หลอมสัมผัสกับคาวิตี้ก็จะค่อยๆ กลายเป็นของแข็งเนื่องจากอิทธิพลของน้ำหล่อเย็น ดังนั้นต้องทำการฉีดอย่างรวดเร็ว เพื่อให้วัสดุเต็มคาวิตี้ในขณะที่ยังไหลได้

หลังจากที่พลาสติกหลอมเข้าในคาวิตี้ของแม่พิมพ์ก็จะเริ่มแข็งตัวจากด้านนอกเข้าในโดยด้านในของชิ้นงานที่ยังไม่แข็งตัวยังคงไหลได้ ดังได้กล่าวมาแล้วว่า ในขณะที่พลาสติกหลอมแข็งตัว จะเกิดการหดตัว ซึ่งทำให้เกิดการยุบตัว (Sink Mark) บนชิ้นงาน สามารถแก้ไขได้โดยการความดันย้ำในแม่พิมพ์ไว้ เพื่อผลักดันให้พลาสติกหลอมชุดใหม่เข้าไปชดเชยการหดตัว ซึ่งการชดเชยจะได้ผลเฉพาะในช่วงที่ วัสดุในสปรูนำฉีด (Spruce Cone) ยังไม่แข็งตัวและยังคงไหลได้ ดังนั้นการออกแบบแม่พิมพ์ ต้องให้สปรูนำฉีดอยู่ในตำแหน่งที่หนาที่สุดของแม่พิมพ์ เพื่อป้องกันไม่ให้พลาสติกที่ไหลในท่อแข็งตัวเร็วจนเกินไปจนเกิดความเสียหายได้

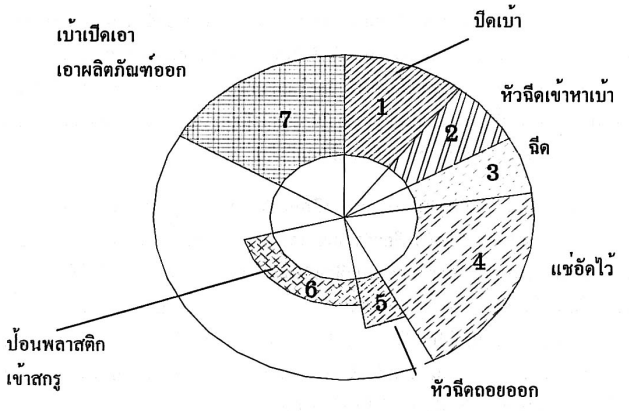
แผนภูมิของลำดับของกระบวนการฉีดแสดงดังรูปข้างล่าง ซึ่งสรุปลำดับของกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ เป็นขั้นตอนต่างๆ ได้ดังนี้

<u>ขั้นตอนที่ 1</u> ปิดแม่พิมพ์ ทำการเลื่อนแม่พิมพ์ทั้งสองฝั่งเข้าหากันเพื่อปิด ล็อคแม่พิมพ์ให้แน่นและมีแรงปิดมากกว่าแรงที่เกิดจากการฉีดพลาสติก

<u>ขั้นตอนที่ 2</u> เลื่อนหัวฉีดเข้าหาแม่พิมพ์ เลื่อนหัวฉีดจนกระทั่งชนกันกับม่พิมพ์แล้วค้างไว้ด้วยแรงกดที่เหมาะสม เพื่อป้องกันหัวฉีดถอยหลังกลับในช่วงทำการฉีด

<u>ขั้นตอนที่ 3</u> ฉีดพลาสติกหลอมเข้าแม่พิมพ์ ทำการฉีดพลาสติกหลอมเข้าแม่พิมพ์โดยการเคลื่อนตัวของสกรูในแนวนอน

<u>ขั้นตอนที่ 4</u> ระยะอัดความดันย้ำ (Holding Pressure Phase) เพื่อลดการเกิดการหดตัวของสกรูในแนวนอน



ภาพที่ 2.29

ลำดับกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์

ขั้นตอนที่ 5 หัวฉีดถอยหลังกลับ เพื่อป้องกันไม่ให้หัวฉีดมีอุณหภูมิต่ำเกินไป

ขั้นตอนที่ 6 ป้อนพลาสติกหลอมเข้าในช่องว่างหน้าสกรู โดยสกรูจะหมุนรอบตัวเองดึงให้พลาสติกจากกรวยเติมเข้ามาในกระบอกฉีด แล้วเคลื่อนตัวไปข้างหน้าพร้อมๆ กับเกิดการหลอม แล้วสะสมในช่องว่างด้านหน้าของสกรู โดยที่รูของหัวฉีดถูกปิด ทำให้เกิดแรงดันให้สกรูเกิดการถอยหลังกลับโดยอัตโนมัติ เมื่อได้ปริมาณพลาสติกหลอมที่เหมาะสมแล้ว สกรูจะหยุดหมุน

ขั้นตอนพิเศษ การหล่อเย็นเกิดขึ้นพร้อมๆ กับการเริ่มขั้นตอนที่ 5 ต่อไปจนสิ้นสุดขั้นตอนที่ 6 แล้วหล่อเย็นต่อเวลาอีกระยะหนึ่ง การหล่อเย็นเป็นระยะที่ใช้เวลานานที่สุด

ขั้นตอนที่ 7 ระยะถอดผลิตภัณฑ์พลาสติกออกจากแม่พิมพ์ โดยการกระทุ้ง ตัวอย่างการฉีดแผ่น CD ต้องผ่านขั้นตอนต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1

เวลาของกระบวนการฉีดแผ่น CD ที่ขั้นตอนต่างๆ

ขั้นตอนการฉีด	**เวลา (วินาที)**
ปิดเบ้าและเลื่อนหัวฉีดเข้าหาเบ้า (1 และ 2)	0.84
ฉีด (3)	0.22
แช่อัดไว้ (4)	0.25
เวลาหล่อเย็นทั้งหมด (3, 4, 5, และ 6)	2.22
เปิดเบ้า	0.73
เก็บชิ้นงาน	0.74
รวมเวลาทั้งหมด	5.00

1) ปัจจัยที่สำคัญในการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์

1. อุณหภูมิของพลาสติกหลอม

อุณหภูมิของพลาสติกหลอมกำหนดโดยการตั้งอุณหภูมิของกระบอก และหัวฉีด ซึ่งโดยทั่วไปมีแผ่นให้ความร้อนจำนวน 5 ชุด คือ ส่วนหัวฉีด ส่วนหน้ากระบอก ส่วนกลาง (จำนวน 2 ชุด) และส่วนท้ายของกระบอก อุณหภูมิที่ตั้งไม่ใช่อุณหภูมิของพลาสติกหลอม แต่เป็นอุณหภูมิของกระบอกซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิของโพลิเมอร์เล็กน้อย ดังนั้นในการผลิตที่ต้องการชิ้นงานที่มีคุณภาพสูง มักจะมีเทอร์โมคัพเพิ้ล (Thermocouple) วัดอุณหภูมิของพลาสติกหลอมโดยตรง

อุณหภูมิของการฉีดพลาสติก โดยทั่วไปจะระบุจากผู้ผลิตพลาสติก ซึ่งจะอยู่ในช่วงกว้าง เช่น 190 ถึง 230 องศาเซลเซียส ของการฉีด HDPE เป็นต้น ดังนั้น การเลือกใช้อุณหภูมิการฉีดค่าใดขึ้นอยู่กับความเหมาะสม การตั้งอุณหภูมิพลาสติกหลอมสูง ทำให้พลาสติกหลอมเหลวไหลได้ง่าย แต่อาจเกิดปัญหาเรื่องการเสื่อมสภาพของพลาสติก และการสิ้นเปลืองพลังงาน ส่วนการตั้งอุณหภูมิต่ำเกินไป อาจจะทำให้พลาสติกหนืดสูงเกินไป จนไม่สามารถฉีดชิ้นงานได้เต็ม

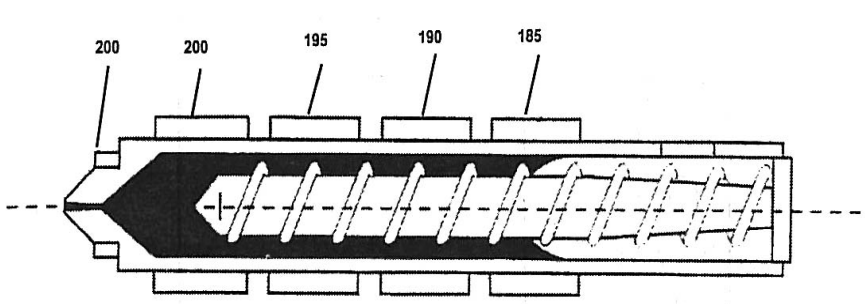
ตัวอย่างช่วงอุณหภูมิของพลาสติกหลอมบางชนิดที่ใช้ในการฉีดแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2

ช่วงอุณหภูมิของพลาสติกหลอมบางชนิดในการฉีดเข้าแม่พิมพ์

ชนิดพลาสติก	อุณหภูมิของพลาสติกหลอม(^{o}ซ)
ไนลอน-6,6	280 - 305
ไนลอน-6	270 -280
ไนลอน-6,12	270 - 280
พอลีคาร์บอเนต	305 - 330
พอลีโพรไพลีน	200 - 230
พอลีเอธิลีน	190 - 230
SAN	230 - 260
ABS	- 270
พอลีสไตรีน	230 - 260
พอลีซันโฟน	340 - 370
PET	293 - 310

การตั้งอุณหภูมิของส่วนต่างๆของกระบอกและหัวฉีด ส่วนมากตั้งแบบเพิ่มอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากส่วนใกล้กับกรวยเติมพลาสติก และให้ส่วนปลายของกระบอกมีอุณหภูมิเท่ากับหัวฉีด ตัวอย่างการตั้งอุณหภูมิของกระบอกและหัวฉีดในการฉีด HDPE แสดงดังภาพที่ 2.30



ภาพที่ 2.30
การตั้งอุณหภูมิที่ส่วนต่างๆ ของกระบอกและหัวฉีดสำหรับการฉีด HDPE

2. อุณหภูมิของแม่พิมพ์

ในกรณีการฉีดเทอร์โมพลาสติก มักจะใช้น้ำหรือน้ำมันไหลหมุนเวียนเพื่อควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ การฉีดเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มที่ไม่มีผลึก (Amorphous Thermoplastic) เช่น ABS, SAN และ LDPE จะตั้งอุณหภูมิแม่พิมพ์ค่อนข้างต่ำ ส่วนเทอร์โมพลาสติกชนิดกึ่งผลึก (Semi-Crystalline Thermoplastic) ใช้อุณหภูมิสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากต้องการให้มีเวลามากพอที่โมเลกุลของพลาสติกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เพื่อให้เกิดผลึกได้ คือ ให้ชิ้นงานพลาสติกเย็นลงอย่างช้า ซึ่งยังส่งผลให้เกิดผลึกซึ่งประกอบด้วยสฟีรูไลท์ (Spherulites) ขนาดเล็กกว่า ทำให้ได้ชิ้นงานพลาสติกที่มีสมบัติเชิงกลดี ตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่าง ช่วงอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมสำหรับการฉีดพลาสติกบางชนิด

ตารางที่ 2.3
ช่วงอุณหภูมิของแม่พิมพ์ซึ่งใช้ในการฉีดพลาสติกบางชนิด

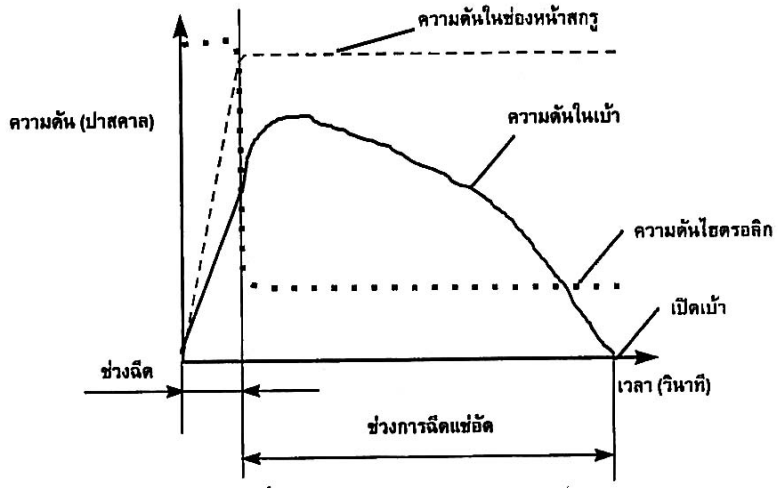
ชนิดพลาสติก	อุณหภูมิของพลาสติกหลอม(°ซ)
ไนลอน-6,6	55 - 105
ไนลอน-6	55 - 82
ไนลอน-6,12	55 - 82
พอลีคาร์บอเนต	70 - 88
พอลีโพรไพลีน	35 - 70
LDPE	10 - 40
HDPE	30 - 70
SAN	70 - 80
ABS	45 - 90
พอลีสไตรีน	35 - 80
พอลีซันโฟน	90 - 150
PET	90 - 120

3. ความดันในการฉีด (Injection Pressure)

ความดันฉีดเกิดจากการเคลื่อนที่ในแนวแกนของสกรู เป็นความดันที่ทำให้พลาสติกหลอมไหลเข้าคาวิตี้ของแม่พิมพ์ ค่าความดันฉีดสามารถปรับได้โดยตรงจากแรงดันของน้ำมันไฮดรอลิก ความดันในการฉีดมีความสัมพันธ์กับรูปร่างลักษณะของชิ้นงาน เช่น ความหนาบางและส่วนโค้งเว้า

4. ความดันย้ำในการฉีด (Holding Pressure)

ความดันย้ำในการฉีด ได้มาจากความดันที่เกิดขึ้นกับพลาสติกหลอมในช่วงด้านหน้าสกรูเช่นเดียวกับความดันที่ใช้ในการฉีด แต่ขนาดของความดันย้ำฉีดจะน้อยกว่าประมาณ 30 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ของความดันฉีด ซึ่งระดับความดันชนิดนี้ขึ้นกับความหนืดของพลาสติกที่ฉีด ถ้าฉีดพลาสติกที่มีความหนืดสูง จำเป็นต้องใช้ความดันย้ำสูง เพื่อชดเชยการหดตัว ลักษณะของกราฟแสดงความดันย้ำในแม่พิมพ์ ในคาวิตี้หน้าสกรู และความดันของน้ำมัน" ฮดรอลิก ในช่วงฉีด และช่วงการฉีดย้ำแสดงดังภาพที่ 2.31 ซึ่งจะเห็นว่าหลังจากการฉีดแล้ว ความดันในเบ้าจะเพิ่มขึ้นต่ออีกระยะหนึ่งแล้วค่อยๆ ลดลงในช่วงการฉีดดันย้ำ และความดันเท่ากับความดันบรรยากาศหลังจากเปิดแม่พิมพ์



ภาพที่ 2.31
ค่าความดันในแม่พิมพ์ ในคาวิตี้หน้าสกรู และความดันของน้ำมันไฮดรอลิกในช่วงฉีด
และช่วงการฉีดดันย้ำ

5. ขนาดของเครื่องฉีดพลาสติก

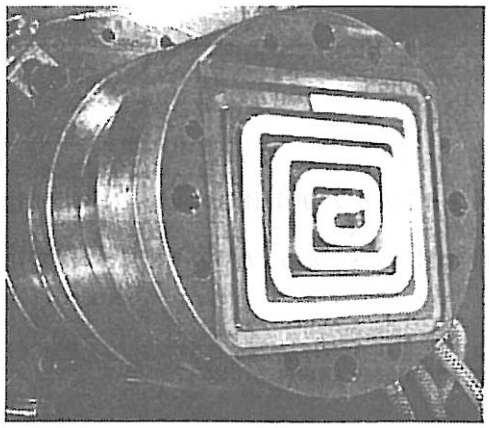
การผลิตชิ้นงานพลาสติกจะต้องเลือกขนาดของเครื่องฉีดให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ทำการผลิต การกำหนดชนิดของเครื่องฉีดพลาสติก โดยทั่วไปจะเรียกตามขนาดของแรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force) สูงสุด โดยมีหน่วยเป็นตันหรือกิโลนิวตัน (1 ตันมีค่าประมาณ 10 กิโลนิวตัน)

2.2.6 **พลาสติกที่ใช้ในการฉีด**

โดยทั่วไปเทอร์โมพลาสติกทุกชนิดเหมาะสำหรับการฉีดเข้าแม่พิมพ์ แต่ต้องใช้เกรดของพลาสติกที่มีอัตราการไหลที่เร็วภายใต้สภาวะของการฉีด กล่าวคือมีค่าดัชนีการไหลสูง (Melt flow index) นอกจากนี้ความยากง่ายของการฉีดจะแตกต่างกันระหว่างเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มไม่มีผลึกกับกลุ่มกึ่งผลึก ซึ่งมักจะมีปัญหาที่พบเห็น คือ การหดตัว (Shrinkage) การยุบตัว (Sink mark) เป็นแผ่นที่รอยประกบแม่พิมพ์ (Flashing)

การเลือกชนิดและเกรดของพลาสติกที่ใช้ในการฉีดมีความสำคัญมาก เนื่องจากผู้ผลิตพลาสติกส่วนใหญ่ไม่ได้ให้ข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการแปรรูป ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบสมบัติของพลาสติกเพิ่มเติม ก่อนที่จะตัดสินใจใช้พลาสติกในการฉีด สมบัติที่มีความจำเป็นมากที่สุดอย่างหนึ่งคือ รีโอโลยีของพลาสติกหลอม ซึ่งสามารถทดสอบได้โดยเครื่องรีโอมิเตอร์ นอกจากนี้การทดสอบการไหลแบบแม่พิมพ์วน (Spiral flow test mold) ซึ่งแสดงใน

ภาพที่ 2.32 ก็สามารถทราบความสามารถในการแปรรูปในการฉีด และความหนืดของพลาสติกหลอมได้



ภาพที่ 2.32
แม่พิมพ์ทดสอบการไหลแบบวน (Spiral Flow Test Mold)

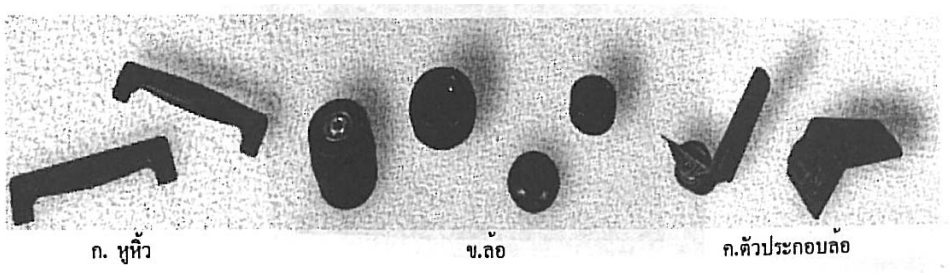
พลาสติกในกลุ่มเทอร์โมเซ็ตหลายชนิด นิยมแปรรูปโดยเทคนิคการฉีดเข้าแม่พิมพ์ ตัวอย่าง พลาสติกเรียงตามปริมาณที่ใช้ในการฉีดเข้าแม่พิมพ์ คือ ฟีนอลิก พอลีเอสเทอร์ เมลามีน อีพอกซียูเรีย ไวนิลเอสเทอร์ และ ไดอัลลิลพะทาเลท (Dally phthalate, DAP) เป็นต้น เทอร์โมเซ็ทส่วนใหญ่จะมีสารตัวเติมในปริมาณสูงมาก (อาจจะสูงถึง 70 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก) เพื่อเหตุผลในการลดต้นทุนและเพิ่มสมรรถนะของชิ้นงานพลาสติก คือ ลดการหดตัว เพื่อมความแข็งและสมบัติเด่น อื่นๆ ตัวอย่างสารตัวเติมที่นิยมเติมลงในเทอร์โมเซ็ท เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยจากไม้ เขม่าดำ เส้นใยอื่นๆ และเคลย์ เป็นต้น สารตัวเติมเหล่านี้อาจจะก่อปัญหา คือ ทำให้เครื่องฉีดโดยเฉพาะกระบอก หัวฉีดและแม่พิมพ์สึกหรอได้ง่าย

2.2.7 **ผลิตภัณฑ์จากการฉีดพลาสติก**

ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตจากการฉีดพลาสติก มีการประยุกต์ใช้ในเกือบทุกวงการทั้งในอุตสาหกรรม และการใช้งานในบ้าน ตัวอย่างเช่น ใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์และเครื่องบิน อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเลคทรอนิค อุตสาหกรรมปิโตรเคมี ใช้เป็นอุปกรณ์ประกอบของเครื่องใช้ภายในบ้าน และเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น

1. **กลุ่มชิ้นงานพลาสติกที่มีขนาดเล็ก**

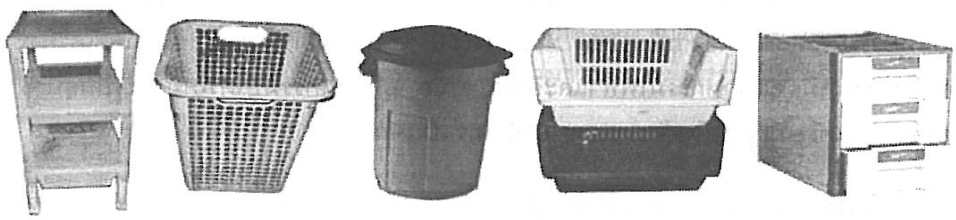
เป็นการผลิตชิ้นงานพลาสติกที่ใช้แม่พิมพ์ชนิดหลายคาวิตี้ เพื่อผลิตชิ้นงานจำนวนหลายชิ้นในครั้งเดียว ซึ่งในการแปรรูปบ้างครั้งต้องการชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงมาก เช่น การผลิตชิ้นส่วนพลาสติกสำหรับเป็นอุปกรณ์ของนาฬิกาข้อมือ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เป็นต้น ตัวอย่างอื่นๆ ของการฉีดชิ้นงานพลาสติกขนาดเล็ก เช่น การผลิตอุปกรณ์ประกอบของกระเป๋าเดินทาง ดังภาพที่ 2.33 เป็นต้น



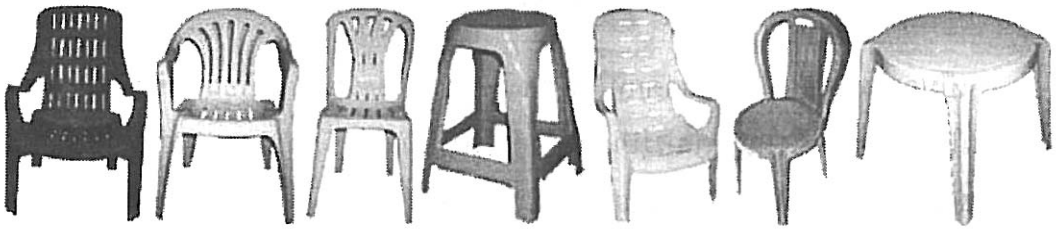
ภาพที่ 2.33
อุปกรณ์ของกระเป๋าเดินทางที่ผลิตจากการฉีด ABS

2. **กลุ่มชิ้นงานพลาสติกที่มีขนาดกลาง**

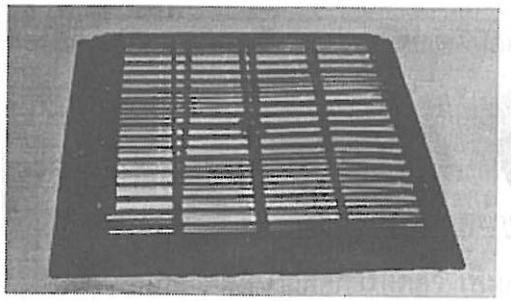
เป็นกลุ่มของชิ้นงานพลาสติกที่มีการผลิตมากที่สุด อาจจะเป็นชิ้นงานที่ผลิตในปริมาณสูงซึ่งเป็นกลุ่มใช้ครั้งเดียวหรือไม่กี่ครั้งแล้วทิ้ง หรือเป็นกลุ่มที่ผลิตในปริมาณน้อยและราคาแพง ซึ่งเป็นกลุ่มที่ใช้ประกอบเครื่องที่ใช้เทคโนโลยีชั้นสูง ตัวอย่างชิ้นงานจากการฉีดพลาสติกในกลุ่มนี้ เช่น ของใช้ในครัวเรือน ภาพที่ 2.34, เก้าอี้พลาสติก ภาพที่ 2.35, และไส้กรองอากาศของเครื่องยนต์ ดังภาพที่ 2.36 เป็นต้น



ภาพที่ 2.34
เครื่องใช้ในครัวเรือน



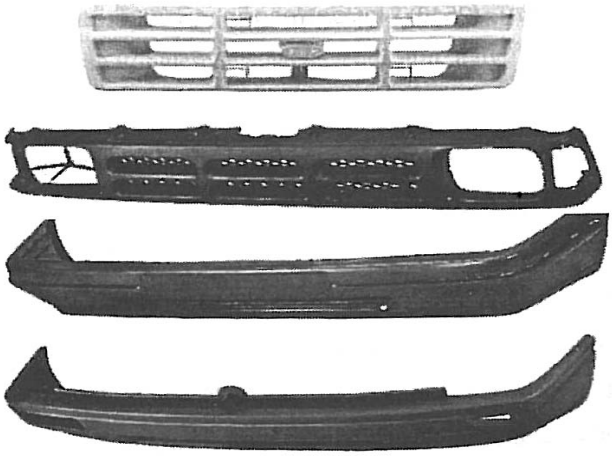
ภาพที่ 2.35
เก้าอี้พลาสติก



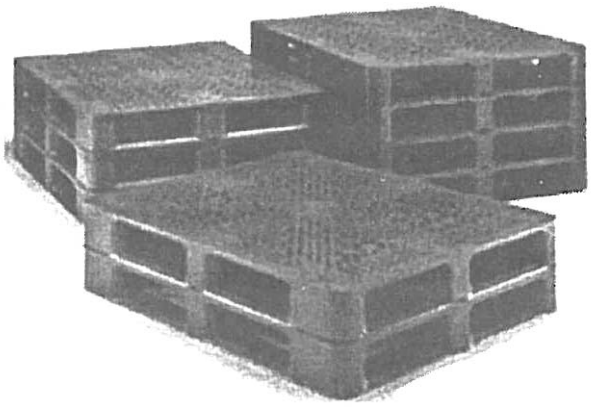
ภาพที่ 2.36
ไส้กรองอากาศเครื่องยนต์

3. กลุ่มชิ้นงานพลาสติกที่มีขนาดใหญ่

เป็นการใช้เครื่องฉีดพลาสติกขนาดใหญ่ และมักจะต้องใช้การลงทุนที่สูงกว่าการผลิตพลาสติกใน 2 กลุ่มแรก ตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกในกลุ่มนี้ เช่น เฟอร์นิเจอร์ กระดูกงูของเรือกันชนของรถยนต์แสดงดังภาพที่ 2.37 และชั้นวางของสำหรับเคลื่อนย้ายสินค้า แสดงดังภาพที่ 2.38 เป็นต้น



ภาพที่ 2.37
กันชนรถยนต์



ภาพที่ 2.38
ชั้นวางของสำหรับเคลื่อนย้ายสินค้า

2.3 **ข้อมูลพลาสติกชนิด** Liquid Crystal Polymer (LCP)

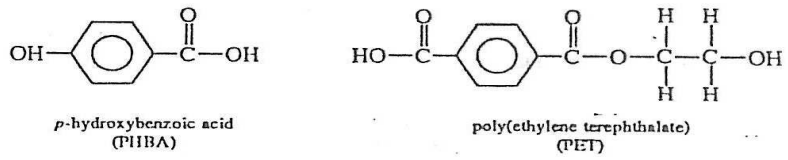
2.3.1 Liquid Crystal Polymer

คือ พลาสติกชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเฉพาะ ทำให้แน่นติดกันได้มีความแข็งแรงสูง เนื่องจากวัสดุในขณะหลอมนั้นมี ดีกรีการเกิดผลึก (Degree of Crystalline) สูง LCP จะ

ประกอบด้วยโมเลกุลที่ยาว และสมส่วนควบคุมทิศทางการไหลได้ง่าย เข้ากันได้กับวัสดุที่แข็งซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีและสภาวะภายใต้กระบวนการขึ้นรูปของโพลีเมอร์

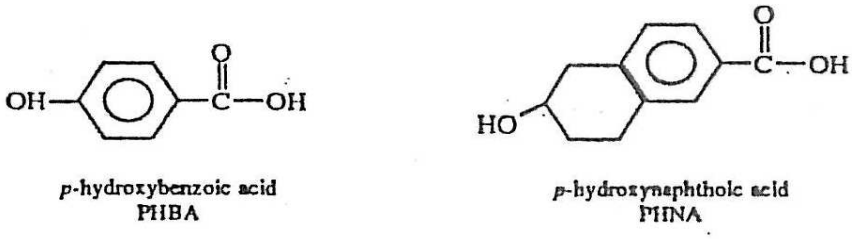
LCP สามารถแบ่งโดยกระบวนการทางความร้อนได้ 3 ชนิด

ชนิดที่ 1 มีช่วงความร้อนต่ำที่สุดให้ความร้อนเพื่อให้ตัวพลาสติกเกิดการโค้งงอหย่อนตัวลงมามีระดับขอบเขตความร้อนตั้งแต่ 180-420 °F (82-216 °C) ตัวอย่างเช่น p-hydroxybenzoic acid (PHBA) และ Polyethylene Terephthalate (PET)



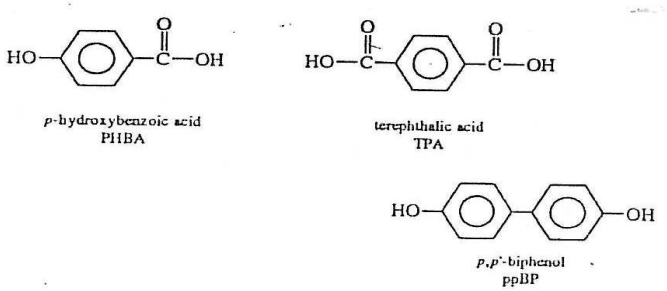
ภาพที่ 2.39
โครงสร้าง LCP ชนิดที่ 1

ชนิดที่ 2 LCPs มีขอบเขตอยู่ใน HDT มีอุณหภูมิตั้งแต่ 350-465 °F (177-241°C) มีชื่อทางการค้าว่า Vectra โดยได้มาจาก Aromatic Copolyester ซึ่งประกอบไปด้วย PHBA และ P - Hydroxynaphthoic Acid (PHNA).



ภาพที่ 2.40
โครงสร้าง LCP ชนิดที่ 2

ชนิดที่ 3 LCPs มีชื่อทางการค้าว่า Xyder มีมากใน HDT มีอุณหภูมิตั้งแต่ 500-670 °F (260-354°C) เป็น Terpolymer โดยได้มาจาก Aromatic Copolyester ซึ่งจะมีใน PHBA, Terephthalic acid (TPA) และ p,p'-bipnol (ppBP)



ภาพที่ 2.41
โครงสร้าง LCP ชนิดที่ 3

LCPs จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างไปจากวัสดุธรรมดาทั่วไป ในส่วนพื้นผิวจะมีการจัดเรียงโมเลกุลเป็นเส้น ตามแนวทางการไหลของวัสดุ ส่วนโมเลกุลตรงกลางจะมีทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลมีความเป็นผลึกสูงมาก ในการจัดเรียงระหว่างที่พื้นผิวกับบริเวณตรงกลางจะมีการเรียงตัวเปลี่ยนไปทีละเล็กทีละน้อยจนกระทั่งได้มุม 90 องศา ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ออกมานั้น ในส่วนผิวการปรับตัวของเส้นการไหลที่ผิวจะมีความแตกต่างกันส่วนการปรับตัวของการไหลในส่วนตรงกลางจะมีการเชื่อมโยงกัน ทำให้ LCPs มีความแข็งแรงสูงมาก

โดยทั่วไปแล้วสมบัติของโพลิเมอร์ชนิดนี้มีความสามารถสูงมาก ทำให้การออกแบบแม่ผลิตภัณฑ์ควรต้องคำนึงถึงการนำไปใช้งานให้ดีก่อน ส่วนในการออกแบบแม่พิมพ์ควรต้องคำนึงถึงการหดตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์ให้ดี ส่วนการเติมสารเติมแต่งก็ควรพิจารณาตามลักษณะการใช้งานให้ดีก่อน ซึ่งทางการค้าส่วนมากจะมีการผสม เส้นใยแก้ว (Glass Fiber) เป็น LCPs เกรดต่างๆ

2.3.2 **ประเภท**

LCPs เป็นเทอร์โมพลาสติก มีคุณสมบัติต่างๆ ที่ยอดเยี่ยม มีความแข็งเกร็ง แข็งแรง เปราะ ต้านทานอุณหภูมิได้สูง ติดไฟยาก มีสมบัติทางไฟฟ้าดีเยี่ยม และต้านทานสารเคมีสูง

2.3.3 **ประวัติการค้นพบ** LCP

ในช่วงแรก LCPs มีการค้นพบในธรรมชาติเป็นโพลิเมอร์ชีวภาพ เช่น โปรตีน viri และ Polysaccharides มีการผสม LCPs แต่ไม่เป็นที่ยอมรับจนกระทั่งกลางปี 1950s. ปี 1888 ความเป็นผลึกถูกปรับปรุงจนอยู่ในรูปสารละลายได้โดย Reinitzer ในปี 1949 Onsagar สร้างทฤษฎีเกี่ยวกับการคงอยู่ด้วยสถานะที่เสถียรในสารละลายพื้นฐาน ในปี 1965 Kevlar ค้นพบ Aromatic Polyamide ขึ้นรูปได้โดยการไม่หลอมเหลวซึ่งถือเป็นก้าวแรกของ LCPs ในปี 1972 มีการเริ่มค้า

LCPs เป็นครั้งแรก ในปี 1978 Ekkcel มีการจดลิขสิทธิ์ ในปี 1984 ผลิตภัณฑ์มีความก้าวหน้าจนมีการใช้วัสดุมาผสมกับแร่ต่างๆ

มีการปรับปรุง LCPs ครั้งใหญ่มีการค้นพบฟิลเลอร์ ซึ่งฟิลเลอร์นี้มีส่วนต่อสมบัติต่างๆ เช่น ทางกล ทางไฟฟ้า อุณหภูมิ และกระบวนการผลิต โดยฟิลเลอร์จะหยุดการเกิดผลึก โดยทั่วไปเราจะใช้ Mill Glass, Glass Fiber, Mineral Fiber และ Mineral Particulate

2.3.4 Polymerization

การเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันทั้งหมดเกิดจากอโรมาติกโพลิเอสเทอร์ มีกระบวนการทำได้ 2 วิธี

- วิธีที่ 1 ปฏิกิริยา Schotten-Buaman จะได้ Diacyl Chloride และ Diphenal จากการแตกพันธะอโรมาติกของโพลิเมอร์ และปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน จากการให้ความร้อน ซึ่งจะให้ HCL เป็น by-product ปฏิกิริยานี้สามารถดำเนินปฏิกิริยาในสารละลายได้โดยทำได้จากปฏิกิริยา Polycondensation

- วิธีที่ 2 Polymerization จากการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ และ Polycondensation ในการหลอม จากการแตกของพันธะอโรมาติกภายใต้ความร้อนและสุญญากาศจะได้ Diacid, Hydroxy Acid และ Diacetoxy โพลิเมอร์จะได้ผลิตภัณฑ์ร่วมกับ acetic เป็น by-product ซึ่งปฏิกิริยาทั้ง 2 วิธี โมโนเมอร์เมื่อทำปฏิกิริยาแล้ว ในขั้นแรกจะมีน้ำหนักของสายโว่โมเลกุลต่ำถึงปานกลางในสารละลายหรือการหลอม ต่อมาโพลิเมอร์จะเริ่มมีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นระหว่างการให้ความร้อนจนเริ่มการเป็นของแข็ง

2.3.5 **คุณสมบัติของ** LCP

2.3.5.1 สมบัติทางอุณหภูมิ

LCPs มีการทนต่ออุณหภูมิที่ยอดเยี่ยมมากโดย HDT ทนต่ออุณหภูมิสูงประมาณ 671 ^{o}F (355 ^{o}C) สามารถใช้งานที่สูงประมาณ 575F ^{o}C (302 ^{o}C) อุณหภูมิมีการต้านทานที่ยอดเยี่ยมขณะให้ความร้อนสูงที่ช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ทำให้เกิดความล้าน้อย LCPs จะมีคุณสมบัติหน่วงไฟอยู่ มีความเหนียวต่ำ 0.031 in. การทดสอบ LCPs ชนิดที่ 3 ซึ่งสามารถทนความร้อนได้ 2,000 ^{o}F (1095^{o}C) 15 นาที โพลิเมอร์ที่ผิวสามารถดับไฟได้เมื่อมีการลุกไหม้เกิดขึ้น คุณสมบัติการนำความร้อนค่อนข้างต่ำเหมือนพลาสติกโดยทั่วไปที่เป็นฉนวนแต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติมฟิลเลอร์ลงไปในปริมาณที่แตกต่างกัน ก็สามารถทำให้มีการนำความร้อนต่างกันด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัว ขยายตัวต่ำของ LCP มาก มีค่าระหว่าง 5-10 x 10^{-6}in./in/^{o}F (9-1810^{-6}in./in/^{o}F) เป็นไปตามกลไกการไหล

2.3.5.2 สมบัติทางกล

LCPs มีความแข็งแรง มีการทนต่อกรงดึง และมีความคงรูปสูง (25,000 psi และ 30,000 psi (172 และ 207 MPa) โดยเฉพาะเมื่อมีการวัดในทิศทางของการไหลค่ามอดูลัสของแรงดึงและการคงรูปมีค่าอยู่ระหว่าง 2-4x10^{-6} psi (13,800-27,600 Mpa) LCPs ชนิดที่ 3 มีการผสมทำให้ค่าการยืดตัวมีสูงขึ้นถึง 5,000 psi (34 MPa) ที่อุณหภูมิ 575°F (302°C) ซึ่งในการทำจะกระทำได้เพียงเทอร์โมพลาสติกเท่านั้น อุณหภูมิจะมีผลต่อเปอร์เซ็นการยืดตัว - หดตัวต่ำ (1-3 %) การทนต่อแรงกระแทก 1- 3 ft-lb/in. (53-160 J/m) สำหรับพวกที่มีความเป็นผลึกสูงเท่านั้น

สำหรับชนิด 1 กับ 2 LCPs จะมีการเติมเส้นใยแก้วเสริมเข้าไปจะทำให้มีคุณสมบัติทางกลและทางอุณหภูมิดีกว่าไม่ผสม เส้นใยแก้วเสริมแรงจะช่วยเพิ่มพูนสมบัติทางกลแต่จะไม่มีผลต่อสมบัติด้านอุณหภูมิ ฟิลเลอร์ตัวอื่นๆ อาจช่วยลดความสามารถทางความร้อนและสมบัติทางกลของชนิดที่ 3 แต่มันก็ช่วยให้สามารถขึ้นรูปในกระบวนผลิตได้ง่ายขึ้น

2.3.5.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

โพลิเมอร์มีความเป็นฉนวนไฟฟ้า มีความต้านทานอยู่ประมาณ 4 x 10^{15}ohm-cm. และสามารถใช้ป้องกันไฟฟ้าได้สูงถึง 1,100 V/mil (43 v/mn) ได้นานถึง 244 วินาที สารประกอบฟิลเลอร์ชนิดพิเศษ จะยอมให้ LCPs เกิดไฟฟ้าสถิตได้ทำให้ถูกใช้เป็นเครื่องนำไฟฟ้าทนต่อคลื่นไมโครเวฟได้แต่เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะถูกทำให้ช่วงอุณหภูมิกว้างขึ้นตามไปด้วยซึ่งในอนาคตอาจมีการใช้วัสดุนี้ทำไมโครเวฟหรือเครื่องครัวต่างๆ ก็ได้

2.3.5.4 การหน่วงไฟ

LCPs ตามธรรมชาตินั้นจะมีการป้องกันการติดไฟ LCPs จะถูกปรับปรุงโดยการใส่สารเติมแต่งเป็น UL 94 V-0 และ 5V LCPs มีดรรชนีการติดไฟ (LOI) ประมาณ 45-50 ซึ่งถือว่าเป็นพลาสติกวิศวรรมชั้นสูงชนิดหนึ่ง LCPs ชนิดที่ 3 เป็นเพียงเทอร์โมพลาสติกมีค่า FAA 15-min, 2,000 °F (1095 °C) ส่วนใหญ่ใช้กับชิ้นส่วนเครื่องบิน

5. การต้านทานสารเคมี

เพราะ LCPs มีโครงสร้างมาจาก วงแหวนอโรมาติก ทำให้ LCPs มีการทนต่อสารเคมีและสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดีซึ่งสมบัติเหล่านี้เองทำให้ในอุตสาหกรรม และแผงวงจรอิเล็กทรอนิคส์มีอันตรายต่อร่ายกาย LCPs เป็นสิ่งจำเป็นต่อครอบครัวสามารถใช้ได้กับอาหารและไม่เกิดรอยง่าย

2.3.5.5 การประยุกต์ในด้านต่างๆ

1.ผู้บริโภค

LCP มีการประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายเครื่องอุปกรณ์ในครัวประมาณ 80 – 90% ทำจาก LCP ที่ LCP ใช้ทำเครื่องครัวก็เพราะมีสมรรถนะที่ทนต่อความร้อนได้เป็นอย่างดีทนต่อคลื่นไมโครเวฟ ต้านสารเคมีมีความเสถียรภาพเมื่อขาดน้ำ LCP สามารถใช้ในเตาอบได้ รวมไปถึงการทำพื้น เพดาน และแผ่นเสียงอีกด้วย เนื่องจาก LCP มีความต้านทานความร้อนและมีการทนต่อไฟฟ้าได้เป็นอย่างดีทำให้ LCP ถูกใช้เป็นฉนวนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดเล็กได้

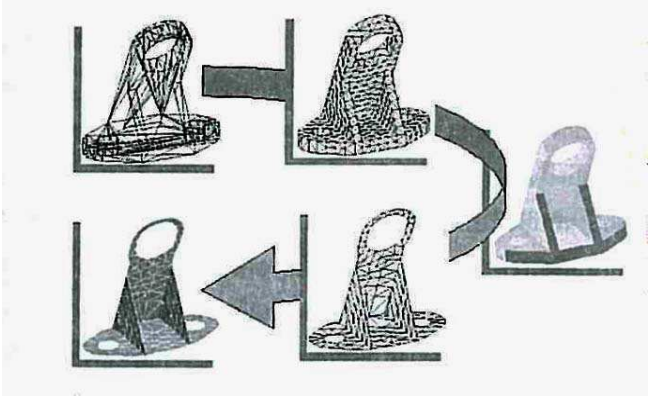
2. เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์

ปริมาณความจุความร้อน รวมถึงกลไกการไหลอย่างง่ายๆ กับความคงรูปขณะไหลทำให้ LCP เป็นที่น่าสนใจในตลาดอิเล็กทรอนิคส์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ใช้ประกอบชิ้นส่วนที่สลับซับซ้อน เพราะตัวมีการทนความร้อนได้สูง LCP ส่วนใหญ่จะถูกใช้ทำ คอนเนคเตอร์ และเนื่องจากมีการทนความร้อน มีพฤติกรรมการหด – ขยายตัวต่ำ และมีความเสถียรภาพดีเยี่ยมเหมาะกับการทำแผ่น Prined Circuit Boards (PCB)

2.4 โปรแกรมจำลองในการวิเคราะห์งานฉีดพลาสติก

เป็นเวลาเกือบ 30 ปีแล้วที่โปรแกรมจำลอง (Simulation Program) สำหรับงานฉีดพลาสติกได้ออกสู่ท้องตลาด โปรแกรมนี้ช่วยให้ผู้ใช้หาสภาวการณ์ฉีด อันได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาในการฉีดที่เหมาะสม ช่วงเวลานั้นแม้ว่าโปรแกรมจำลองจะเป็นที่ยอมรับในระดับหนึ่งแต่ความยุ่งยากในการใช้งานทำให้ไม่เป็นที่นิยมนัก ในเวลาต่อมาได้มีการนำเอา ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับหลักการวิเคราะห์แบบ mid-plane ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ชิ้นงานที่พื้นผิวกลางและให้ค่าความหนาของพื้นผิวนั้น หรือเรียกว่าเป็นการวิเคราะห์แบบ 2.5 มิติ ประกอบกับมีการพัฒนาด้านความเร็วของคอมพิวเตอร์ ทำให้การคำนวณใช้เวลาน้อยลงมาก เป็นผลให้การใช้โปรแกรมจำลองงานฉีดพลาสติกนี้ ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในต่างประเทศ อย่างไรก็ตามหลักการวิเคราะห์แบบ mid-plane ยังคงมีข้อจำกัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของเวลาที่ต้องเสียไป ในการเตรียม mid-plane จากไฟล์ที่รับเข้ามาจากโปรแกรม CAD 3 มิติ (ดูภาพที่ 2.42) ซึ่งขั้นตอนการเตรียมนี้อาจมากถึง 70-80% ของเวลาทั้งหมดตั้งแต่เริ่มรับไฟล์ 3 มิติ จนกระทั่งได้ผลการวิเคราะห์ ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนารูปแบบ การคำนวณแบบใหม่โดยใช้เทคโนโลยี Dual-domain ที่ใช้ shell mesh ผิวด้านนอกของโมเดล 3 มิติ แม้ว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรมจะมากกว่าแบบ mid-plane แต่ไม่ต้องเสียเวลาในการ

เตรียมไฟล์ทำให้ลดเวลาโดยรวมได้อย่างมาก โดยทั่วไปโปรแกรมส่วนใหญ่สามารถรับไฟล์ CAD ได้หลายรูปแบบเช่น IGES, STL, Parasolid, STEP หรือรับไฟล์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เช่น Ansys, Patran, Nastran เป็นต้น



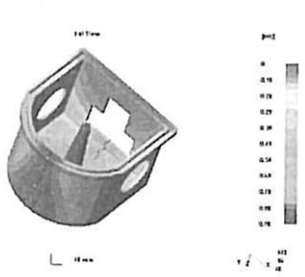
ภาพที่ 2.42
การแก้ไขโมเดลจาก 3 มิติ ให้อยู่ในรูปของ Mid-plane

แม้ว่าอุตสาหกรรมพลาสติกของประเทศไทย จะมีปริมาณการใช้พลาสติกในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพิ่มขึ้นอย่างมาก ทั้งชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์การแพทย์ รวมถึงเครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน แต่ยังคงมีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ในงานด้านต่างๆ น้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งโปรแกรมจำลองในการวิเคราะห์งานฉีดพลาสติก

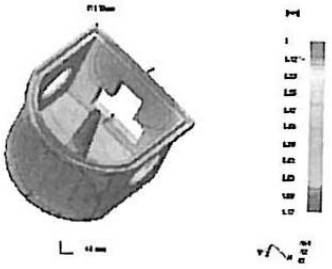
ประโยชน์ของโปรแกรมจำลองคือ เป็นเหมือนเครื่องมือที่ใช้ในการทำนายและขจัดปัญหาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิต ช่วยในการตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบชิ้นงาน การออกแบบแม่พิมพ์ก่อนที่จะเริ่มต้นสร้างแม่พิมพ์จริง ช่วยในการวิเคราะห์หาตำแหน่งและจำนวนทางเข้า (Gate) ที่ถูกต้อง การบาลานซ์ขนาดของทางวิ่ง (Runner) สำหรับแม่พิมพ์ที่มีหลายโพรงแบบคำนวณหาสภาวะในการฉีดที่เหมาะสม เช่น เวลาในการฉีด เวลาและความดันในขั้นตอนฉีดย้ำ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ อุณหภูมิของพลาสติกเหลว จนถึงการแก้ปัญหา ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากสภาวะการฉีดที่ไม่เหมาะสม ได้แก่ การเกิดโพรงอากาศ (Void) การยุบตัว (Sink mark) การอั้นของอากาศ (Air trap) เป็นต้น ช่วยลดขั้นตอนและเวลาที่ต้องเสียไปในการปรับตัวแปรที่หน้าเครื่องฉีดโดยตรง

ตัวอย่างของการนำโปรแกรมจำลองมาช่วยวิเคราะห์ และแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการออกแบบที่ไม่ถูกต้องมีดังนี้

Weld-line และ Air trap ในบางครั้งการเกิด weld-line และ air trap เป็นสิ่งที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ แต่สามารถทำให้ลดน้อยลงหรือเลื่อนไปอยู่ในบริเวณที่ไม่สำคัญได้ เมื่อใช้โปรแกรมเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ ภาพที่ 2.43 แสดงตำแหน่งของ weld-line (แสดงเป็นเส้น) และ air trap (แสดงเป็นจุด) หลังจากที่มีการแก้ไขโดยเพิ่มความหนาของผิวชิ้นงานด้านล่าง และด้านที่ตรงข้ามจุดฉีด (รูปกรวย) เป็นผลให้การไหลของพลาสติกเร็วขึ้นในบริเวณนั้นส่งผลให้การเกิด weld-line ลดลง และตำแหน่งของ air trap เลื่อนไปอยู่ในบริเวณที่สามารถไล่อากาศออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายดังภาพที่ 2.44



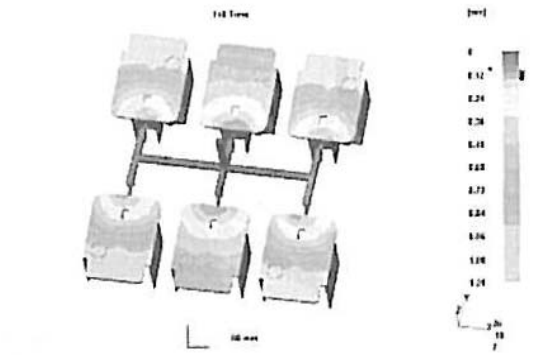
ภาพที่ 2.43
ตำแหน่งของ weld-line และ air trap



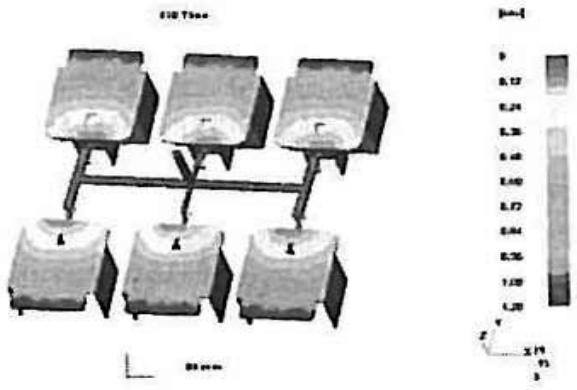
ภาพที่ 2.44
Weld-line และ air trap หลังจากเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน

บาลานซ์ทางวิ่ง สำหรับกรณีที่แม่พิมพ์มีหลายโพรงแบบ (Cavity) ดังแสดงในภาพที่ 2.45 ซึ่งเป็นแม่พิมพ์ที่ยังไม่ได้บาลานซ์ทางวิ่ง ทำให้โพรงแบบที่อยู่ใกล้จุดฉีดเติมเต็มก่อน แรงในการเติมที่ไม่บาลานซ์นี้จะส่งผ่านพลาสติกเข้าไปในโพรงแบบที่เต็มแล้วนี้อีก ขณะที่โพรงแบบที่อยู่ห่างออกไปยังคงเติมไม่เต็ม ทำให้เกิดปัญหาในการปลดชิ้นงานรวมไปถึงปัญหาอีก

หลายๆ อย่าง ได้แก่ การเกิดครีบ ปริมาณการเกิดชั้นผิวแข็ง องศาของการเรียงตัวของโมเลกุล ปริมาณการหดตัว และสมบัติทางกายภาพของแต่ละโพรงแบบจะแตกต่างกัน ภาพที่ 2.46 แสดงแม่พิมพ์ที่ใช้โปรแกรมจำลองเพื่อให้พลาสติกไหลเข้าเติมเต็มแต่ละโพรงแบบพร้อมๆ กัน โดยทำการวิเคราะห์เพื่อเปลี่ยนขนาดของทางวิ่ง คือลดขนาดทางวิ่ง 2 โพรงแบบกลางให้เล็กลง เนื่องจากพลาสติกจะไหลผ่านทางวิ่งที่มีขนาดเล็กได้ช้ากว่าทางวิ่งที่มีขนาดใหญ่ โปรแกรมจะทำการคำนวณเพื่อให้ได้ขนาดทางวิ่งที่เหมาะสม โดยการทำบาลานซ์ความดันของแต่ละโพรงแบบ ซึ่งการคำนวณนั้นเป็นแบบซ้ำไปซ้ำมาหลายๆ รอบจนกระทั่งได้ค่าที่เหมาะสม



ภาพที่ 2.45
การไหลของพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ก่อนจะมีการบาลานซ์การวิ่ง



ภาพที่ 2.46
การไหลของพลาสติกเข้าแม่พิมพ์หลังจากบาลานซ์ทางวิ่งแล้ว