลาที่ใช้ในการฉีด ซึ่งปัญหาต่างๆ ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ และการออกแบบแม่พิมพ์สามารถดำเนินการแก้ไขไปได้พร้อมกัน

หลังจากทำการออกแบบแม่พิมพ์เสร็จแล้ว เทคโนโลยี CAE ได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์จำลองสถานะการไหลของพลาสติกหลอมเหลวในแม่พิมพ์เพื่อตรวจสอบหาปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการออกแบบแม่พิมพ์ที่ฉีดพลาสติกก่อนเริ่มทำการสร้างแม่พิมพ์จริง เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาที่ต้องเสียไปในการปรับแต่งแม่พิมพ์ ซึ่งขั้นตอนในการจำลองการไหลของพลาสติกหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์นี้ แสดงในภาพที่ 26



ภาพที่ 26 ขั้นตอนการจำลองการไหลของพลาสติกหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์นี้ ขณะทำการฉีดขึ้นรูป

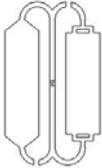
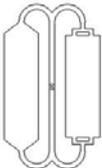
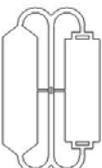
การแบ่งเอลิเมนต์แบบชิ้นงานเพื่อทำการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 27 ความละเอียดในการแบ่งเอลิเมนต์นั้นการแบ่งเอลิเมนต์ให้มีขนาดเล็ก ให้ผลการวิเคราะห์ที่ละเอียดกว่าการแบ่งเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่กว่า แต่การแบ่งเอลิเมนต์ที่ละเอียดมากทำให้ใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่มากขึ้นด้วย ในการวิเคราะห์นี้ใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาด 1 มิลลิเมตร



ภาพที่ 27 การแบ่งเอลิเมนต์แบบชิ้นงานเพื่อทำการวิเคราะห์

การจำลองการไหลของพลาสติกหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ฉีดเพื่อวิเคราะห์ถึงชิ้นงานที่ได้จากแม่พิมพ์ที่ออกแบบขึ้น โดยจำลองการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานภายใต้เงื่อนไขชิ้นงานต่างกัน 3 ลักษณะ และได้ผลของความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ฉีด จากโปรแกรมจำลองการไหลดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ฉีดภายใต้เงื่อนไขชิ้นงานที่ต่างกัน

เงื่อนไขในการฉีด	ความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ฉีด (MPa)
1 	28.35
2 	22.03
3 	21.11

จากผลการใช้โปรแกรมจำลองการไหลของพลาสติกหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ฉีด พบว่าแม่พิมพ์ที่ทำการออกแบบขึ้นมา สามารถฉีดขึ้นรูปชิ้นงานได้เต็มแบบทั้ง 3 ลักษณะ และเมื่อเปรียบเทียบ ความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ฉีด สังเกตได้ว่า ชิ้นงานในลักษณะที่ 1 มีค่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ฉีดสูงกว่าในลักษณะอื่น ซึ่งบอกได้ถึง การไหลของพลาสติกหลอมเหลวในชิ้นงานนี้ พลาสติกหลอมเหลวจะไหลเข้าเต็มควาวิตได้ยากที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานในลักษณะอื่น ซึ่งสอดคล้องกับการเลือกชิ้นงานในลักษณะที่ 1 นี้ในการออกแบบขนาดทางวิ่ง

เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่าแม่พิมพ์ที่ออกแบบไว้สามารถทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานได้โดยไม่มีข้อบกพร่องใดๆ จึงเริ่มดำเนินการจัดสร้างแม่พิมพ์ขึ้น โดยใช้เทคโนโลยี CAM ในการผลิตแม่พิมพ์ฉีด

#### 4. กระบวนการผลิตแม่พิมพ์

จากกระบวนการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์ สร้างแบบจำลองของแม่พิมพ์ออกมา จนถึงขั้นตอนในการผลิตแม่พิมพ์นี้ ในการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต สามารถสร้างทางเดินใบมีด (Tool path) เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ซึ่งมีความแม่นยำและรวดเร็วกว่ากระบวนการผลิตแบบปกติที่อาศัยประสบการณ์และความชำนาญของผู้ผลิต

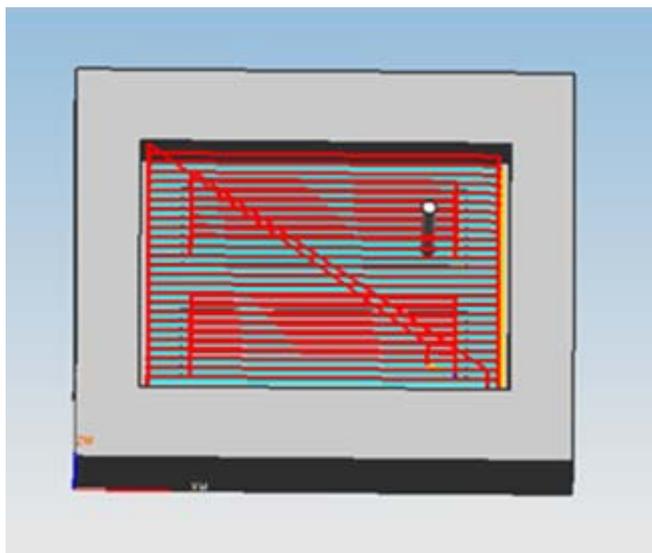
โดยการใช้ระบบควบคุมเครื่องจักร โดยใช้ระเบียบทางตัวเลขของคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control, CNC) ซึ่งสามารถจัดการและประมวลผลข้อมูลเพื่อควบคุมเครื่องจักรได้

กระบวนการป้อนข้อมูลเข้าไปในคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลระบบควบคุมเครื่องจักรมีการกำหนดรูปแบบคำสั่งที่เป็นมาตรฐานสากล โดยมีการสั่งงานเป็นบรรทัดหรือบล็อก ซึ่งแต่ละบล็อกก็จะมีคำสั่งย่อยลงไป โดยมาตรฐานคำสั่งของเยอรมัน (DIN 66025) ได้ให้ความหมายของตัวอักษร A-Z ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คำสั่งมาตรฐานของรหัสคำสั่งตามอักษร A-Z

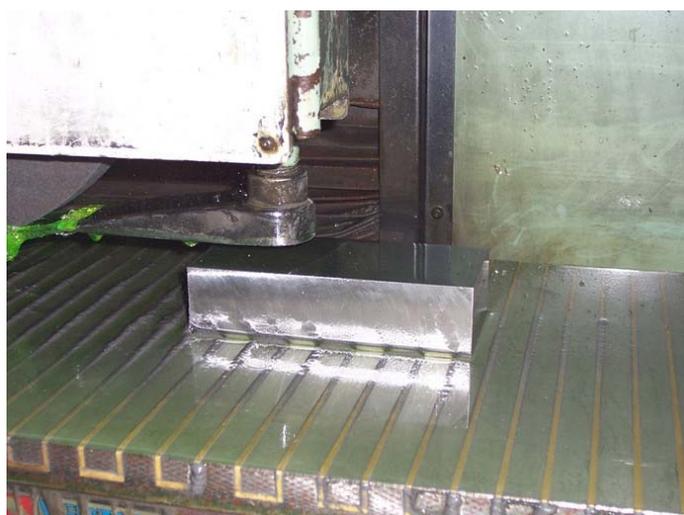
ตัวอักษร	ความหมาย	ตัวอักษร	ความหมาย
A	การหมุนรอบแกน X	N	หมายเลขบล็อก
B	การหมุนรอบแกน Y	O	ไม่ได้ใช้งาน
C	การหมุนรอบแกน Z	P	การเคลื่อนที่ขนานกับแกน X แนวที่ 3
D	การชดเชยขนาดเครื่องมือ	Q	การเคลื่อนที่ขนานกับแกน Y แนวที่ 3
E	อัตราป้อนรอง	R	การเคลื่อนที่ขนานกับแกน Z แนวที่ 3
F	อัตราป้อน	S	ความเร็วรอบของเพลางาน
G	คำสั่งการเคลื่อนที่	T	เครื่องมือ
H	ไม่ได้ใช้งาน	U	การเคลื่อนที่ขนานกับแกน X แนวที่ 2
I	พารามิเตอร์การแทนที่ในการ X	V	การเคลื่อนที่ขนานกับแกน Y แนวที่ 2
J	พารามิเตอร์การแทนที่ในการ Y	W	การเคลื่อนที่ขนานกับแกน Z แนวที่ 2
K	พารามิเตอร์การแทนที่ในการ Z	X	การเคลื่อนที่ในแนวแกน X
L	ไม่ได้ใช้งาน	Y	การเคลื่อนที่ในแนวแกน Y
M	การทำงานเสริม	Z	การเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ซึ่งแต่ละตัวอักษรมีคำสั่งย่อยลงไปอีกตามการใช้งาน ซึ่งคำสั่งสำคัญที่ใช้ควบคุมการตัดเฉือนของเครื่องจักรซีเอ็นซี คือ รหัสจี (G-code) นอกจากการสร้างและป้อนคำสั่งด้วยมือแล้ว การใช้โปรแกรมช่วยการผลิตต่างๆก็สามารถทำได้เช่นกัน ซึ่งช่วยลดระยะเวลาและความผิดพลาดในการผลิต โดยภาพที่ 28 แสดงตัวอย่างลักษณะทางเดินใบมีด



ภาพที่ 28 ทางเดินของใบมีดในการกัดชิ้นรูปชิ้นส่วนแม่พิมพ์

จากกระบวนการสร้างทางเดินใบมีด เมื่อได้ G-code แล้ว จึงเตรียมชิ้นงานที่มีขนาดตรงตามทีออกแบบไว้ ซึ่งโดยปกติจะต้องทำการเจียรในผิวของเหล็กที่นำมาใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ (Surface grinding) เนื่องจากขนาดเริ่มต้นอาจไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการ ดังแสดงในภาพที่ 29 โดยกระบวนการเจียรในผิว ใช้เครื่องเจียรใน (Precision surface grinding machines) ของ Okamoto รุ่น 63DX



ภาพที่ 29 กระบวนการเจียรในผิวเตรียมเหล็กชิ้นงานก่อนทำการผลิตแม่พิมพ์

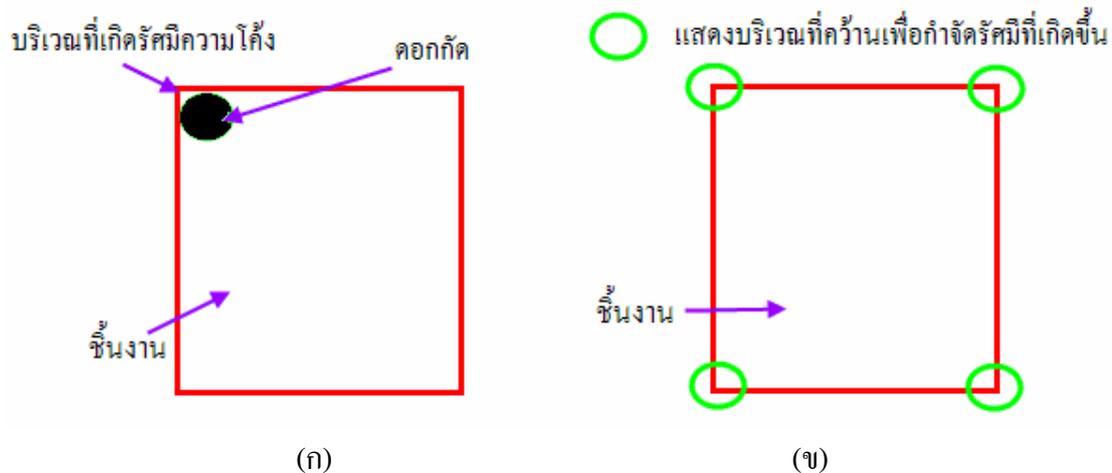
เมื่อได้ขนาดเริ่มต้นของเหล็กชิ้นงานที่ต้องการ จึงนำไปเข้ากระบวนการกัด (Milling process) ซึ่งสามารถใช้ G-code ที่สร้างขึ้น ป้อนเข้าสู่แผงควบคุมของเครื่องกัด เพื่อควบคุมทางเดินของใบมีด ในการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 30



ภาพที่ 30 กระบวนการกัดโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต

กระบวนการผลิตโดยการกัด จะเกิดรัศมีความโค้งขึ้นที่มุมต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 31 (ก) ซึ่งรัศมีความโค้งที่เกิดขึ้น สามารถลดขนาดของรัศมีได้โดยใช้ดอกกัดที่มีขนาดเล็กลง หรือ ใช้เครื่องกัดเซาะด้วยไฟฟ้า

อย่างไรก็ตามหากบริเวณที่เกิดรัศมีความโค้ง ไม่ได้มีความสำคัญ สามารถใช้กระบวนการคว้าน (Bore Process) ได้ดังแสดงในภาพที่ 31 (ข) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีดังกล่าวร่วมกับการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าเนื่องจากกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าใช้เวลานานและมีราคาสูง ใช้กับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง



ภาพที่ 31 การกัดชิ้นรูปที่มุมของชิ้นงาน

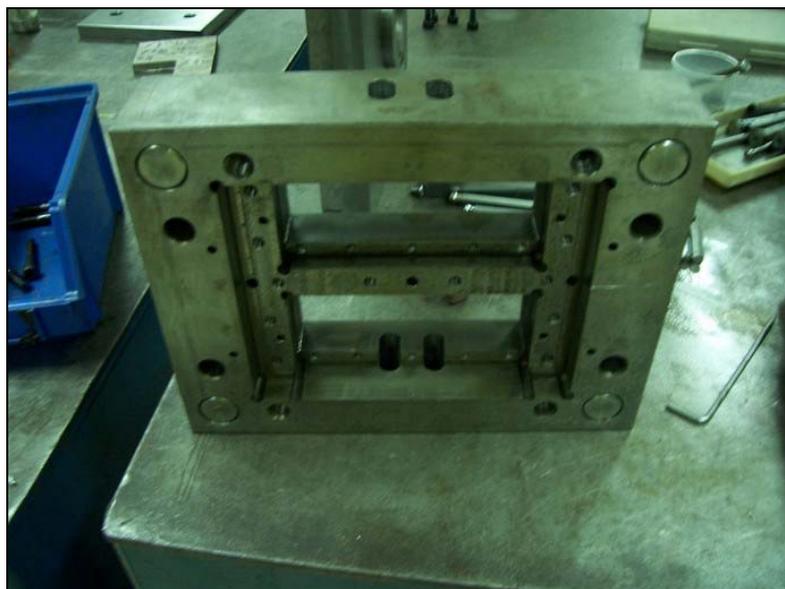
(ก) บริเวณมุมที่เกิดรัศมีความโค้งจากกระบวนการกัดชิ้นรูป

(ข) การกำจัดรัศมีความโค้งที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการคว้าน

กระบวนการคว้านหรือทำเกลียวในชิ้นส่วนของแม่พิมพ์ สามารถทำได้โดยการใช้เครื่องกัด ซึ่งสามารถทำการเปลี่ยนใบมีดตามลักษณะการใช้งานได้ ดังแสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 32 การคว้านรูโดยใช้เครื่องกัด

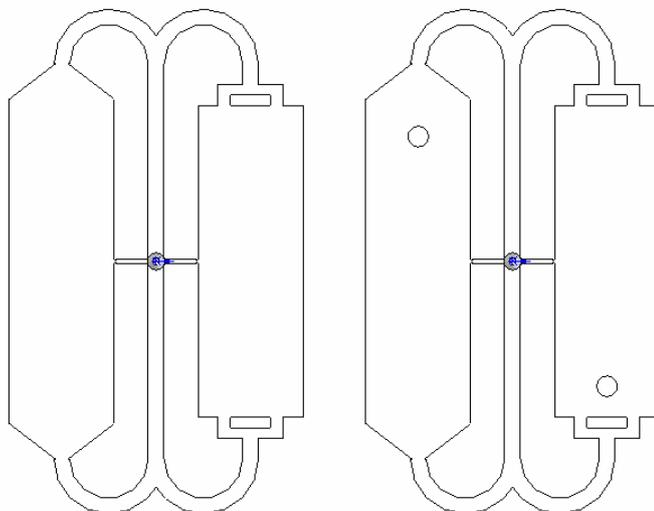


ภาพที่ 33 ส่วนของแม่พิมพ์เมื่อผ่านกระบวนการผลิต

แม่พิมพ์ส่วนคอร์ ที่ได้ทำการผลิตโดยใช้เทคโนโลยี CAM ดังแสดงในภาพที่ 33 ซึ่งส่วนประกอบอื่นๆของแม่พิมพ์ ยกตัวอย่าง เช่น ส่วนควิตี้ ชิ้นส่วนอินเลอร์ ได้ทำการผลิตโดยใช้หลักการเช่นเดียวกันกับ กระบวนการผลิตที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

## 5. การฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

เมื่อทำการสร้างแม่พิมพ์จนเสร็จสมบูรณ์ ขั้นตอนต่อไปคือ การฉีดขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบว่าแม่พิมพ์ที่ออกแบบไว้สามารถใช้ในการผลิตขึ้นรูปชิ้นงานได้จริง ชิ้นงานที่ทำการฉีดขึ้นรูปมี 2 ลักษณะดังแสดงในภาพที่ 34 เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของรอยประสานที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน กำหนดให้ชิ้นงานมีความหนาเท่ากับ 4 มิลลิเมตร และขนาดความหนาทางเข้าเท่ากับ 2 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปคือ พอลิโพรพิลีนและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปแสดงในตารางที่ 5



ภาพที่ 34 รูปร่างของชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ในการฉีดขึ้นรูป

แรงดันฉีด (bar)	1800
อุณหภูมิที่หัวฉีด (°C)	240
ความเร็วในการฉีด (ccm/s)	30
ปริมาตรการฉีด (ccm)	95

เนื่องจากชิ้นงานทั้งสองแบบมีขนาดและปริมาตรใกล้เคียงกันจึงใช้ค่าพารามิเตอร์ในการฉีดขึ้นรูปเหมือนกัน จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากฉีดขึ้นรูปจริงและผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมจำลองการไหล

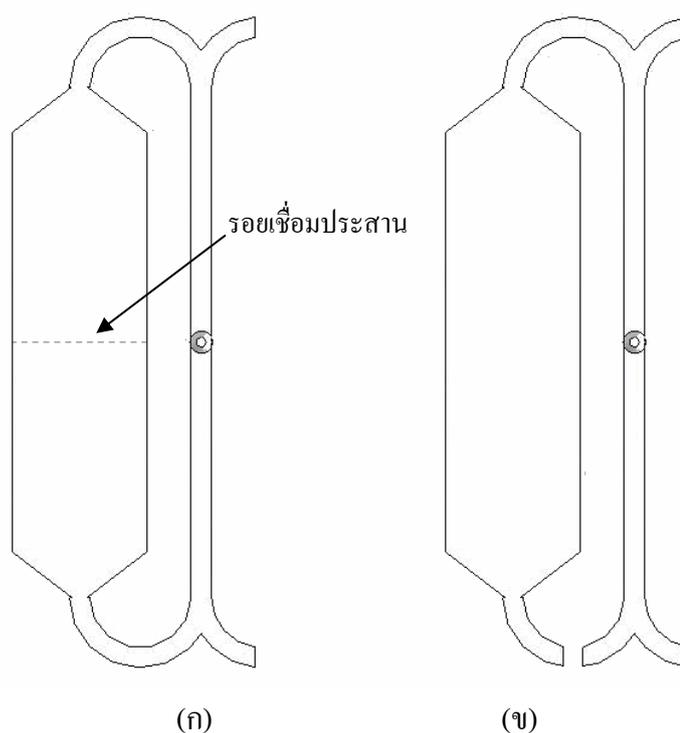
#### 6. การวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงาน

การวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงานที่ทำการฉีดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ฉีดที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้น ได้ทำการวิเคราะห์ใน 2 กรณี คือ คือ การวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน (Non-weldline) และการวิเคราะห์การ

จัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน (Weldline) โดยทำการเปรียบเทียบที่ตำแหน่งเดียวกันทั้ง 2 ชิ้นงาน

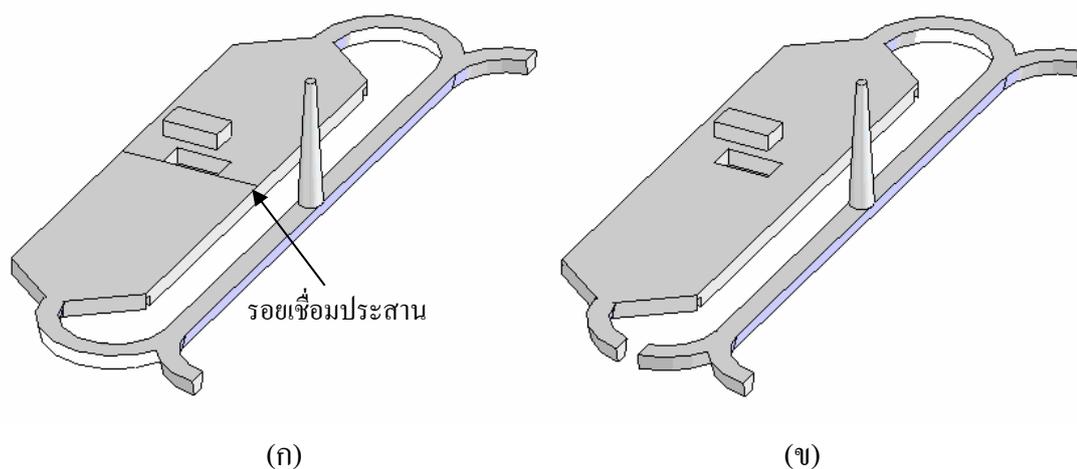
ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานเพื่อให้เกิดรอยเชื่อมประสานทำโดยเปิดวาล์วของช่องทางไหลด้านล่าง เพื่อให้พลาสติกหลอมเหลวสามารถไหลเข้าสู่ควิตี้ได้ทั้งทางเข้าด้านบนและด้านล่าง เมื่อพลาสติกหลอมเหลวไหลมาบรรจบกันทำให้เกิดรอยเชื่อมประสานขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 35 (ก) สำหรับการเตรียมชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสานทำได้โดยการปิดวาล์วของช่องทางไหลด้านล่าง เพื่อให้พลาสติกหลอมเหลวไหลเข้าสู่ควิตี้ทางด้านบนเพียงด้านเดียว ทำให้ไม่เกิดรอยประสานขึ้นบนชิ้นงาน ดังภาพที่ 35 (ข)

ชิ้นงานทั้งสองแบบทำการฉีดขึ้นรูปด้วยวัสดุ พอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้ว 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ขนาดความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ชนิดของทางเข้า กำหนดให้เป็นแบบพัดมีความหนาเท่ากับ 2 มิลลิเมตร



ภาพที่ 35 การปรับตำแหน่งวาล์วเพื่อฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน (ก) มีรอยเชื่อมประสานและ (ข) ไม่มีรอยเชื่อมประสาน

ทำการตัดชิ้นงานตามแนวขวางตรงบริเวณที่เกิดรอยเชื่อมประสานของชิ้นงานทั้งสองแบบ ดังภาพที่ 36 หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ตัดออกมาไปทำการหล่อด้วยเรซินเพื่อทำการขัดผิวชิ้นงานด้วย เครื่องขัดผิว (Polishing machine) และนำไปถ่ายภาพขยายโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) เพื่อทำการวัดและหาค่ามุมการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงาน

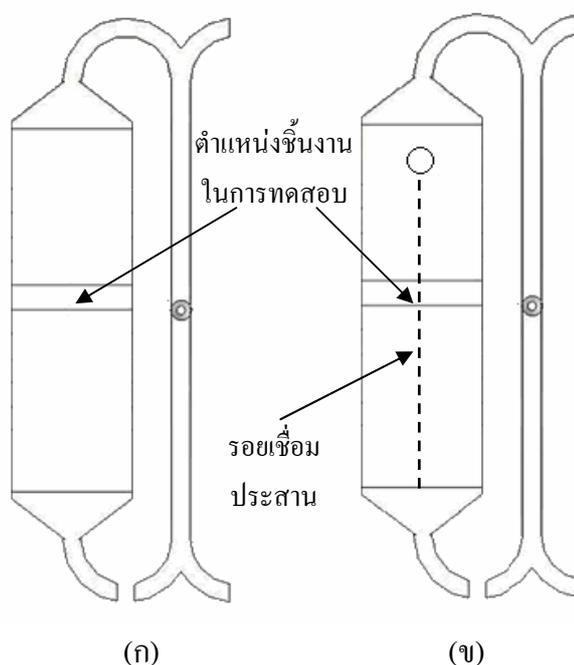


ภาพที่ 36 ตำแหน่งการตัดชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้ว (ก) มีรอยเชื่อมประสานและ (ข) ไม่มีรอยเชื่อมประสาน

## 7. การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ

### 7.1 การทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมี 2 ลักษณะดังแสดงในภาพที่ 37 โดยชิ้นงานที่มีรูเจาะจะทำให้เกิดรอยเชื่อมประสานขึ้นในแนวยาวนานกับทิศทางการไหลของพลาสติกหลอมเหลว วัสดุที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปได้แก่ พอลิโพรพิลีนผสมเส้นใยแก้ว 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และขนาดความหนาของชิ้นงานที่ทำการฉีดขึ้นรูปคือ 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับโดยชนิดของทางเข้ากำหนดให้เป็นแบบพัดมีความหนาเท่ากับ 2 มิลลิเมตร



ภาพที่ 37 ลักษณะชิ้นงานและตำแหน่งการตัดชิ้นงาน เพื่อทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก (ก) ไม่มีรอยเชื่อมประสานและ (ข) มีรอยเชื่อมประสาน

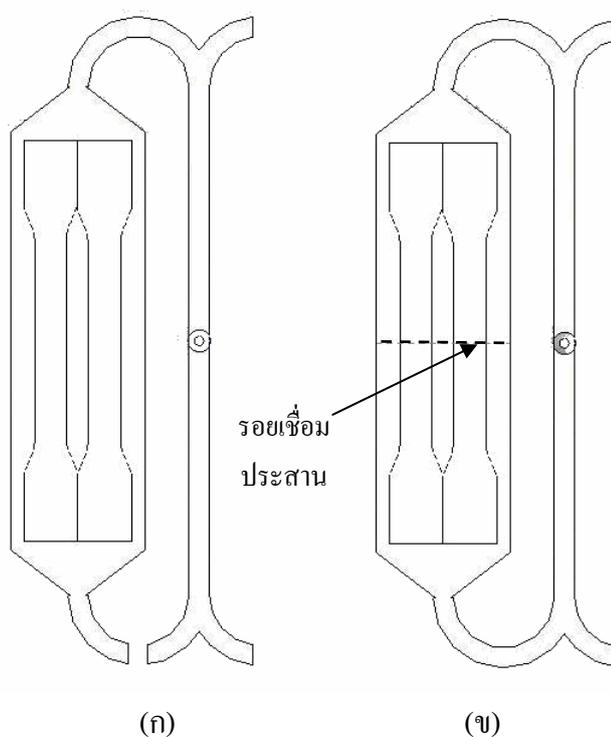
ชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปถูกนำมาตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าตรงบริเวณกลางชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูป เป็นชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบ IZOD ตามมาตรฐาน ASTM D256 ซึ่งทำให้รอยเชื่อมประสานอยู่บริเวณกลางของชิ้นงานทดสอบ การทดสอบใช้เครื่องทดสอบแรงกระแทกของ Gotech รุ่น GT-7045 ดังแสดงในภาพที่ 38 โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความหนาชิ้นงาน และตำแหน่งการเกิดรอยเชื่อมประสานที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก



ภาพที่ 38 เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบ IZOD

## 7.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบมี 2 ลักษณะเช่นเดียวกันคือ ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน บริเวณกลางของชิ้นงานตั้งฉากกับทิศทางการไหล และชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสานดังแสดงใน ภาพที่ 39 โดยวัสดุที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป ได้แก่ พอลิโพรพิลีนผสมเส้นใยแก้ว 30 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก และขนาดความหนาของชิ้นงานที่เลือกใช้คือ 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ ชนิดของ ทางเข้ากำหนดให้เป็นแบบพัคมีความหนาเท่ากับ 2 มิลลิเมตร



ภาพที่ 39 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (ก) ที่ไม่มีรอยเชื่อมประสานและ (ข) ที่มีรอยเชื่อมประสาน

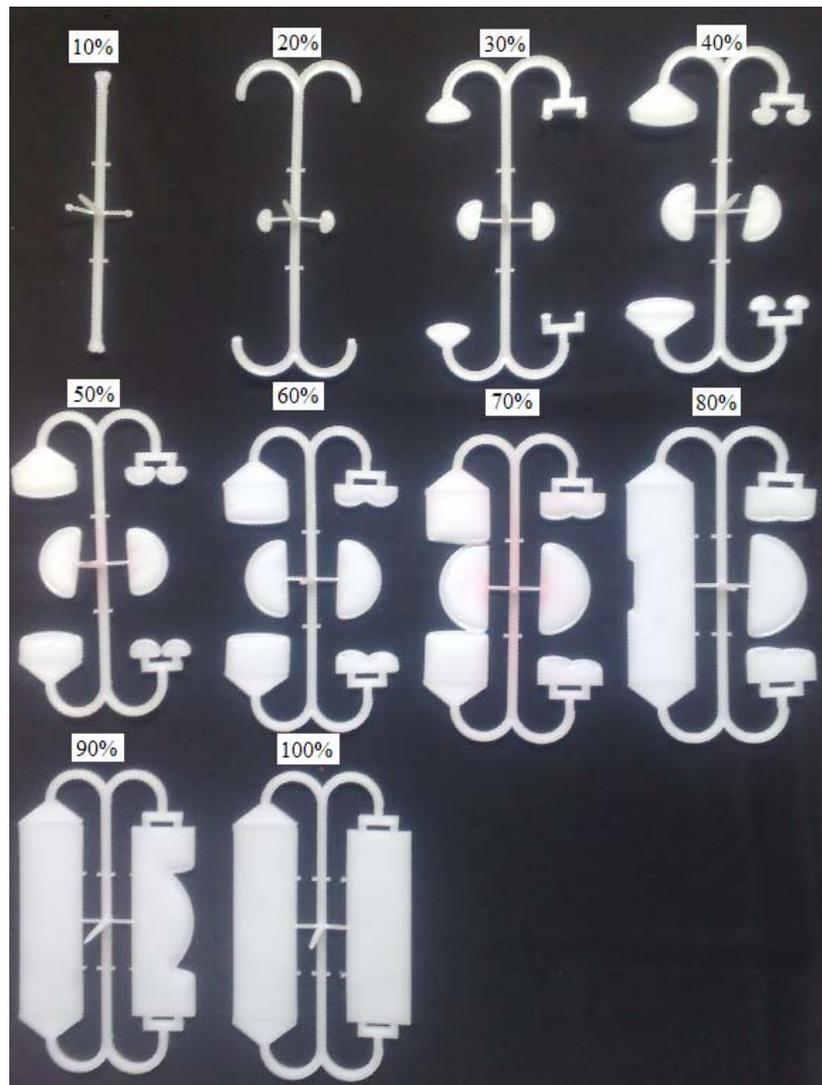
โดยชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปถูกนำมาตัดให้มีลักษณะเป็นแบบคัมเบลตาม แนวยาวดังแสดงในภาพที่ 39 ตามมาตรฐาน ASTM D638-98 ทำให้รอยเชื่อมประสานอยู่บริเวณ กลางของคัมเบลที่ตัดออกมา และทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ของ Hounsfield รุ่น H50KS ดังแสดงในภาพที่ 40 ที่ความเร็วในการดึง เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที



ภาพที่ 40 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

## ผลและวิจารณ์

### 1. การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมจำลองการไหลกับผลการทดลองฉีด

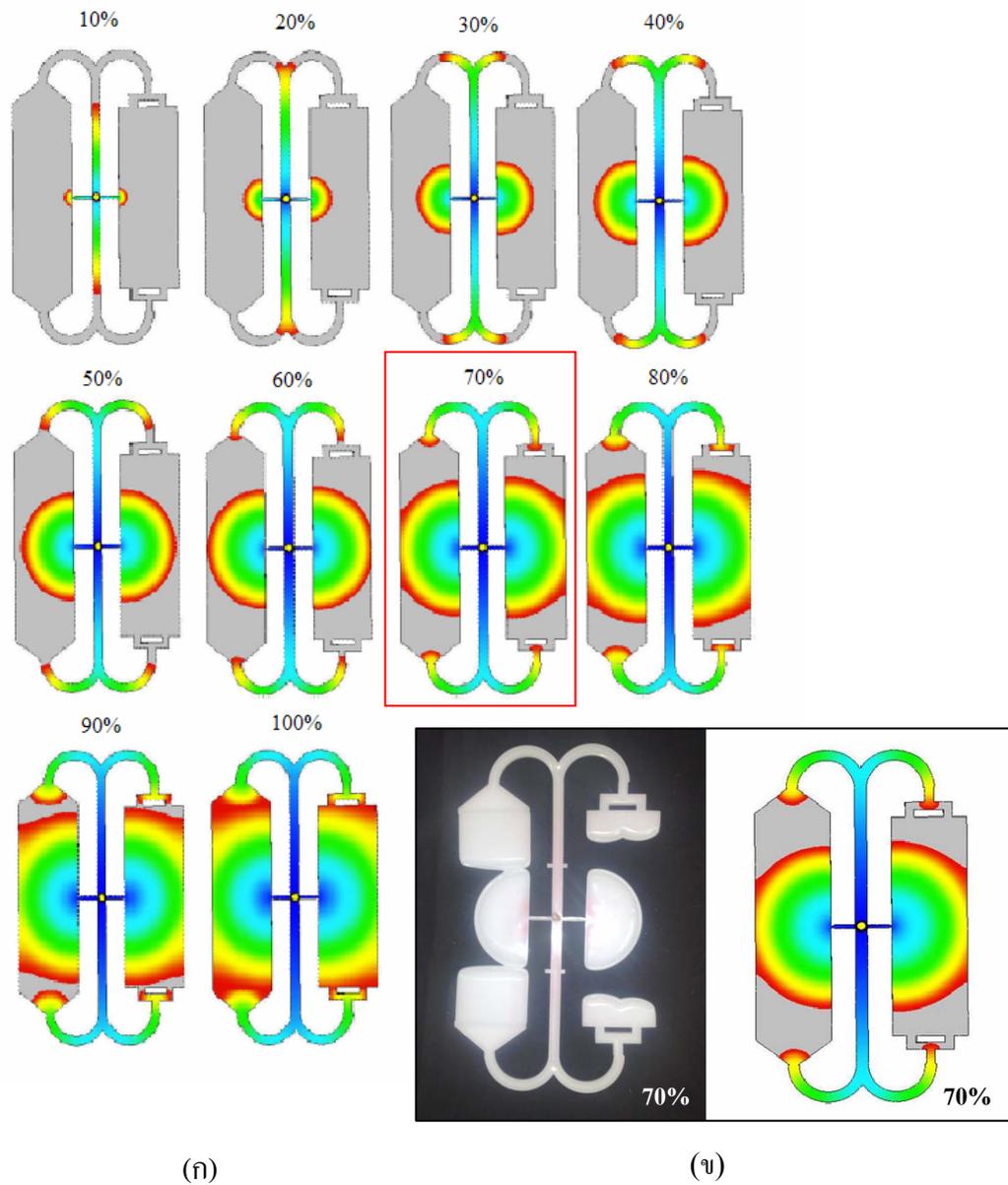


ภาพที่ 41 ผลการทดลองการฉีดที่ปริมาณแตกต่างกัน

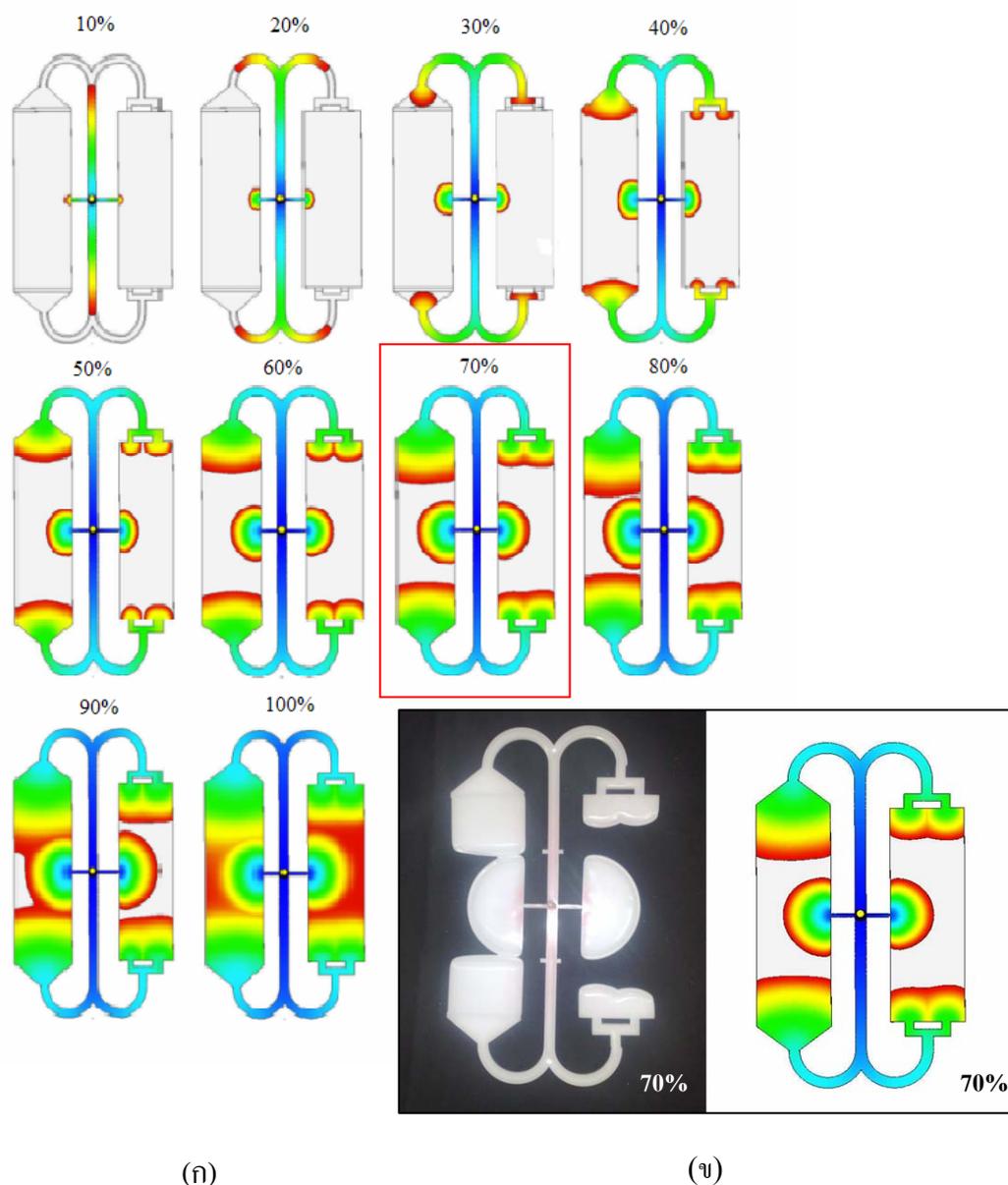
ภาพที่ 41 แสดงผลการทดลองการฉีดจากแม่พิมพ์ที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้น โดยได้ทำการฉีดที่ปริมาตรการฉีด (Injection volume) ต่างๆกัน หากพิจารณาผลการวิเคราะห์การไหลที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งได้จากโปรแกรมจำลองการไหล โดยได้ทำการวิเคราะห์รูปร่างการไหลแบบ 2 มิติ (2-D model) และ 3 มิติ (3-D model) ดังแสดงในภาพที่ 42 และ 43 ตามลำดับ พบว่าการวิเคราะห์รูปร่างการไหลแบบ 3 มิติ ให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลการทดลองฉีดจริง เมื่อ

เปรียบเทียบกับกรวิเคราะห์รูปร่างการไหลแบบ 2 มิติ ทั้งนี้เนื่องมาจากสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบการไหลแบบ 2 มิติ ที่ไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง ยกตัวอย่างเช่น

- สมมติฐานในเรื่องของรูปร่างชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Dimensional analysis) Kennedy (1995) กล่าวคือ ชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์ควรมีอัตราส่วนระหว่างความหนาต่อความยาวของชิ้นงานที่มีค่าน้อยมาก ( $H/L \ll 1$ ) หรือ ชิ้นงานมีความหนาของผนังที่บางมาก (Thin wall molding) เพื่อลดตัวแปรและเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังนั้นความผิดพลาดของการวิเคราะห์อาจเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความหนาเกิน 2 มิลลิเมตรขึ้นไป
- สมมติฐานในเรื่องของของไหลหรือพลาสติกหลอมเหลวที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Material assumptions) กล่าวคือ พลาสติกหลอมเหลวไม่สามารถอัดได้โดยความดัน (Incompressible melt) Kennedy (1995) อย่างไรก็ตามจากงานวิจัย Sombatsompop et al. (1997) พบว่าพลาสติกหลอมเหลวคือ ของไหลที่สามารถอัดได้โดยความดัน นอกจากนี้ค่าตัวแปรอื่นๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ ยกตัวอย่างเช่น ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity,  $K$ ) ของพลาสติกหลอมเหลวและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient,  $\alpha$ ) ระหว่างแม่พิมพ์กับพลาสติกหลอมเหลว เป็นต้น ซึ่งจากงานวิจัยของ Sombatsompop and Wood (1997) พบว่า ค่าการนำความร้อนของพลาสติกหลอมเหลวมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก เมื่ออุณหภูมิและความดันเปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งถูกกำหนดให้มีค่าสูงมาก ( $25,000 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ) ซึ่งหมายความว่า การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแม่พิมพ์และพลาสติกหลอมเหลวที่มีประสิทธิภาพสูงมาก อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของ Mennig et al. (2005) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแม่พิมพ์และพลาสติกหลอมเหลวในขณะที่ทำการฉีดขึ้นรูป พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการวิเคราะห์ ควรมีค่าประมาณ  $550 \text{ W/m}^2\text{-K}$  ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานและชนิดของพลาสติกที่ใช้ สาเหตุที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องมาจากการหดตัว (Shrinkage) ของชิ้นงานในขณะที่พลาสติกหลอมเหลวเกิดการเย็นตัวและแข็งตัวภายในแม่พิมพ์ ทำให้เกิดช่องว่างอากาศที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นงาน ซึ่งส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแม่พิมพ์และพลาสติกหลอมเหลว



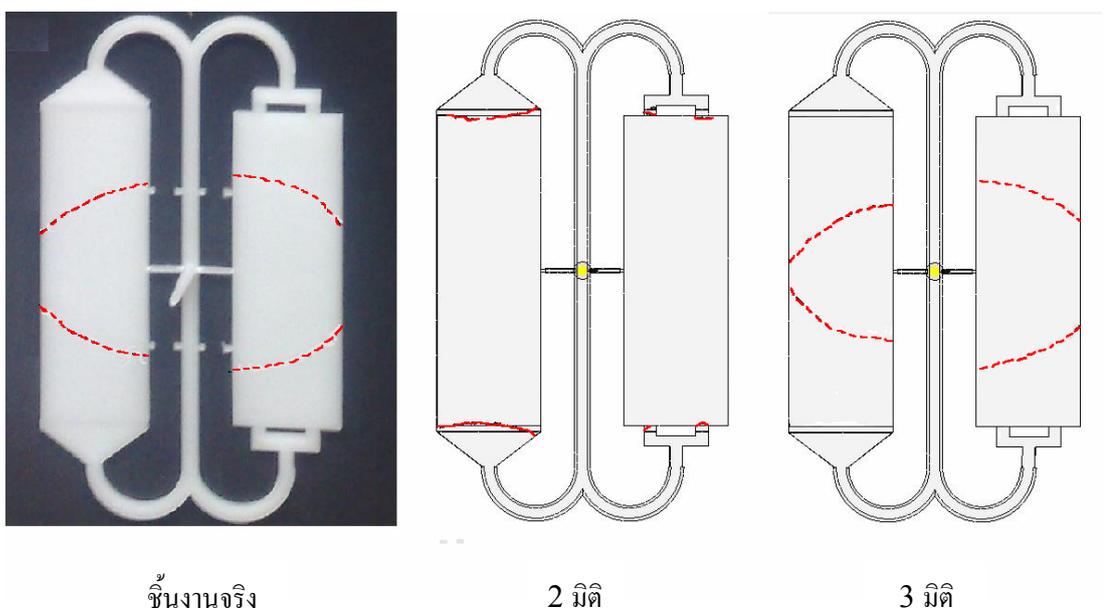
ภาพที่ 42 (ก) การวิเคราะห์รูปร่างการไหลแบบ 2 มิติ ที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ฉีดที่ปริมาตรการฉีดแตกต่างกัน (ข) ผลการเปรียบเทียบการฉีดจริงและการวิเคราะห์แบบ 2 มิติที่ปริมาตรการฉีดเท่ากับ 70%



ภาพที่ 43 (ก) การวิเคราะห์รูปร่างการไหลแบบ 3 มิติ ที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ฉีดที่ปริมาตรการฉีดแตกต่างกัน (ข) ผลการเปรียบเทียบการฉีดจริงและการวิเคราะห์แบบ 3 มิติที่ปริมาตรการฉีดเท่ากับ 70%

ภาพที่ 44 แสดงตำแหน่งการเกิดรอยเชื่อมประสานภายในชิ้นงานที่เกิดขึ้นจริง เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์รูปร่างการไหลแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ จากผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการวิเคราะห์รูปร่างการไหลแบบ 3 มิติ ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำและเชื่อถือได้ อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์รูปร่างการไหลแบบ 3 มิติ อาจใช้เวลาใน

การวิเคราะห์มากกว่าแบบ 2 มิติ (โดยปกติใช้เวลาในการวิเคราะห์มากกว่าแบบ 2 มิติ ถึง 6 เท่า) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ขนาดของชิ้นงาน (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความหนาของชิ้นงาน) ตลอดจน ประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ เป็นต้น



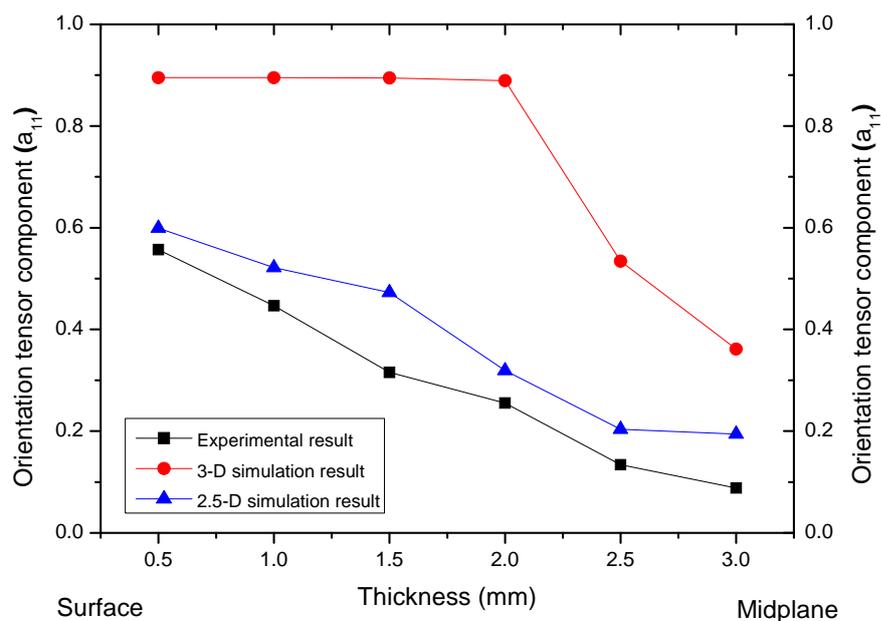
ภาพที่ 44 การเปรียบเทียบตำแหน่งของรอยเชื่อมประสานที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานที่ทดลองฉีดจริง กับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมจำลองการไหลแบบ 2 และ 3 มิติ

## 2. การวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงาน

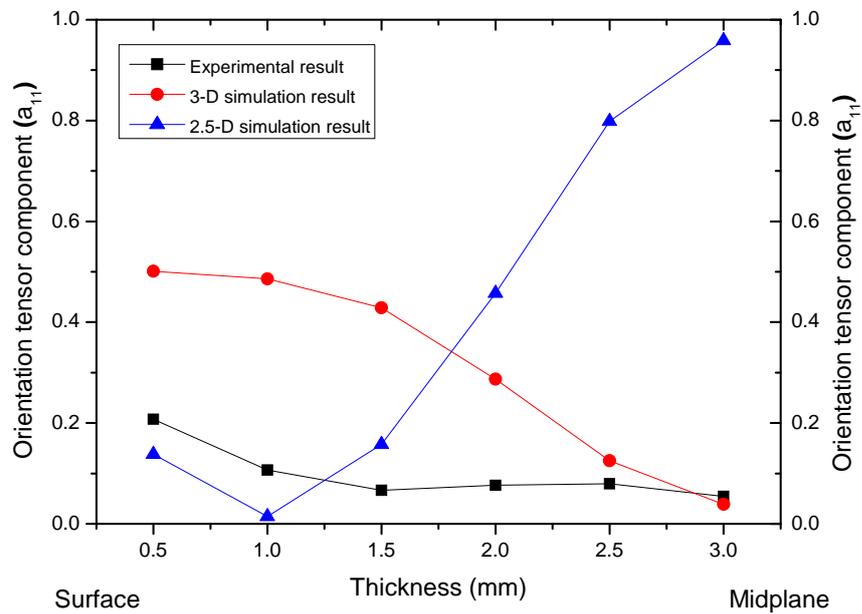
แม่พิมพ์ฉีดที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้นนี้ ได้ถูกนำมาใช้ในการฉีดชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต (พอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วแบบสั้น 30% โดยน้ำหนัก) เพื่อศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงานที่มีต่อสมบัติเชิงกลได้แก่ สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก โดยทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะแสดงดังภาพที่ 34

ผลการเปรียบเทียบที่ได้จากการตรวจวัดการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงานและผลที่ได้จากการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วแบบ 2.5 และ 3 มิติ แสดงในภาพที่ 45 และ 46 ซึ่งแสดงถึงค่าการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วในทิศทางการไหล (Orientation tensor component,  $a_{11}$ ) ตลอดความหนาของชิ้นงานที่ไม่มีและมียอยเชื่อมประสาน จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบ

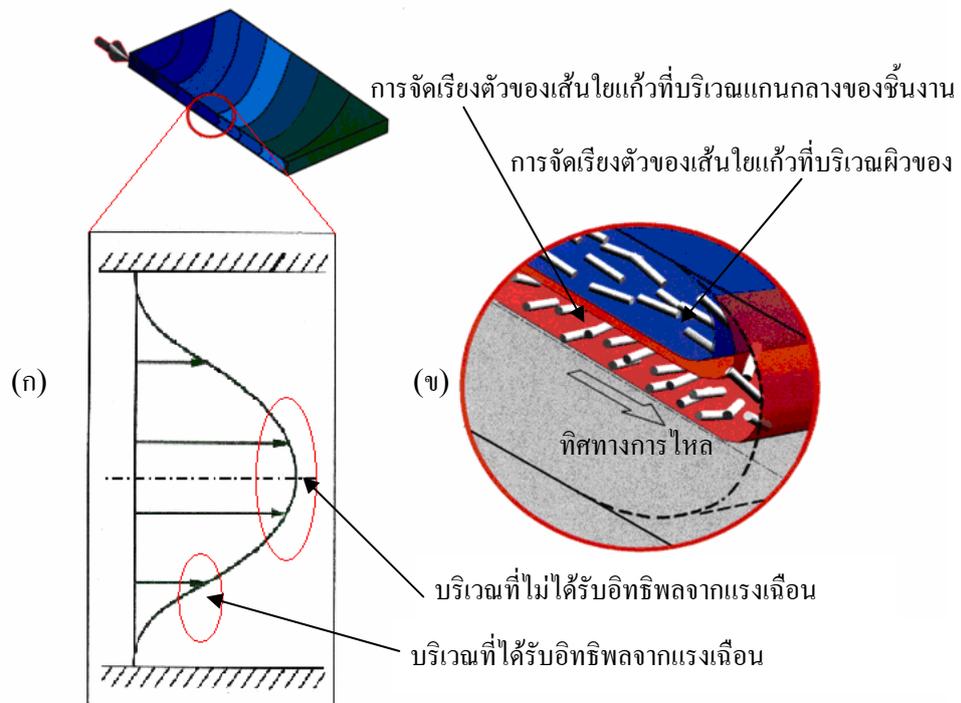
พบว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมจำลองการไหลแบบ 2.5 และ 3 มิติ มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการตรวจวัดที่ได้ในกรณีของชิ้นงานไม่มีรอยเชื่อมประสาน (ดังแสดงในภาพที่ 45) กล่าวคือ การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วที่บริเวณผิวของชิ้นงาน (Skin layer) มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวไปในทิศทางการไหล (Flow direction) ในขณะที่บริเวณแกนกลาง (Core layer) มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล ทั้งนี้เนื่องจาก รูปร่างการไหลที่บริเวณด้านหน้าของพลาสติกไหลอมเหลว (Flow front) ที่มีลักษณะแบบพาราโบลา (Parabolic flow) ดังแสดงในภาพที่ 47 (ก) ซึ่งที่บริเวณใกล้ผนังของแม่พิมพ์ พลาสติกไหลอมเหลวได้รับอิทธิพลของแรงเฉือน (Shear force) สูงสุดทำให้เส้นใยแก้วเกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางการไหล โดยอิทธิพลจากแรงเฉือนจะมีค่าลดลงเมื่อเข้าสู่บริเวณแกนกลางของชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงานที่มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 47 (ข)



ภาพที่ 45 การเปรียบเทียบการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน ระหว่างการตรวจวัดจริงและผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมจำลองการไหลแบบ 3 มิติ

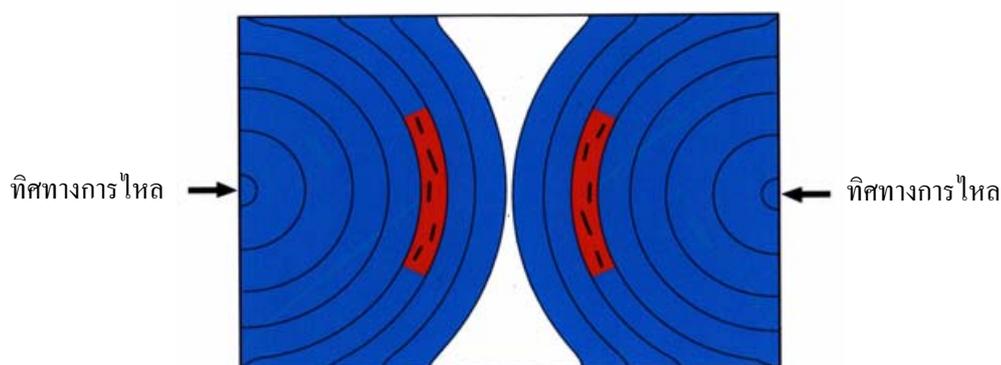


ภาพที่ 46 การเปรียบเทียบการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน ระหว่างการตรวจวัดจริงและผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมจำลองการไหลแบบ 3 มิติ



ภาพที่ 47 (ก) รูปร่างการไหลที่บริเวณด้านหน้าของพลาสติกหลอมเหลวที่มีลักษณะแบบ พาราโบลา (ข) การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในพลาสติกหลอมเหลวขณะไหล

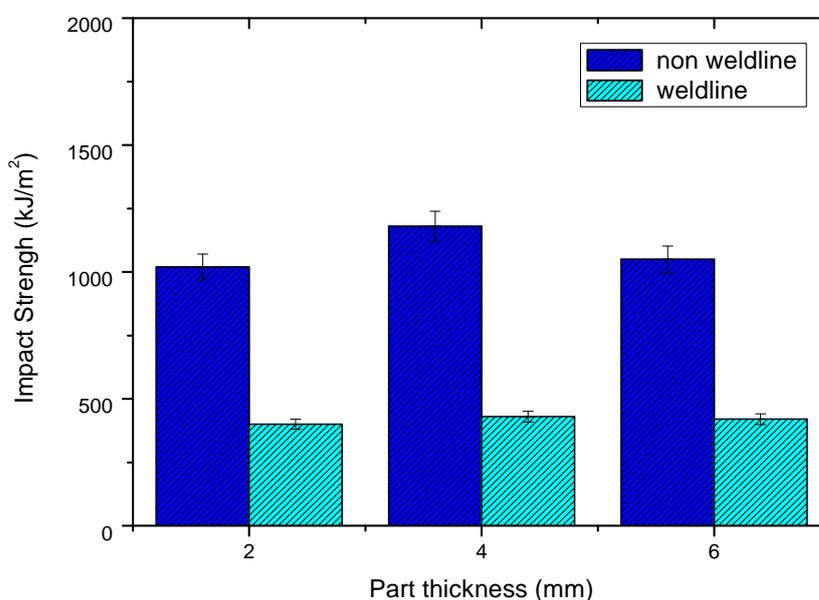
หากพิจารณาผลการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการตรวจวัดและผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมจำลองการไหลแบบ 2.5 และ 3 มิติ ในกรณีที่ยังงานมีรอยเชื่อมประสานดังแสดงในภาพที่ 46 พบว่าการวิเคราะห์โดยโปรแกรมจำลองการไหลแบบ 2.5 มิติ ให้ผลที่ไม่สอดคล้องกับผลการตรวจวัด กล่าวคือ ผลการวิเคราะห์แสดงค่าการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วบริเวณแกนกลางที่สูงกว่าความเป็นจริง ในขณะที่ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ 3 มิติให้ผลที่สอดคล้องกับการตรวจวัด โดยการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วที่บริเวณรอยเชื่อมประสานมีแนวโน้มตั้งฉากกับทิศทางการไหล ทั้งนี้เนื่องจาก ในขณะที่พลาสติกหลอมเหลวไหลมาบรรจบกัน ณ ตำแหน่งที่เกิดรอยเชื่อมประสาน การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วที่บริเวณด้านหน้าของพลาสติกหลอมเหลวยังคงอยู่ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหล ดังแสดงในภาพที่ 48 อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วที่ได้จากโปรแกรมจำลองการไหล แบบ 3 มิติ ยังคงมีค่าที่แตกต่างจากการตรวจวัด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในพลาสติกหลอมเหลวขณะไหลภายในแม่พิมพ์ฉีด ยกตัวอย่างเช่น การกำหนดให้ความยาวของเส้นใยแก้วมีค่าคงที่ตลอดการไหลภายในแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง กล่าวคือ การแตกหักหรือการลดลงของความยาวเส้นใยแก้วเกิดขึ้นอย่างมากในระหว่างกระบวนการฉีดขึ้นรูป Patcharaphun et al. (2007) โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายในแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งจากการวิเคราะห์สมบัติการไหลของพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วที่มีความยาวแตกต่างกัน แกน (2551) แสดงให้เห็นว่าค่าความหนืดของพอลิโพรพิลีนที่ผสมใยแก้วแบบสั้นมีค่าน้อยกว่าพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วแบบยาว ในขณะที่สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลได้กำหนดให้ความหนืดของพลาสติกหลอมเหลวมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราเฉือน (Shear rate) เท่านั้น โดยมิได้คำนึงถึงการลดลงของความยาวเส้นใยแก้วที่อาจส่งผลต่อความหนืดของพลาสติกหลอมเหลว



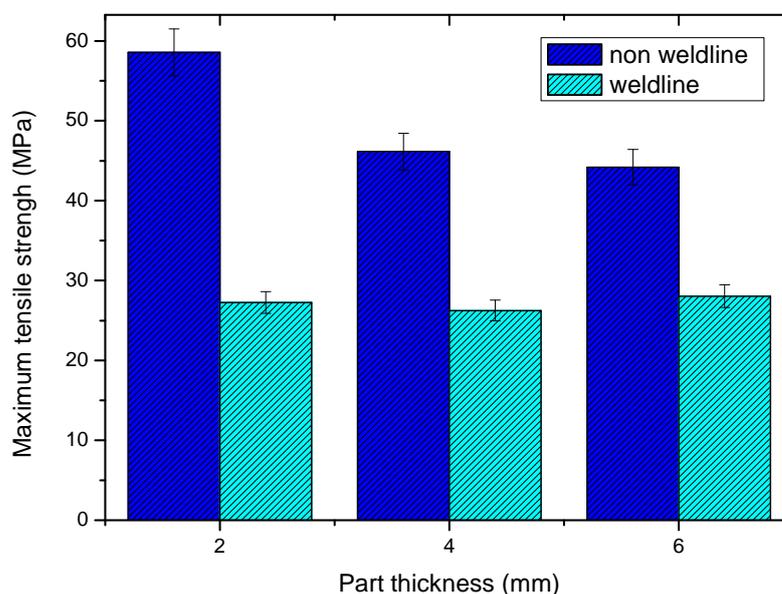
ภาพที่ 48 การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วที่บริเวณด้านหน้าของพลาสติกหลอมเหลวยังคงอยู่ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหล

### 3. อิทธิพลของการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติเชิงกล

ภาพที่ 49 และ 50 แสดงค่าการต้านทานต่อแรงกระแทกและแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่มีและไม่มีรอยเชื่อมประสาน โดยได้ทำการทดสอบชิ้นงานที่มีความหนา 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากผลการทดสอบ พบว่าค่าการต้านทานต่อแรงกระแทกและค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงาน ที่มีรอยเชื่อมประสาน มีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลหรือทิศทางที่ได้รับแรงตรงบริเวณรอยเชื่อมประสานและโพรงอากาศ (Voids) ที่เกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 51 ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของเส้นใยและพื้นที่ในการรับแรงของชิ้นงานลดลง

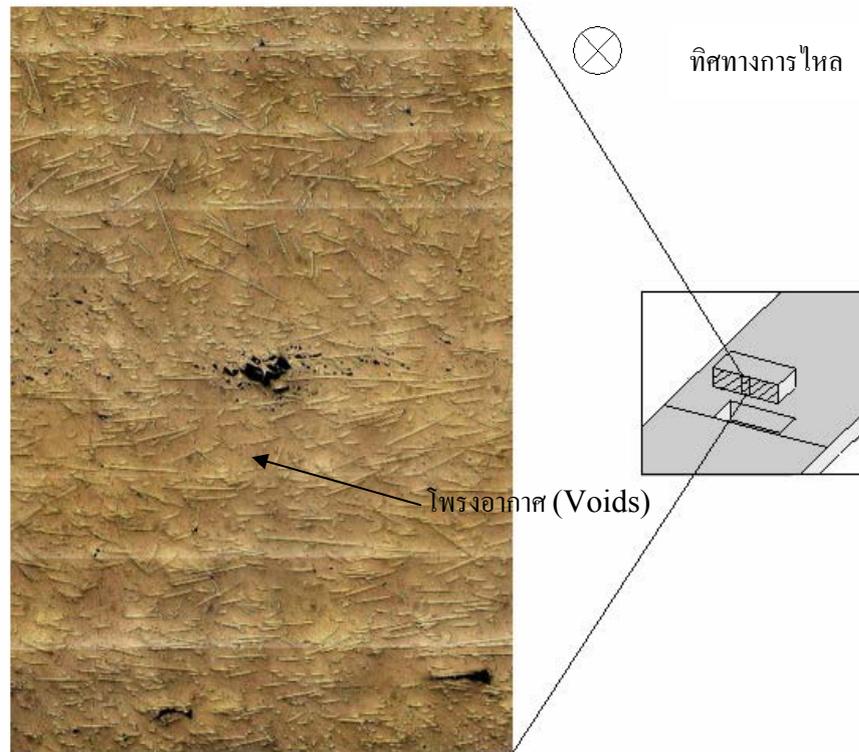


ภาพที่ 49 ค่าการต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบที่มีและไม่มีรอยเชื่อมประสานของชิ้นงานที่มีความหนา 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร

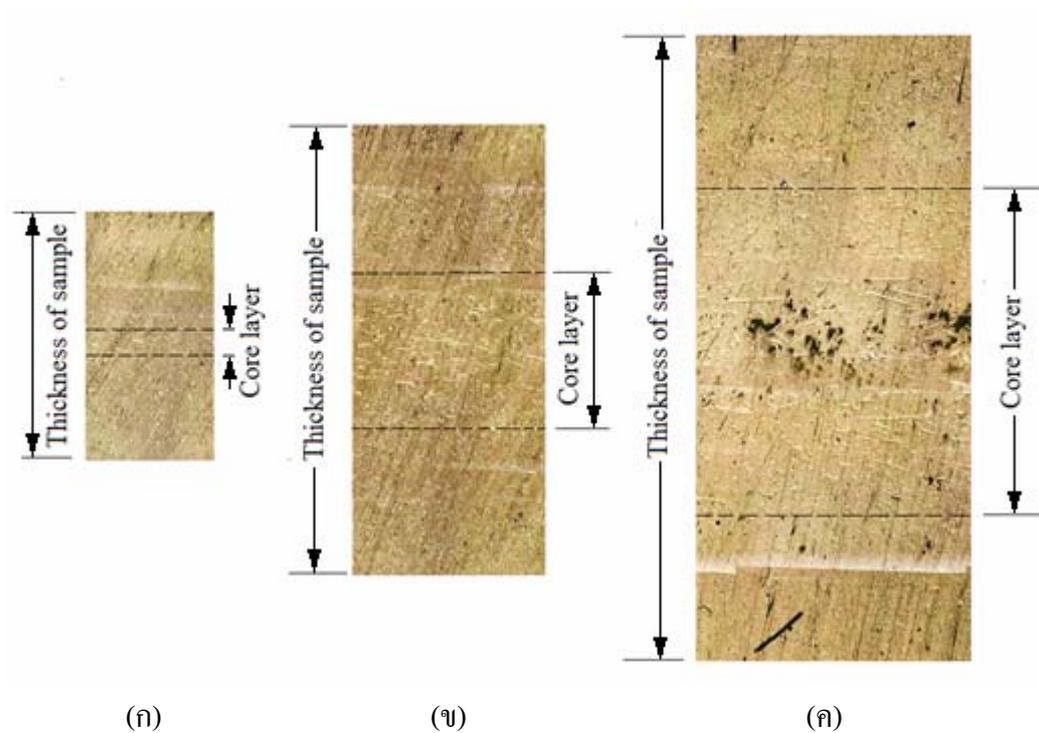


**ภาพที่ 50** ค่าการต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบที่มีและไม่มีรอยเชื่อมประสานของชิ้นงานที่มีความหนา 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความหนาชิ้นงานที่มีต่อสมบัติการต้านทานแรงกระแทกและสมบัติการต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน (ดังแสดงในภาพที่ 49 และ 50) พบว่าความหนาของชิ้นงานไม่มีอิทธิพลต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาอิทธิพลของความหนาที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงพบว่า ชิ้นงานที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ให้ค่าการต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดที่มากที่สุด ในขณะที่ชิ้นงานที่มีความหนา 6 มิลลิเมตร ให้ค่าการต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดที่น้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราส่วนของชั้นแกนกลาง (Core layer) ต่อความหนาทั้งหมดของชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 52 ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงในทิศทางการรับแรงของเส้นใยแก้วมีแนวโน้มที่ลดลง

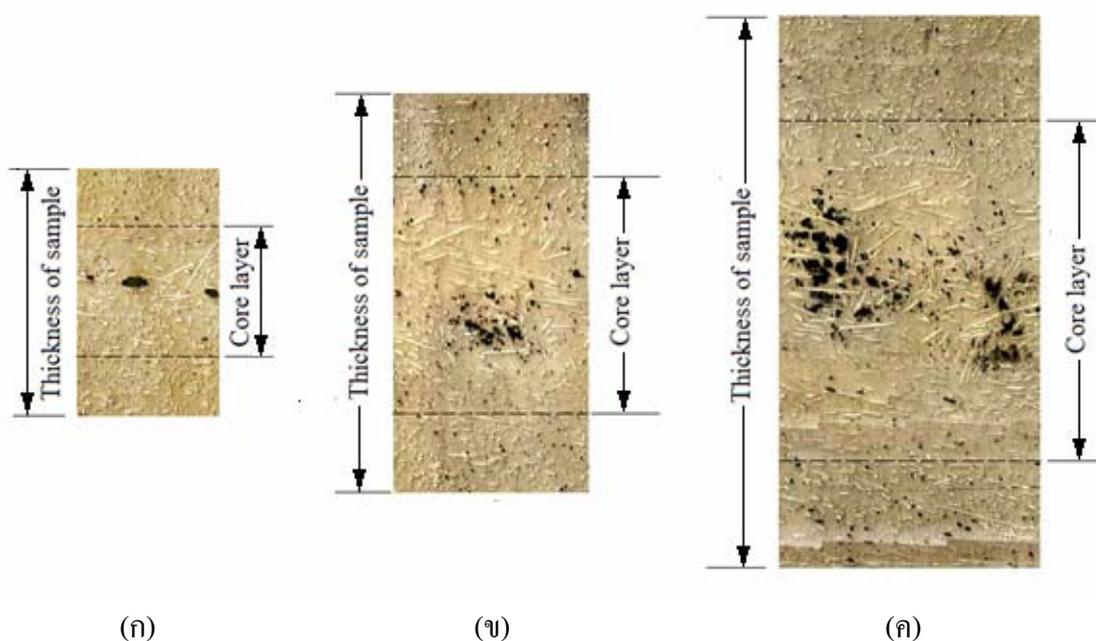


ภาพที่ 51 การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วที่ตำแหน่งรอยเชื่อมประสาน



ภาพที่ 52 อัตราส่วนของชั้นแกนกลางต่อความหนาทั้งหมดของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน ที่ขนาดความหนาชิ้นงานต่างๆกัน (ก) 2 มิลลิเมตร (ข) 4 มิลลิเมตร (ค) 6 มิลลิเมตร

นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าความหนาไม่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน กล่าวคือ สมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกและสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อความหนาของชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้หากพิจารณาภาคตัดขวาง ณ ตำแหน่งรอยเชื่อมประสานของชิ้นงานทดสอบที่ความหนา 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 53 พบว่าอัตราส่วนความหนาของชั้นแกนกลางต่อความหนาของชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ค่าการต้านทานต่อแรงกระแทกและแรงดึงมีค่าไม่แตกต่างกัน



ภาพที่ 53 อัตราส่วนของชั้นแกนกลางต่อความหนาทั้งหมดของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน ที่ขนาดความหนาชิ้นงานต่างๆกัน (ก) 2 มิลลิเมตร (ข) 4 มิลลิเมตร (ค) 6 มิลลิเมตร

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาลักษณะของการออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีดโดยใช้เทคโนโลยี CAD CAE และ CAM มาประยุกต์ใช้ร่วมกับทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเพื่อผลิตชิ้นงานทดสอบรูปแบบต่างๆ รวมทั้งได้ทำการศึกษาอิทธิพลของลักษณะคาวิตี ตลอดจนลักษณะและตำแหน่งของทางเข้าที่มีต่อการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมจำลองการไหลแบบ 2 และ 3 มิติกับผลการทดลองฉีดจริง พบว่าผลการวิเคราะห์แบบ 3 มิติให้ผลที่สอดคล้องกับการฉีดขึ้นงานจริงเมื่อเทียบกับแบบ 2 มิติ ทั้งนี้เนื่องมาจากสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ ยกตัวอย่างเช่น พลาสติกหลอมเหลวไม่สามารถอัดได้โดยความดัน ค่าการนำความร้อน และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างแม่พิมพ์กับพลาสติกหลอมเหลว เป็นต้น
2. ผลการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วที่ได้จากโปรแกรมจำลองการไหล ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการตรวจวัดการจัดเรียงตัวของ เส้นใยแก้วภายในชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วที่ได้จากโปรแกรมจำลองการไหลยังคงมีค่าที่แตกต่างจากการตรวจวัด ทั้งนี้เนื่องจาก สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วซึ่งไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง
3. ลักษณะและตำแหน่งทางเข้ามีอิทธิพลต่อการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้ว ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน กล่าวคือ ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสานอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะและตำแหน่งทางเข้า ให้สมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกและสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงที่ลดลงอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน
4. การศึกษาอิทธิพลของลักษณะคาวิตี พบว่าความหนาของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน ไม่มีผลต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก ในขณะที่ความหนามีอิทธิพลต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงดึง กล่าวคือ สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาของ

ชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะควาวิตี ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนของชั้นแกนกลางต่อความหนาทั้งหมดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงมีแนวโน้มลดลง

5. อิทธิพลของความหนาของชิ้นงานไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน กล่าวคือ สมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกและแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสานมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความหนาเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก อัตราส่วนความหนาของชั้นแกนกลางต่อความหนาทั้งหมดมีค่าไม่แตกต่างกัน

#### ข้อเสนอแนะ

จากแม่พิมพ์ที่ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างชิ้นนี้สามารถนำไปใช้ทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะแตกต่างจากผลการทดลองที่ได้กล่าวไว้ ยกตัวอย่างเช่น การฉีดขึ้นงานที่มีความหนาแตกต่างกันภายในควาวิตีเดียวกัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของความหนาที่มีต่อการกระจายตัวของเส้นใยแก้ว (Fiber distribution) ภายในชิ้นงานรวมถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโปรแกรมจำลองการไหลแบบ 2 และ 3 มิติที่ความหนาของชิ้นงานแตกต่างกัน นอกจากนี้แม่พิมพ์ที่ได้รับการออกแบบและจัดสร้างชิ้นนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการเกิดรอยเชื่อมประสานที่มีต่อสมบัติเชิงกลที่ได้ เป็นต้น

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- แกน โอภาสกรกุล. 2551. อิทธิพลของปริมาณและความยาวของเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติการไหล และสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จินตมัย สุวรรณประทีป. 2547. การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก. ครั้งที่ 1. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี, กรุงเทพฯ.
- ชาติ ตระการกุล. 2539. การออกแบบแม่พิมพ์ฉีด 1. ครั้งที่ 6. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี, กรุงเทพฯ.
- ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. 2548. พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวและการนำไปใช้งาน. ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- บรรเลง ศรีนิล. 2548. เทคโนโลยีพลาสติก. ครั้งที่ 18. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี, กรุงเทพฯ.
- สุรศิษฐ์ โรจนนันต์. 2537. การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกคุณภาพสูง โดยใช้ CAD/CAE/CAM. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมพร ชันติโก. 2537. การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและขึ้นรูปแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก. วิทยานิพนธ์วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- อรรถพล สุชีวุฒติ. 2545. การประยุกต์ใช้ CAD/CAE/CAM ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดฝ้ายเกลือพลาสติกและการปรับตั้งพารามิเตอร์เครื่องฉีดพลาสติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Advani, S. G. and C. L. Tucker. 1987. The Use of tensors to describe and predict fiber orientation in short fiber composites. **Journal of Rheology**. 1987 (8): 751–784.

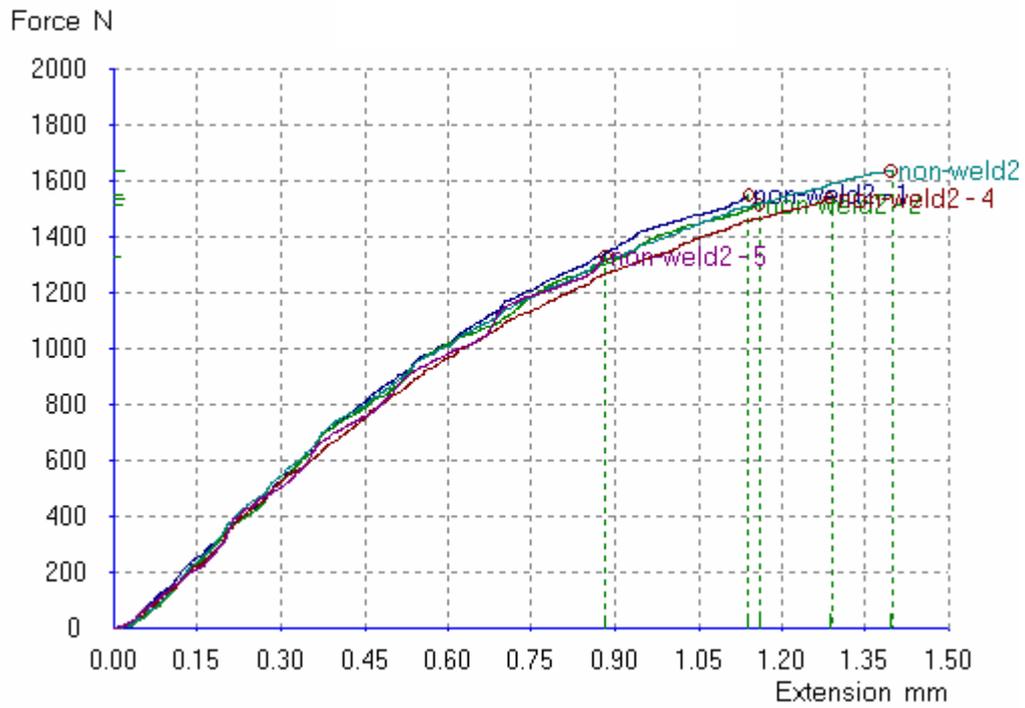
- Aisa, J., C. Javierre and J.A. De la Serna. 2006. An example of simulation tools use for large injection moulds design: The CONTENURTM 2400 l solid waste container. **Journal of Materials Processing Technology** 2006 (175): 15–19.
- Chun, D. H. 1999. Cavity filling analyses of injection molding simulation bubble and weld line formation. **Journal of Materials Processing Technology** 1999 (80-90): 177-181.
- Jang, B. Z. 1994. **Advanced Polymer Composites: Principles and Applications**. 1st ed. CRC Press, New York.
- Kaw, A. K. 2006. **Mechanics of composite materials**. 2nd ed. CRC Press, New York.
- Kennedy, P. 1995. **Flow Analysis of Injection Molds**. 1st ed. Carl Hanser Verlag, New York.
- Kim, E. G., J. K. Park and S. H. Jo. 2001. A Study on fiber orientation during the injection molding of fiber orientation polymeric composites. **Journal of Materials Processing Technology** 2001 (111): 225-232.
- Kim, H.S., J.S. Son and Y.T. Im. 2003. Gate location design in injection molding of an automobile junction box with integral hinges. **Journal of Materials Processing Technology** 2003 (140): 110–115.
- Mennig , G., K.L. Witz and D. Lehman. 2005. Chemische Oberthechenmodifizierung beim Spritzgiessen und dessen Wechselwirkung mit dem Verarbeitungsverhalten, DFG-Abschlussbericht. **Technische Univeritaet Chemnitz**. 2005.
- Ozdemir, A., O. Uluer and A. Guldaz. 2004. Flow front advancement of molten thermoplastic materials during filling stage of a mold cavity. **Polymer Testing** 2004 (23): 957–966.

- Patcharaphun, S. and G. Mennig. 2005. Three-Dimensional simulation and experimental investigations of fiber orientation in sandwich injection molded parts. **Journal of Research in Engineering and Technology**. 2005. 2(2): 124-138.
- Patcharaphun, S. and G. Mennig. 2007. Prediction of tensile strength for sandwich injection molded short-glass-fiber reinforced thermoplastics. **Journal of Metals, Materials and Minerals** 2007 (17): 9-16.
- Patcharaphun, S., G. Opaskornkul, A. Kanitchaidecha and A. Wongto. 2007. Characterization of fiber length distribution in short and long-glass-fiber reinforced composites during injection molding process, *In Kasetsart University Annual Conference 46. ed.* Bangkok.
- Sanouf, M., B. Chung and C. Cohen. 1985. Glass Fiber-Filled Thermoplastics. II. Cavity filling and fiber orientation in injection molding. **Polymer Engineering and Science**. 1985. 25(16).
- Sombatsompop, N. And A.K. Wood. 1997. Measurement of thermal conductivity of polymer using an improved Lee's disc apparatus. **Polymer Testing**. 1997. 16(3): 203-223.
- Sombatsompop, N., K. Liolios, M.H. M. Jamel and A.K. Wood. 1997. Technique for pressure-density-temperature measurements in polymer melts. **Polymer and Polymer Composites**. 1997. 5(4): 259-264.
- Swanson, S. R. 1997. **Introduction to Design and Analysis With Advanced Composite Materials**. 1st ed. Prentice Hall College Div, New Jersey.
- Tang, S.H., S.H. Tang, S.M. Sapuan, R. Samin and S. Sulaiman. 2006. Design and thermal analysis of plastic injection mould. **Journal of Materials Processing Technology** 2006 (171): 259-267.

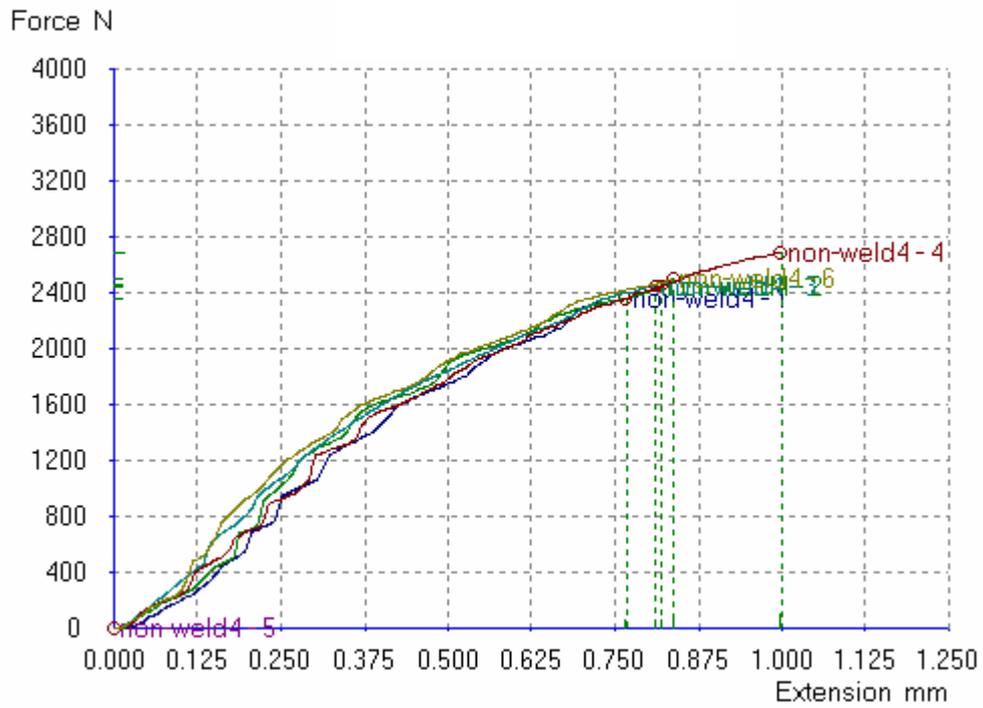
**ภาคผนวก**

### ภาคผนวก ก

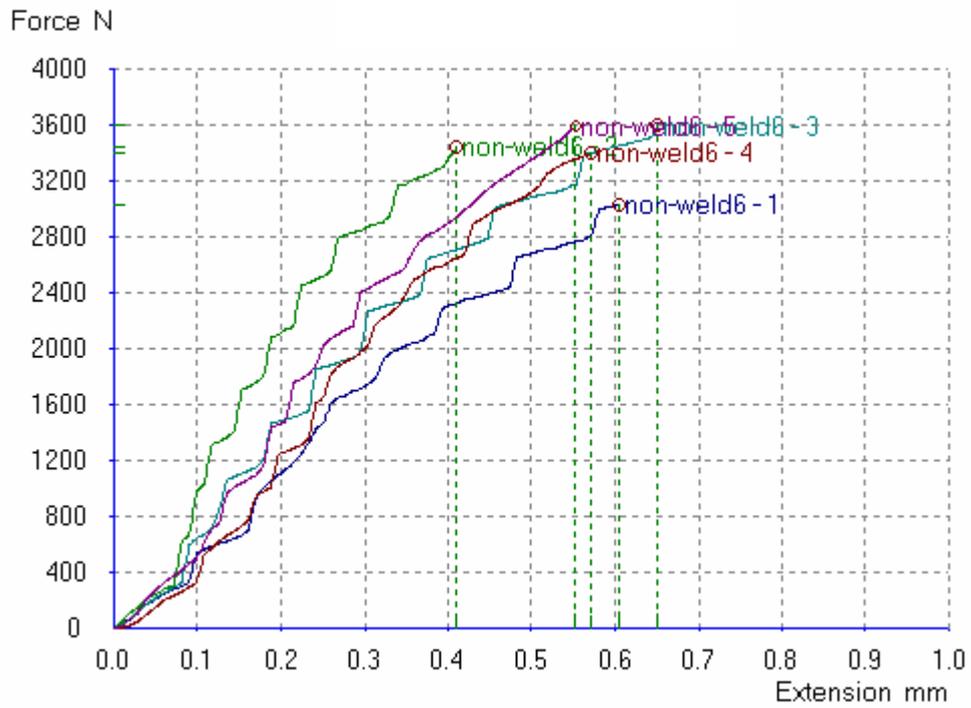
ผลการวิเคราะห์สัมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงาน



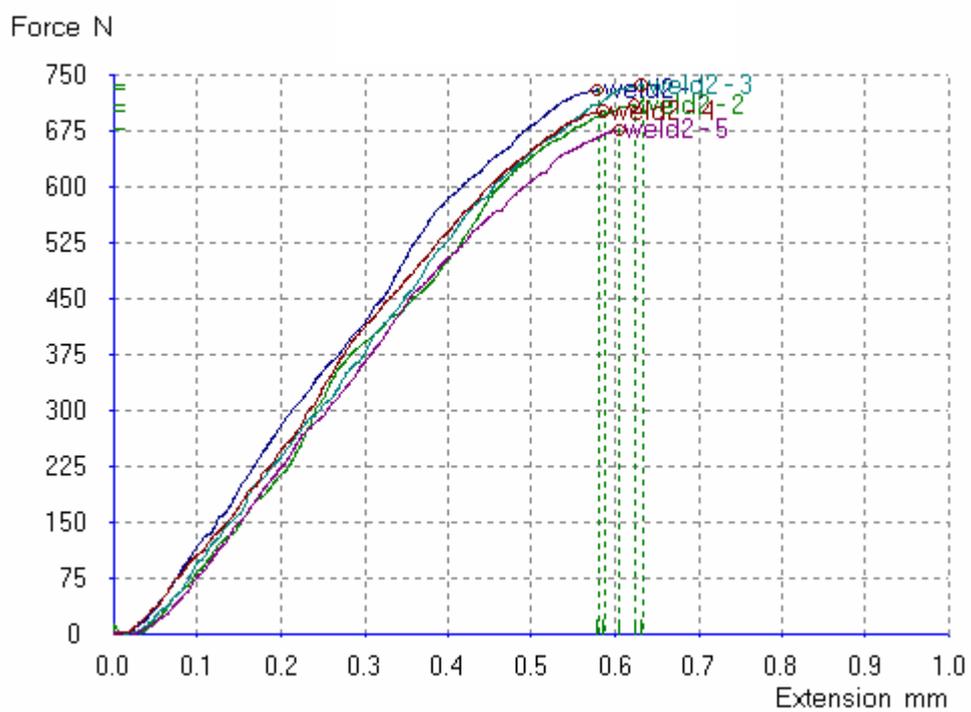
ภาพผนวกที่ ก1 ผลการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน  
ชิ้นงานหนา 2 มิลลิเมตร



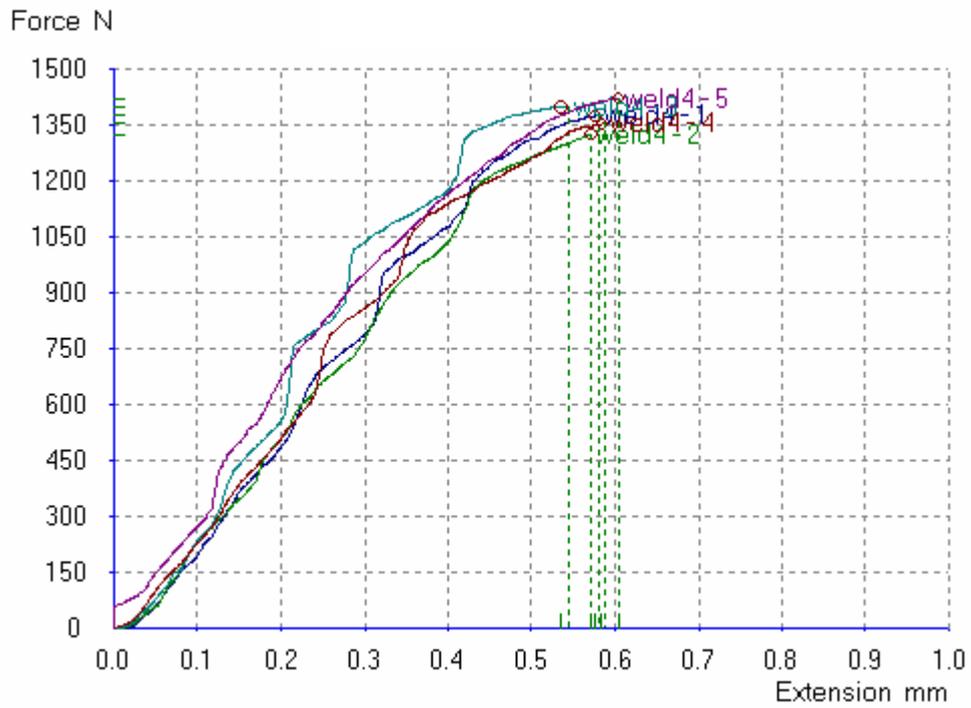
ภาพผนวกที่ ก2 ผลการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน  
ชิ้นงานหนา 4 มิลลิเมตร



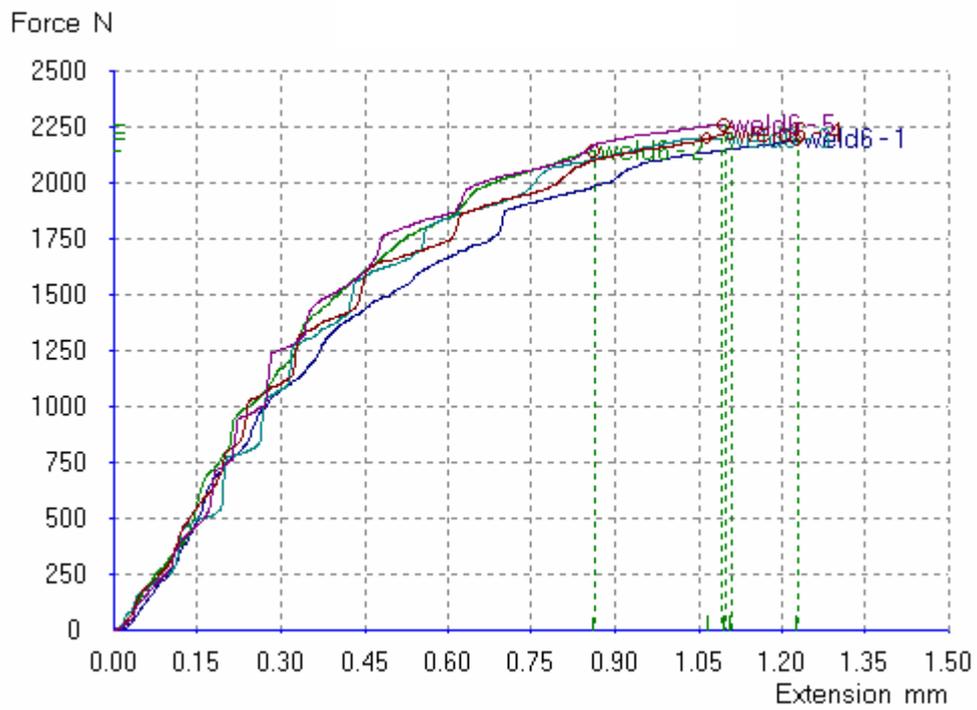
ภาพผนวกที่ ก3 ผลการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน  
ชิ้นงานหนา 6 มิลลิเมตร



ภาพผนวกที่ ก4 ผลการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน  
ชิ้นงานหนา 2 มิลลิเมตร



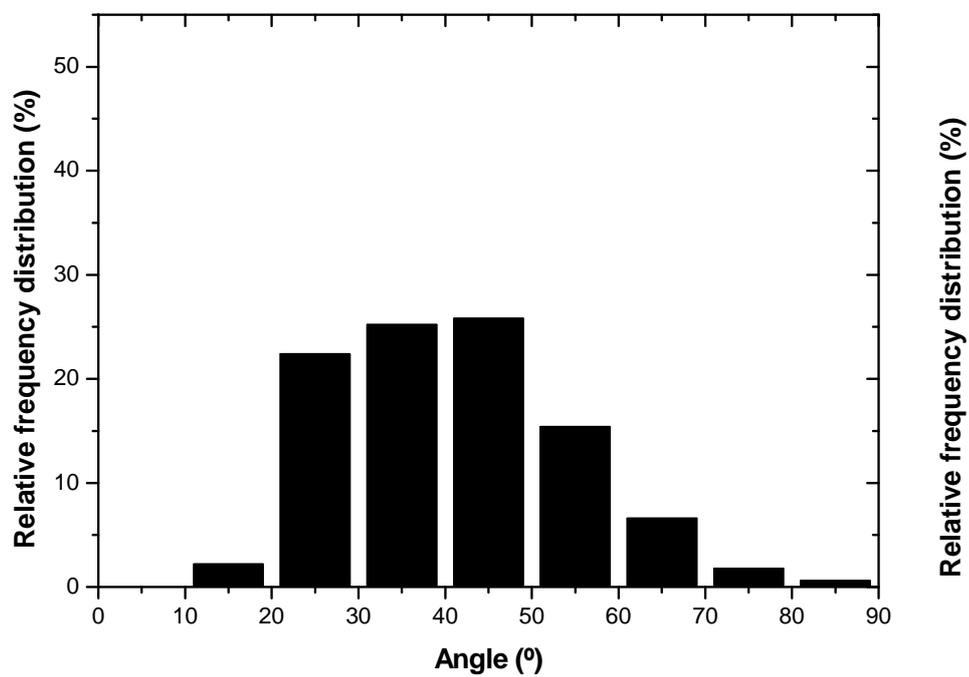
ภาพผนวกที่ ก5 ผลการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน  
ชิ้นงาน หน้า 4 มิลลิเมตร



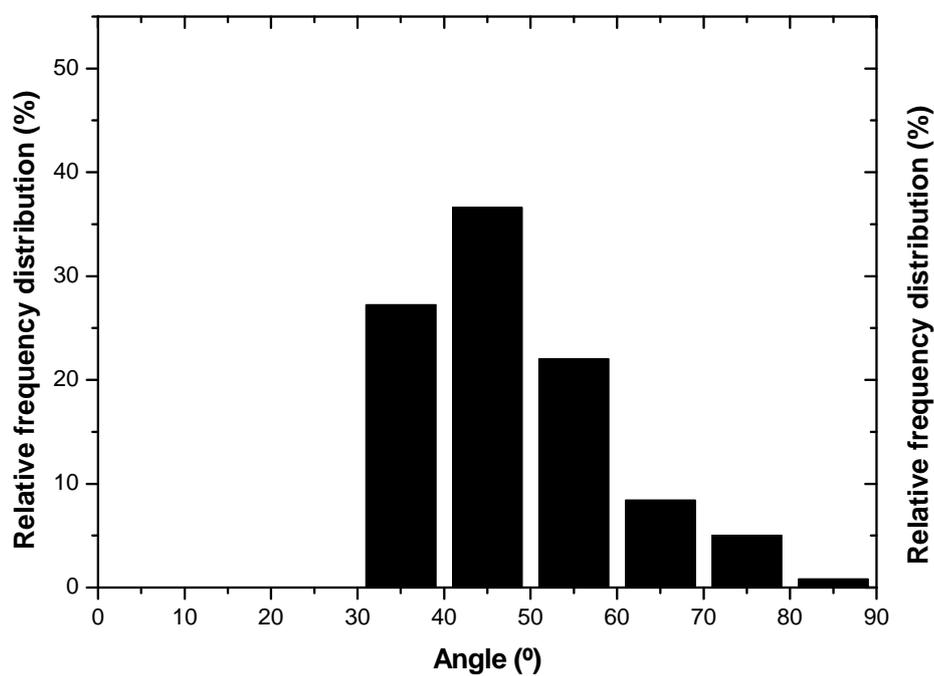
ภาพผนวกที่ 6 ผลการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน  
ชิ้นงานหนา 6 มิลลิเมตร

### ภาคผนวก ข

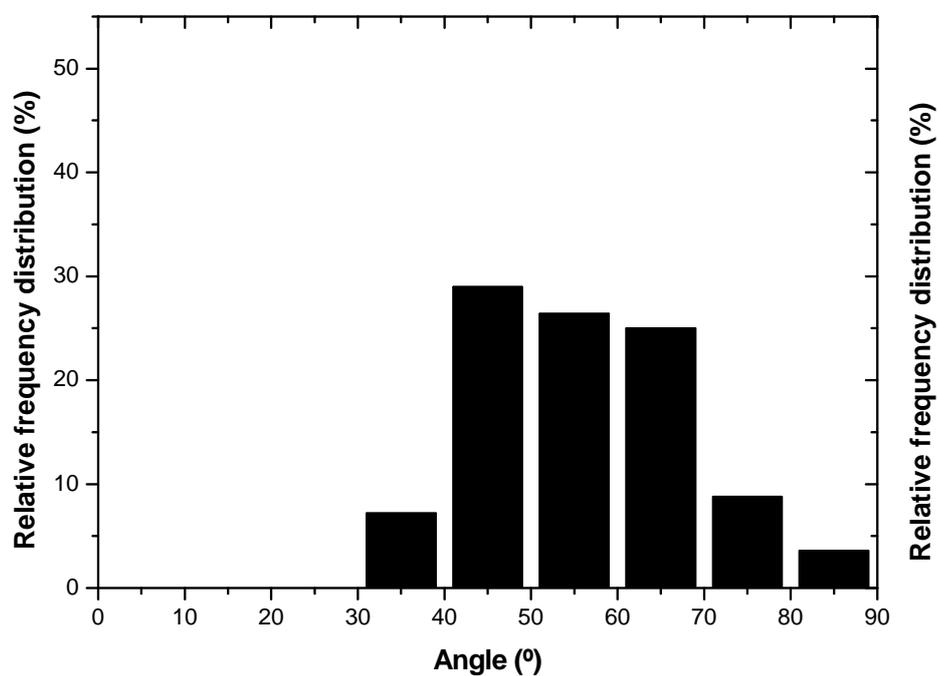
การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้ว



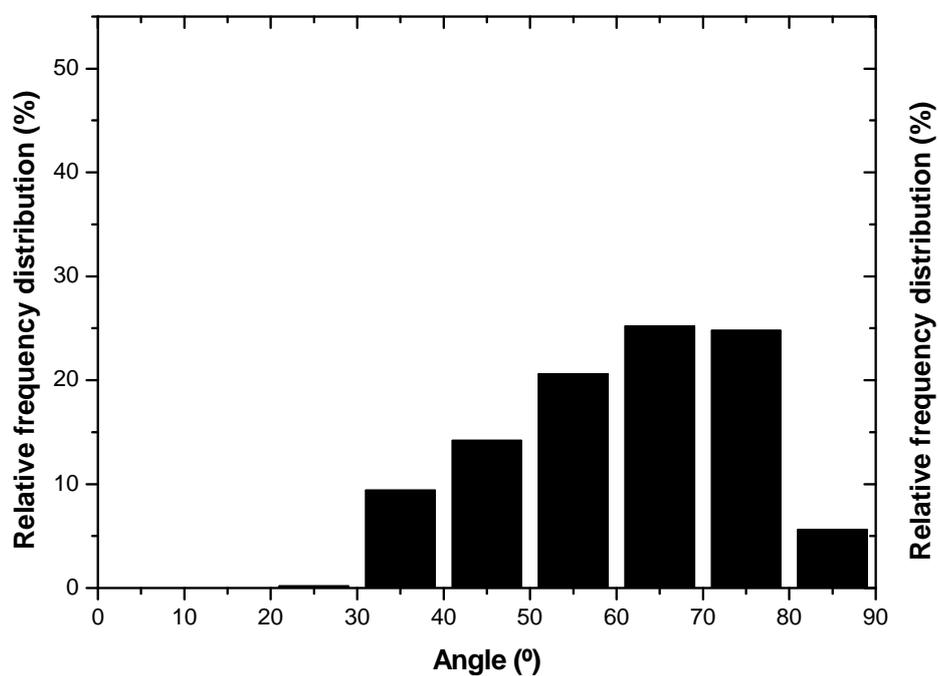
ภาพผนวกที่ ข1 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 0.5 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของ ชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน



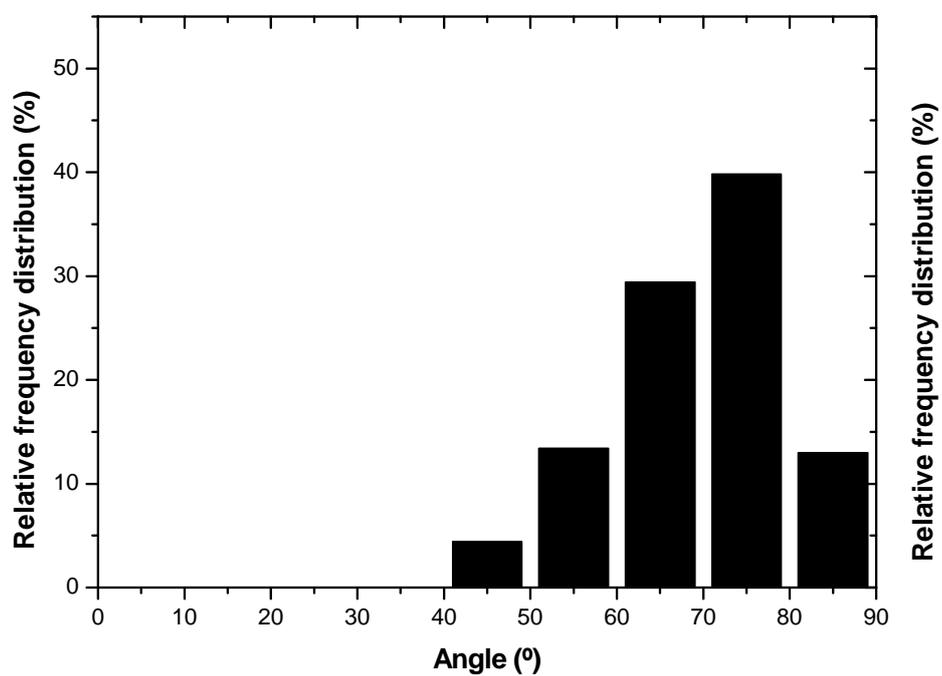
ภาพผนวกที่ ข2 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 1 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของ ชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน



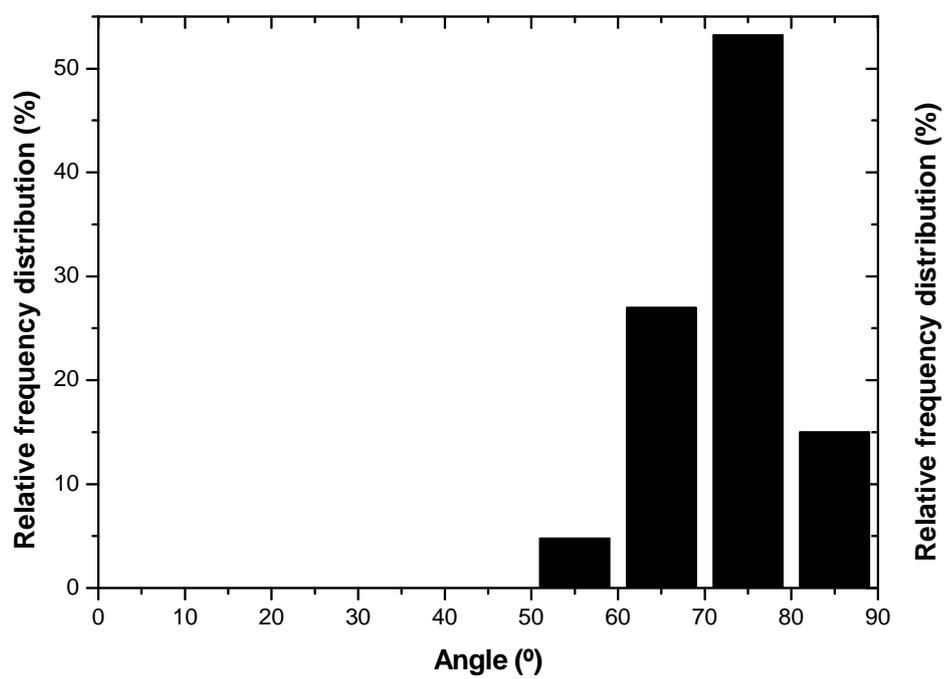
ภาพผนวกที่ ข3 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 1.5 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของ ชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน



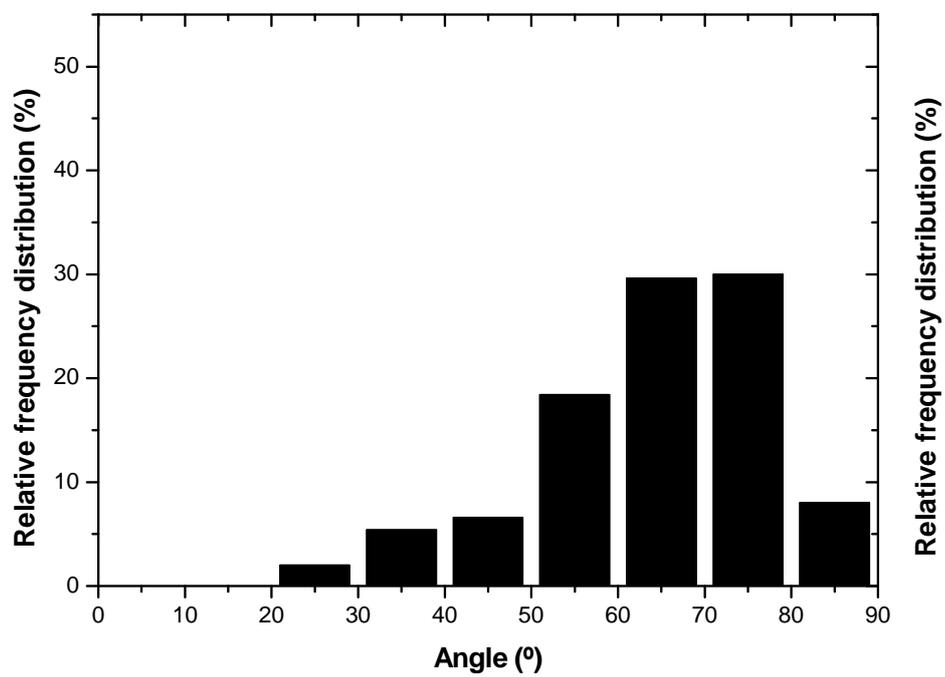
ภาพผนวกที่ ๔ การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 2 มิติเมตรจากผิวชิ้นงาน ของชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน



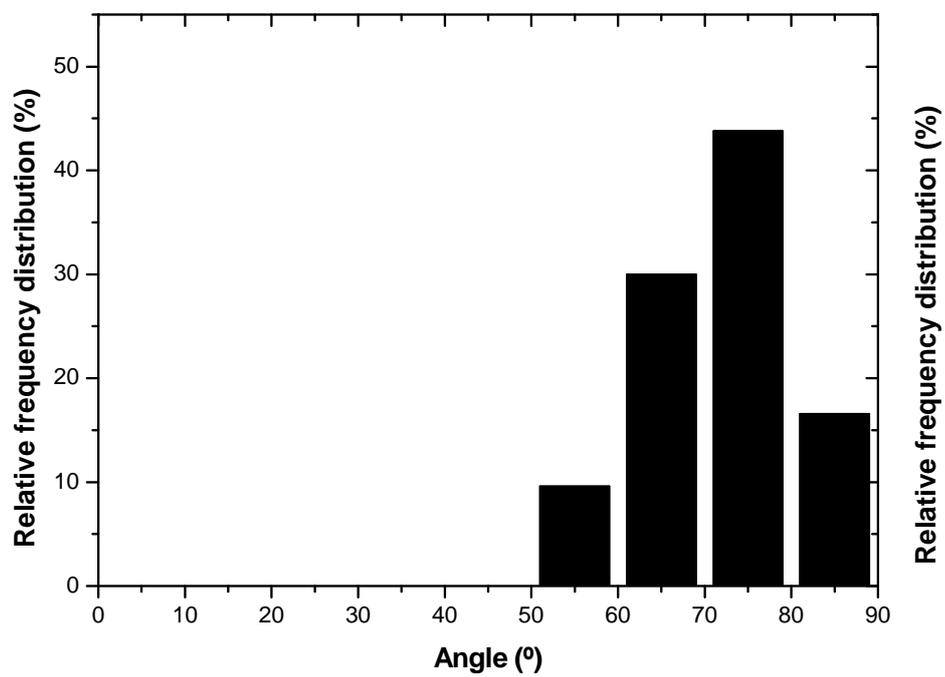
ภาพผนวกที่ ข5 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 2.5 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของ ชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน



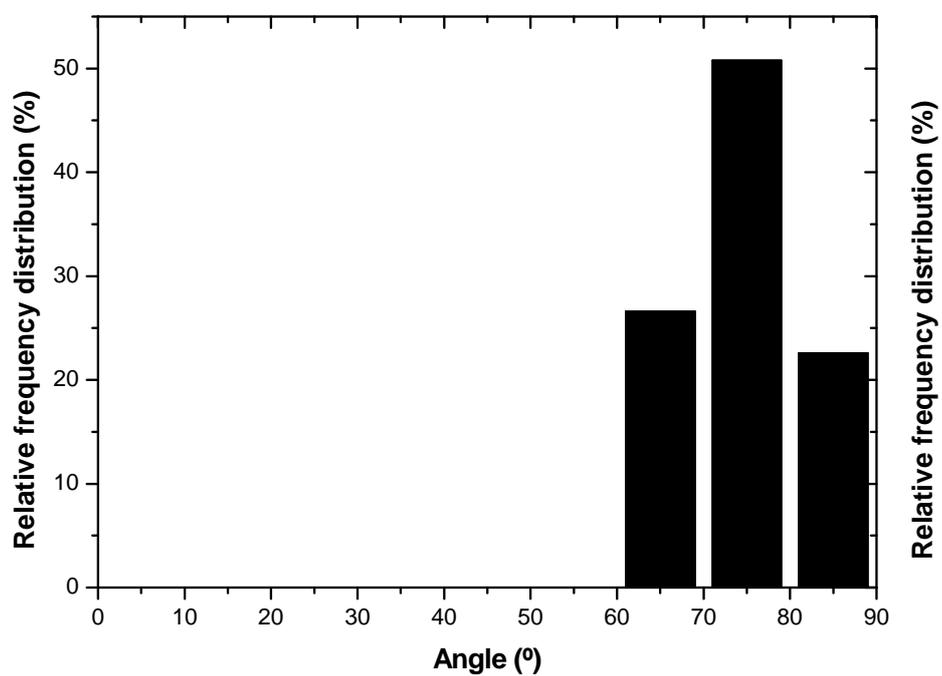
ภาพผนวกที่ ๖6 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 3 มิติเมตรจากผิวชิ้นงาน ของ ชิ้นงานที่ไม่มีรอยเชื่อมประสาน



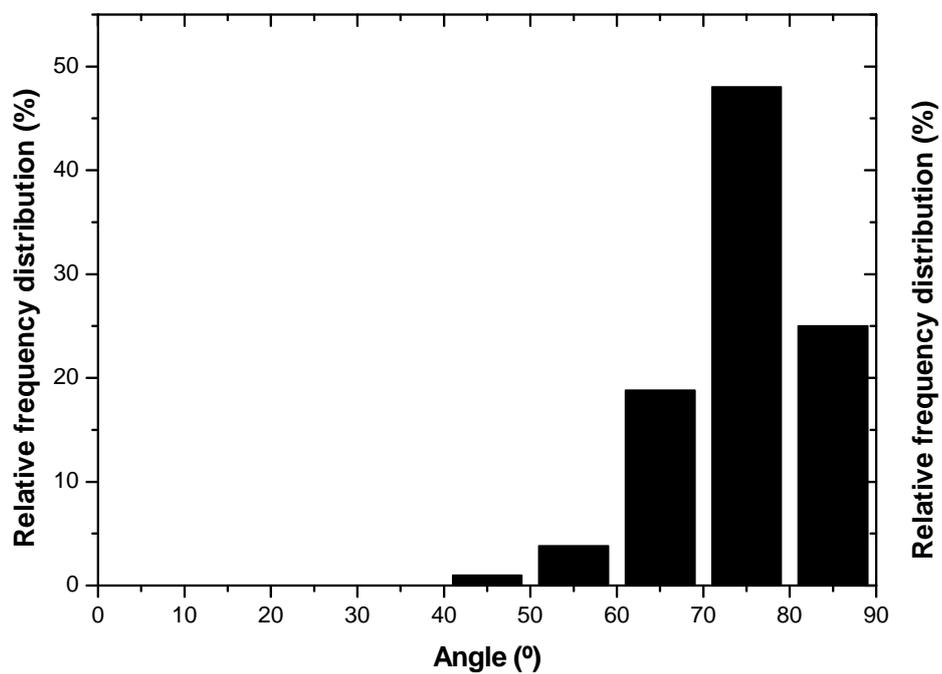
ภาพผนวกที่ ๗7 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 0.5 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของ ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน



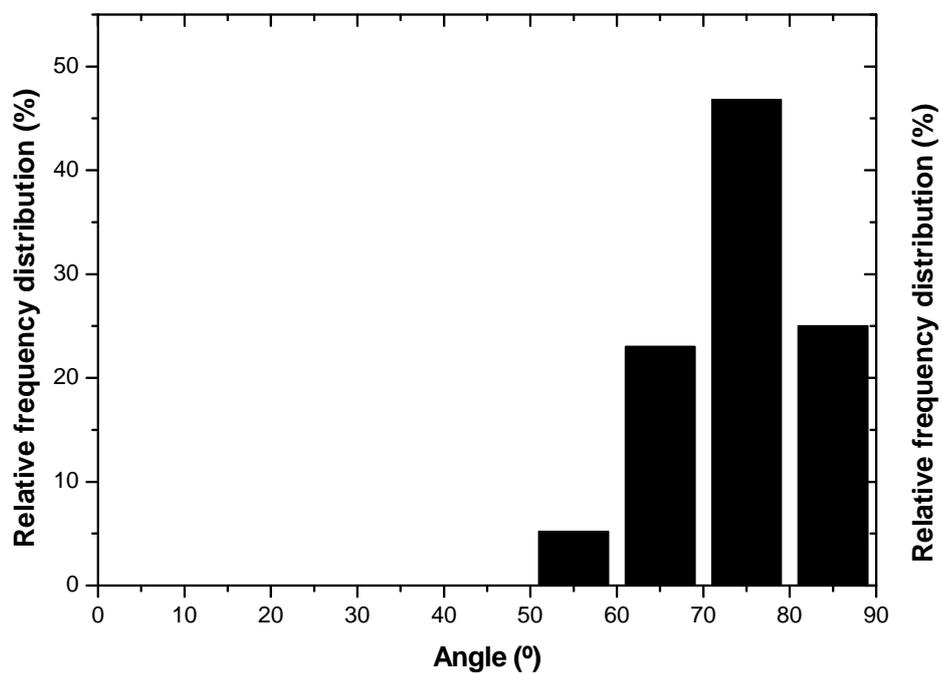
ภาพผนวกที่ ข8 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 1 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของ ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน



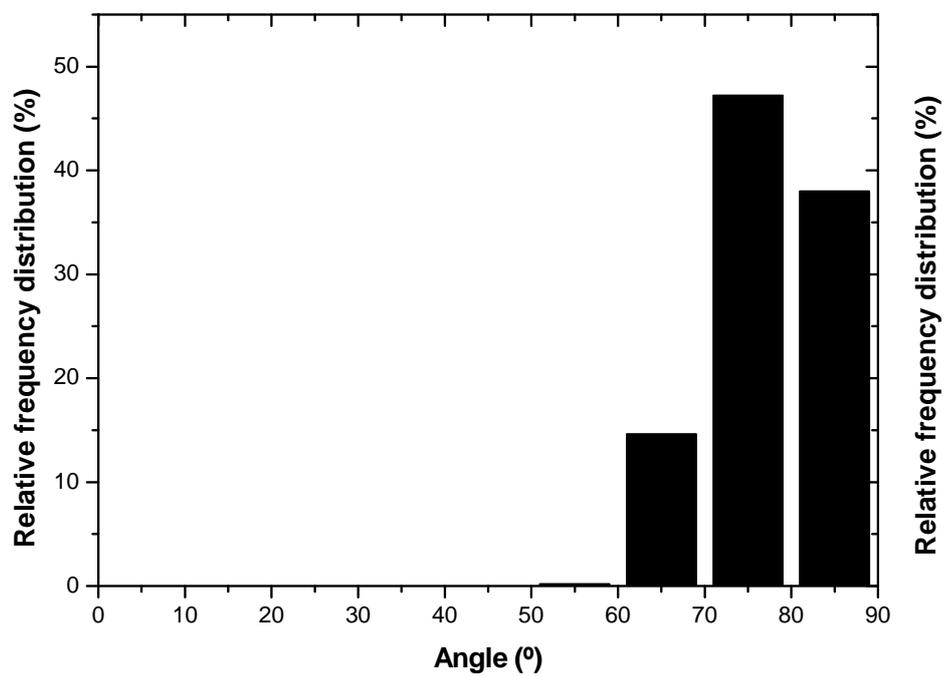
ภาพผนวกที่ ๑๒ การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 1.5 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน



ภาพผนวกที่ ข10 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 2 มิติลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของ ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน



ภาพผนวกที่ ข11 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 2.5 มิลลิเมตรจากผิวชั้นงาน ของ  
ชั้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน



ภาพผนวกที่ ข12 การกระจายตัวของค่ามุมเส้นใยแก้วในระนาบ 3 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นงาน ของ  
ชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมประสาน

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล

นายพิชัย จริยธรรมานุกูล

วัน เดือน ปี ที่เกิด

วันที่ 24 เมษายน 2523

สถานที่เกิด

กรุงเทพฯ

ประวัติการศึกษา

วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์