การตรวจเอกสาร

เนื่องจากวิทยานิพนธ์เรื่องมาสเตอร์โมเดลสำหรับแม่พิมพ์ประเภทอิพอคซี่เรซิ่นเติมอลูมิเนียมนี้เกี่ยวข้องกับองค์ความรู้หลายด้านด้วยกันซึ่งสามารถแบ่งแยกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 4 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

แม่พิมพ์ฉีดเป็นแม่พิมพ์ที่มีการนำมาใช้ในการผลิตชิ้นงานพลาสติกกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะกับพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก (thermo plastics) และในปัจจุบันมีการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์ฉีดให้สามารถฉีดชิ้นงานพลาสติกที่ทำจากพลาสติกประเภทเทอร์โมเซทติ้ง (thermosetting plastics) ได้อีกด้วย ทำให้ขอบเขตการใช้งานของแม่พิมพ์ฉีดกว้างขวางยิ่งขึ้น ทำให้มีการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดชนิดต่าง ๆ กันเพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างตามต้องการได้

1. ชนิดของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

ชนิดของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก (ชาลี, 2539; มนตรี, 2529; วิวัฒน์และชัยรัตน์, 2538) มีดังต่อไปนี้

1.1 แม่พิมพ์สองแผ่น (Two Plate Mould)

การทำงานของแม่พิมพ์สองแผ่น (ภาพที่ 1) ในระหว่างรอบการฉีด แม่พิมพ์จะเปิดออกที่ระนาบเดียว ระนาบของการเปิดเรียกว่า เส้นแบ่ง (parting line) จะระบุไว้บนแบบของแม่พิมพ์ (Mould – assembly drawing) โดยสัญลักษณ์ที่นิยมใช้กันอยู่สองแบบคือ สัญลักษณ์ที่ใช้กันอยู่ในประเทศอังกฤษ หรือได้รับอิทธิพลจากประเทศที่ใช้ภาษาอังกฤษ (P/L = parting line) ขณะที่ประเทศอื่นใช้สัญลักษณ์เป็นหัวลูกศรชี้เข้าหาแม่พิมพ์ โดยแม่พิมพ์สองแผ่นมีคุณลักษณะเฉพาะคือ

1.1.1 การออกแบบง่ายที่สุด

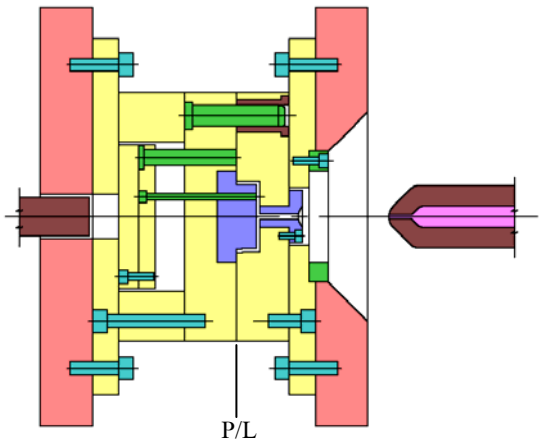
1.1.2 แม่พิมพ์มีสองส่วน

1.1.3 มีเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์เส้นเดียว

1.1.4 เคลื่อนที่เปิดทิศทางเดียว

1.1.5 ปลดชิ้นงานด้วยสลักหรือปลอกปลด

1.1.6 ใช้กับชิ้นงานทุกแบบที่ไม่มีร่องหรือบ่าด้านข้าง (undercut)



ภาพที่ 1 แม่พิมพ์สองแผ่น

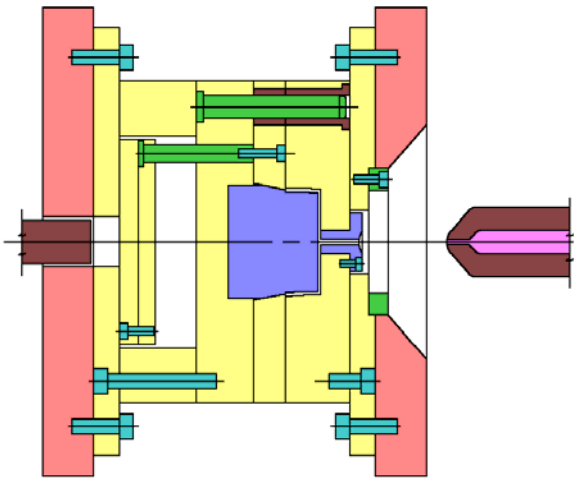
ที่มา: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม [RDiPT] (ม.ป.ป.)

1.2 แม่พิมพ์สามแผ่น (Three Plate Mould)

แม่พิมพ์สามแผ่น (ภาพที่ 2) จะเปิดออกในสองระนาบ ส่วนที่อยู่กับที่ของแม่พิมพ์จะประกอบด้วยแผ่นสองแผ่น แม่พิมพ์สามแผ่นมักจะใช้รูเข้าแบบเข็มซึ่งยอมให้เห็นรอยทางเข้า (gate) น้ำพลาสติกได้เพียงเล็กน้อยบนชิ้นงานที่ใช้แม่พิมพ์สามแผ่นโดยมีคุณลักษณะเฉพาะคือ

1.2.1 การออกแบบคล้ายคลึงกับแม่พิมพ์ฉีดมาตรฐาน แต่ใช้แผ่นปลดในการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

1.2.2 ใช้สำหรับชิ้นงานรูปทรงถ้วยที่ไม่มีร่องหรือบ่าด้านข้าง (ไม่มี undercut)



ภาพที่ 2 แม่พิมพ์สามแผ่น

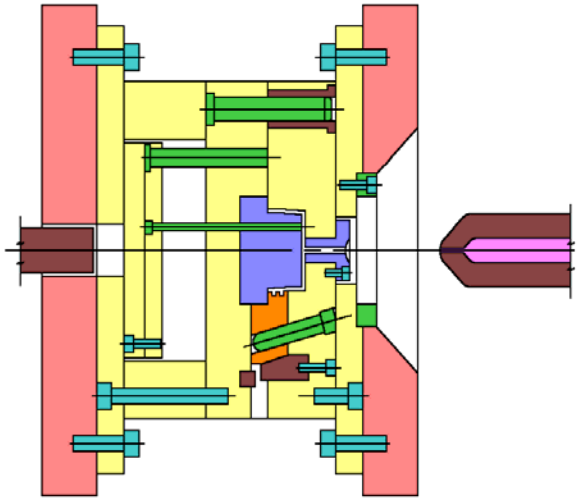
ที่มา: RDiPT (ม.ป.ป.)

1.3 แม่พิมพ์แบบแยก (Split Mould)

แม่พิมพ์แบบแยก (ภาพที่ 3) จะออกแบบให้มีตัวจับ (Jaw) ที่ติดอยู่ที่ส่วนเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์โดยเปิดและปิดได้ด้วยการเปิดและปิดแม่พิมพ์ แม่พิมพ์ชนิดนี้สามารถมีตัวจับตั้งแต่สองอันขึ้นไป แม่พิมพ์แบบแยกจะใช้ในกรณีที่เมื่อเกิด undercut บนชิ้นงานและยอมให้มีรอยเส้นแบ่งบนผิวด้านนอกของชิ้นงานได้และการปลดชิ้นงานด้วยตัวเลื่อนคอร์ (slide core) ไม่อาจทำได้เนื่องจากแพงเกินไป การเคลื่อนที่ของตัวจับสามารถทำเป็นแบบเชิงกลหรือด้วยสปริงหรือทำงานด้วยนิวเมติกหรือไฮดรอลิกส์ ตัวอย่างของแม่พิมพ์ชนิดนี้ก็คือ แม่พิมพ์สำหรับฉีดลังวางของ ในกรณีที่แม่พิมพ์ประกอบด้วยตัวจับสี่อัน เพื่อการเข้ารูปส่วนรอบนอกของลังซึ่งมี undercut ที่ลึกและต่างกันโดยมีคุณลักษณะเฉพาะคือ

1.3.1 การออกแบบคล้ายคลึงกับแม่พิมพ์มาตรฐานแต่มีชุดแท่นเลื่อนกับสลักลูกเบี้ยวที่ใช้สำหรับการเคลื่อนที่เปิดด้านข้างเพิ่มขึ้นมา

1.3.2 ใช้กับชิ้นงานที่มีร่องหรือบ่าด้านข้างหรือเกลียวนอก

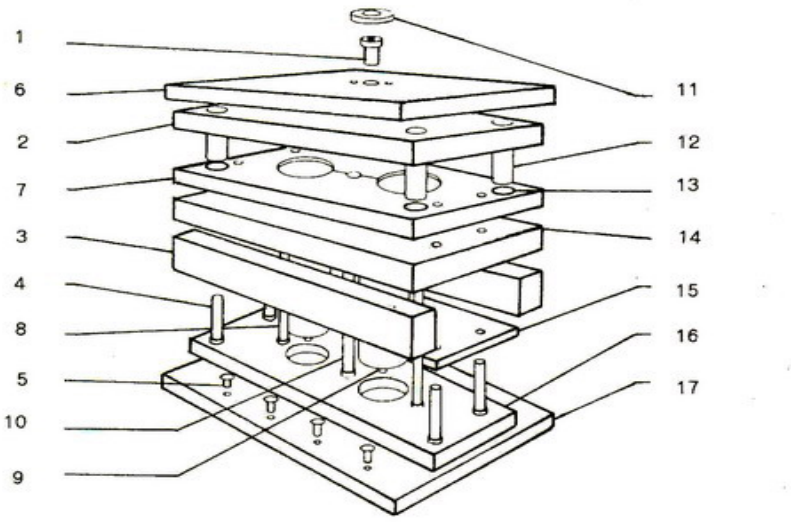


ภาพที่ 3 แม่พิมพ์แบบแยก

ที่มา: RDiPT (ม.ป.ป.)

1.4 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของแม่พิมพ์

แม่พิมพ์ฉีดมีส่วนประกอบย่อย ๆ มากมาย (ภาพที่ 4) เพื่อให้แม่พิมพ์สามารถทำงานผลิตชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และแม่พิมพ์แต่ละชนิดก็จะมีส่วนประกอบย่อย ๆ ที่แตกต่างกันเพื่อช่วยให้สามารถผลิตชิ้นงานได้ตามต้องการดังนั้นจะขอกล่าวถึงส่วนประกอบพื้นฐานของแม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่นเท่านั้น



ภาพที่ 4 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของแม่พิมพ์

ที่มา: ชาลี (2539)

จากภาพที่ 4 ส่วนประกอบต่าง ๆ มีดังนี้

หมายเลข 1 ปลอกรูฉีด
หมายเลข 2 แผ่นคาวิตี้
หมายเลข 3 แท่งรอง (spacer)
หมายเลข 4 สลักดันกลับ
หมายเลข 5 สลักปะทะ
หมายเลข 6 แผ่นยึดด้านหน้า
หมายเลข 7 แผ่นคอร์
หมายเลข 8 สลักปลด
หมายเลข 9 ปลอกรองรับ
หมายเลข 10 สลักดึงแกนรูฉีด
หมายเลข 11 แหวนบังคับศูนย์
หมายเลข 12 เพลานำ
หมายเลข 13 ปลอกนำ
หมายเลข 14 แผ่นรองหลัง
หมายเลข 15 แผ่นยึดตัวปลด
หมายเลข 16 แผ่นดันปลด
หมายเลข 17 แผ่นยึดด้านหลัง

2. วิธีการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

เมื่อชิ้นงานพลาสติกที่ต้องการผลิต ได้ถูกออกแบบและแก้ไขจนเป็นที่พอใจแล้ว สิ่งที่ต้องทราบต่อมาคือ โครงสร้างภายนอก ความหนาของชิ้นงาน ตำแหน่งที่จะมีลายนูน หู สัน ฯลฯ การคาดคะเนจำนวนที่จะผลิตได้ตลอดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์และจำนวนการผลิตที่ต้องการต่อช่วงเวลาที่กำหนด เมื่อทราบสิ่งเหล่านี้ทั้งหมดแล้วจึงจะเริ่มออกแบบแม่พิมพ์ฉีดได้

2.1 การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก จะต้องคำนวณหาจำนวนอิมเพรสชั่น (impression) ซึ่งเป็นโพรงภายในที่เกิดจากเนื้อพลาสติกที่ถูกฉีดเข้าไปในชิ้นส่วนที่เป็นเบ้าหรือคาวิตี้ (cavity) และชิ้นส่วนที่เป็นคอร์ (core) และเย็นตัวลงได้ชิ้นงานพลาสติก การคำนวณจำนวนอิมเพรสชั่นขึ้นอยู่กับเวลาทำงานและเวลาที่ต้องการในการผลิตจำนวนชิ้นที่ต้องการ

2.2 วิธีทำคาวิตี้และคอร์เพื่อยึดติดกับส่วนของแม่พิมพ์มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ขอกล่าวเพียง 2 วิธีคือ

2.2.1 แบบชิ้นเดียว (integer method) เป็นแบบที่แผ่นคาวิตี้และคอร์ทำขึ้นจากแผ่นเหล็กใหญ่ชิ้นเดียวกันตลอด ซึ่งจะกลายเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างแม่พิมพ์

2.2.2 แผ่นคาวิตี้และคอร์สามารถทำขึ้นจากแผ่นเหล็กเล็ก ๆ ซึ่งเรียกว่าอินเสิร์ท (insert) และหลังจากนั้นจึงนำไปประกอบยึดกับแผ่นยึดอินเสิร์ท (bolster)

การทำคาวิตี้และคอร์ประกอบแม่พิมพ์จะเลือกแบบไหนนั้นขึ้นกับผู้ออกแบบและการใช้งานของแม่พิมพ์

2.3 การคำนวณแรงยึดแม่พิมพ์ (Locking force requirement)

แรงยึดตามทฤษฎี คือ

$$P_n = \frac{A_p \times P_c}{100} \quad \text{..... (1)}$$

สัญลักษณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาแรงยึด

P_n = แรงยึด (กิโลนิวตัน, kN)

A_p = พื้นที่ฉายภาพของแบบที่จะผลิต (ของทุกอิมเพรสชั่นในแม่พิมพ์) (ตารางเซนติเมตร, cm^2)

P_c = ความดันในอิมเพรสชั่น (บาร์, bar)

$$P_n = A_p \times P_c \text{ มีหน่วย } = (cm^2 \times bar) = \frac{(cm^2 \times kg)}{cm^2} = 10\ N = \frac{1\ kN}{100}$$

แต่ในทางปฏิบัติ เพื่อความปลอดภัยในการทำงานควรคิดแรงยึดให้มีค่าเกินกว่าทางทฤษฎี 20 - 30 %

m = การใช้งานของเครื่อง (Machine Utilization) (เปอร์เซ็นต์, %)

ดังนั้นสูตรการหาแรงยึด ที่จะนำไปใช้ คือ

$$P_n = \frac{A_p \times P_c}{m \times 100} \quad \text{..... (2)}$$

2.4 การคำนวณหาน้ำหนักเนื้อพลาสติกที่จะฉีดเข้าแม่พิมพ์ (shot weight requirement) มีสูตรในการคำนวณดังนี้

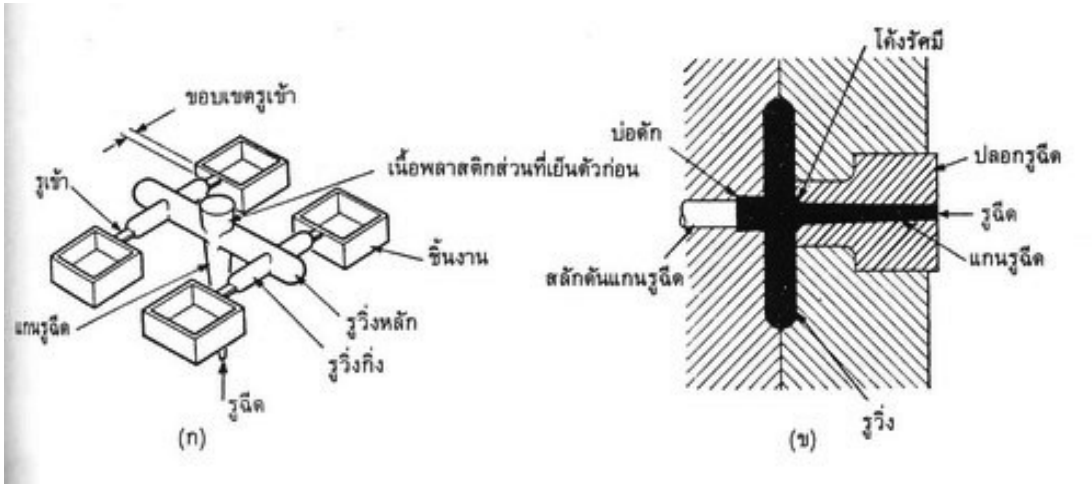
น้ำหนัก = ปริมาตร x ความหนาแน่น ..... (3)

โดยที่ น้ำหนัก หมายถึง น้ำหนักเนื้อพลาสติกที่จะฉีดเข้าแม่พิมพ์ (กรัม, g)

ความหนาแน่น หมายถึง ความหนาแน่นของวัตถุดิบ (กิโลกรัม, kg/cm^3)

ปริมาตร หมายถึง ปริมาตรของชิ้นงาน (ลูกบาศก์เซนติเมตร, cm^3)

2.5 รูฉีด (sprue) ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับน้ำหนักของชิ้นงานซึ่งต้องคำนึงถึงความยาวและพื้นที่หน้าตัดรูฉีดด้วย รูฉีดเรียวสามารถรับแรงดันได้สูงจนกว่าชิ้นงานจะแข็งตัว และจะถูกตัดทิ้งภายหลัง (ดำรงค์, 2539) (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 รูฉีดเรียว

ที่มา: ชาลี (2539)

2.6 ทางวิ่ง (runner) คือส่วนหนึ่งของระบบกระจายเนื้อพลาสติก หมายถึงระยะจากหัวฉีดถึงทางเข้า อิมเพรสชั่น

2.6.1 การเลือกใช้ขนาดทางวิ่งกับพลาสติกชนิดต่าง ๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การใช้ขนาดทางวิ่งกับพลาสติกชนิดต่าง ๆ (ค่าแนะนำ)

ชนิดของพลาสติก	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง		ชนิดของพลาสติก	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง	
	ม.ม.	นิ้ว		ม.ม.	นิ้ว
ABS, SAN	5.0 - 10.0	3/16-3/8	Polycarbonate	5.0 - 10.0	3/16-3/8
Acetal	3.0 - 10.0	1/8-3/8	Polyester (unreinforced)	3.0 - 8.0	1/8-5/16
Acetate	5.0 - 11.0	3/16-7/16	Polyester	5.0 - 10.0	3/16-3/8
Acrylic	8.0 - 10.0	5/16-3/8	Polyethylenc	2.0 - 10.0	1/16-3/8
Butyratc	5.0 - 10.0	3/16-3/8	Polyamide	5.0 - 10.0	3/16-3/8

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดของพลาสติก	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง		ชนิดของพลาสติก	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง	
	ม.ม.	นิ้ว		ม.ม.	นิ้ว
Fluoracarbon	5.0 - 10.0	3/16-3/8	Polyphenylenc oxide	6.0 - 10.0	1/4-3/8
Imact acrylic	8.0 - 13.0	5/16-1/2	Polypropylenc	5.0 - 10.0	3/16-3/8
Ionomers	2.0 - 10.0	3/32-3/8	Polystyrene	3.0 - 10.0	1/8-3/8
Nylon	2.0 - 10.0	1/16-3/8	Polysulfone	6.0 - 10.0	1/4-3/8
Phenylene	6.0 - 10.0	1/4 -3/8	Polyvinyl (plasticized)	3.0 - 10.0	1/8-3/8
Phenylene sulfide	6.0 - 13.0	3/16-3/8	PVC Rigid	6.0 - 16.0	1/4-5/8

ที่มา: RDiPT (ม.ป.ป.)

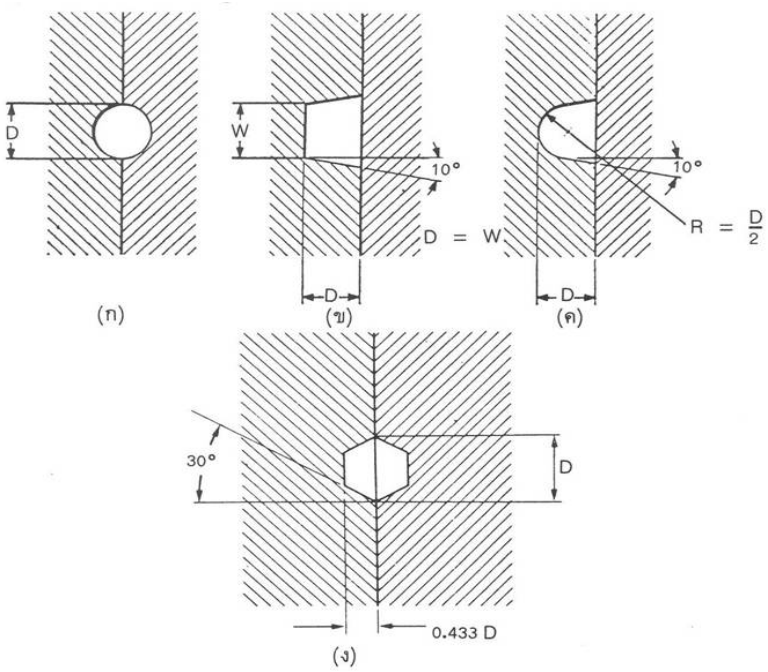
2.6.2 การคำนวณหาขนาดทางวิ่งโดยการใช้สูตร

$$D = \frac{W^{1/2} \times L^{1/4}}{3.7} \quad \text{..... (4)}$$

โดยที่ D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูวิ่ง (ม.ม.)

W = น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)

L = ความยาวของทางวิ่ง (ม.ม.)



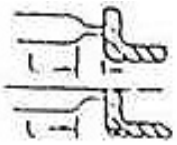
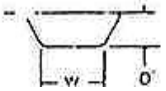
ภาพที่ 6 ทางวิ่งแบบต่าง ๆ (ก) แบบกลม (ข) แบบสี่เหลี่ยมคางหมู
(ค) แบบสี่เหลี่ยมคางหมูแปรและ (ง) แบบหกเหลี่ยม

ที่มา: ชาลี (2539)

2.7 ทางเข้า (gate) เป็นตัวกำหนดคุณภาพของชิ้นงานต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับน้ำหนักของชิ้นงาน โดยต้องคำนึงถึงชนิดและตำแหน่งทางเข้ามีหลายแบบด้วยกัน การเลือกใช้ก็ขึ้นอยู่กับความต้องการในการออกแบบแม่พิมพ์และรูปร่างชิ้นงานที่จะทำการผลิต การเลือกใช้ทางเข้าและทางวิ่งตามน้ำหนักของชิ้นงาน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ขนาดทางวิ่งและทางเข้าและน้ำหนักของชิ้นงาน (ค่าแนะนำ)

หน่วย: มิลลิเมตร

ทางวิ่ง (runner)	ทางเข้า (gate)			Gate Land	หมายเหตุ
	Pin Point		Normal (W x D)		น้ำหนักชิ้นงาน (กรัม)
	ตั้งแต่	ถึง			
4 to 6	0.6	0.8	$0.8_{0}^{+0.2}$ x $1.5_{0}^{+0.5}$	$0.8_{0}^{+0.3}$	< 150
8	0.8	1.2	$1_{0}^{+0.5}$ x 2_{0}^{+1}	$0.8_{0}^{+0.3}$	< 350
8 to 12	1.0	1.6	2_{0}^{+1} x 3_{0}^{+2}	$0.8_{0}^{+0.3}$	< 350
6 to 8	0.6	1.0	$1.0_{0}^{+0.5}$ x $1.5_{0}^{+0.5}$	$0.8_{0}^{+0.3}$	< 150
8 to 10	1.0	1.4	$1.2_{0}^{+0.5}$ x $2_{0}^{+1.0}$	$0.8_{0}^{+0.3}$	< 350
10 to 14	1.4	1.8	$2.5_{0}^{+0.5}$ x $4_{0}^{+3.0}$	$0.8_{0}^{+0.3}$	< 350

ที่มา: บรรเลงและชาตรี (ม.ป.ป.)

2.8 การระบายอากาศ ช่องระบายอากาศจะมีก็ต่อเมื่อเนื้อพลาสติกที่ฉีดเข้าแม่พิมพ์ทำให้อากาศภายในซึ่งถูกแทนที่ด้วยเนื้อพลาสติกไม่สามารถไหลออกได้จะอัดตัวอยู่ทำให้เกิดจุดบอดในการไหลจึงควรมีการระบายอากาศแต่สำหรับชิ้นงานบางรูปแบบก็ไม่จำเป็นต้องมีช่องระบายอากาศ ขนาดรูระบายอากาศของแม่พิมพ์ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ขนาดรูระบายอากาศของแม่พิมพ์ (ค่าแนะนำ)

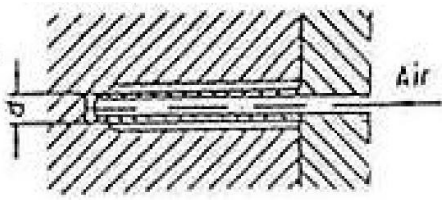
ชนิดของพลาสติก	ความลึก (ม.ม.)	ชนิดของพลาสติก	ความลึก (ม.ม.)
ABS	0.01-0.03	PP	0.01-0.025
POM	0.01-0.02	PS	0.01
PPD	0.02-0.03	SB	0.03
PPS	0.01-0.03	PC	0.02-0.03
SAN	0.03	PA	0.01-0.03
ASA	0.03	PE	0.01-0.025
PVC	0.03-0.05	PA (Glassfiber filled)	0.01-0.03
PBTP	0.01-0.03	Nylon	0.005-0.015

ที่มา: RDiPT (ม.ป.ป.)

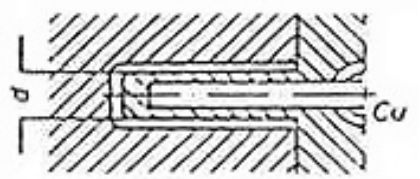
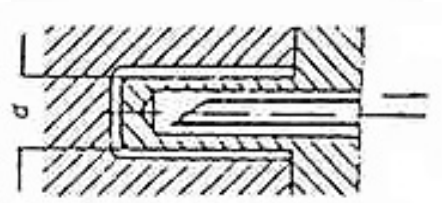
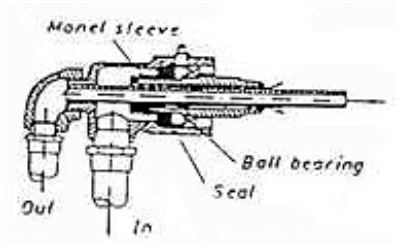
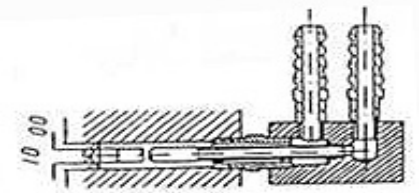
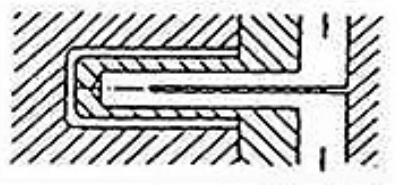
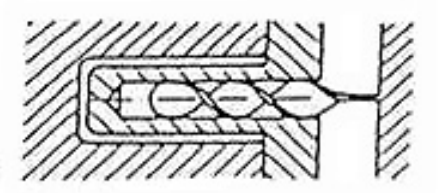
2.9 ระบบปลดชิ้นงาน เนื่องจากการหดตัวของเนื้อพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนรัดตัวแน่นบนแกน ซึ่งเป็นปัญหาเมื่อชิ้นงานเย็น จึงต้องมีระบบปลดชิ้นงาน ซึ่งมีหลายแบบด้วยกันการเลือกใช้ก็ขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่างและความต้องการของชิ้นงานรวมถึงราคาด้วย

2.10 การหล่อเย็น เพื่อควบคุมอุณหภูมิเนื่องจากอุณหภูมิของแม่พิมพ์มีผลต่อความเร็วในการฉีด การยืดหดตัวและคุณภาพผิวของชิ้นงาน การออกแบบระบบหล่อเย็นดังตารางที่ 4

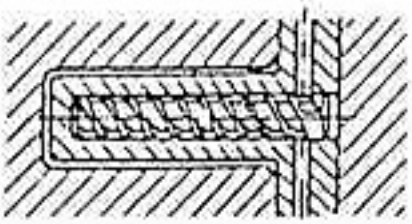
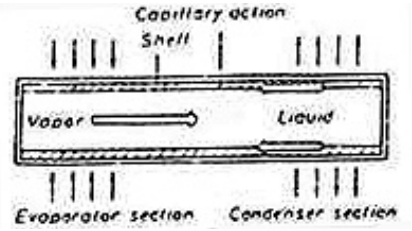
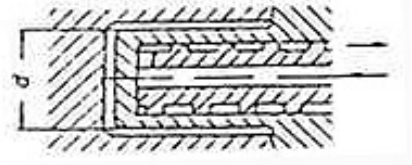
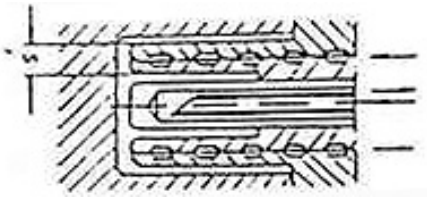
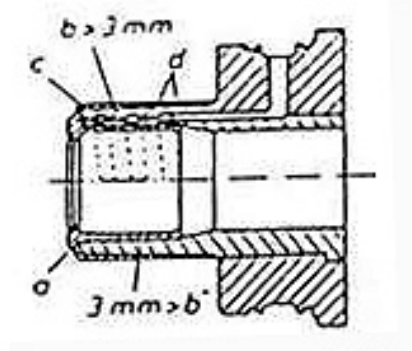
ตารางที่ 4 การออกแบบระบบหล่อเย็นในแม่พิมพ์

แบบที่	เส้นผ่าศูนย์กลางหรือความกว้างของคอร์	ลักษณะเฉพาะ	การออกแบบ
1	$\geq$ 3 ม.ม.	ถ่ายเทความร้อนออกโดยลมจากภายนอกขณะเปิดแม่พิมพ์ การหล่อเย็นแบบต่อเนื่องได้เฉพาะกับชิ้นงานรูปร่างคล้ายท่อ	

ตารางที่ 4 (ต่อ)

แบบที่	เส้นผ่าศูนย์กลางหรือความกว้างของคอร์	ลักษณะเฉพาะ	การออกแบบ
2	≥ 5 ม.ม.	แท่งโลหะที่นำความร้อนจะต่อไปถึงท่อหล่อเย็นโคนของแท่งหล่อเย็นควรทำให้ใหญ่	
3	≥ 8 ม.ม.	ทำเป็นแบบน้ำพุหรือแบบพ่นท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 4 มม. ควรตัดปลายเฉียง	
4		แบบน้ำพุ หรือแบบพ่น ID = OD/2	
5		แบบน้ำพุ หรือแบบพ่นสำหรับคอร์ที่มีการหมุนเพื่อคลายเกลียว	
6		แบบแผ่นกั้น	
7		แบบแผ่นกั้นบิดเป็นเกลียว	

ตารางที่ 4 (ต่อ)

แบบที่	เส้นผ่าศูนย์กลางหรือความกว้างของคอร์	ลักษณะเฉพาะ	การออกแบบ
8		แกนที่มีร่องขดเป็นเกลียวปากเดียวหรือสองปากใส่แบบหลวม ๆ เข้าไปในคอร์เป็นชิ้นส่วนมาตรฐาน	
9		แท่งถ่ายเทความร้อน มีขนาดตั้งแต่ 3 ม.ม. ภายในบรรจุของเหลวนำความร้อน	
10	> 40 ม.ม.	หล่อเย็นแบบร่องเกลียว	
11	คอร์ด้านใน S > 4 ม.ม.	แบบร่องเกลียวคู่ และแบบน้ำพุ	
12		a. ชิ้นงาน b. ปลอกโลหะผสมทองแดงผสมเบริลเลียม หนา < 3 ม.ม. c. ช่องหล่อเย็นแบบเกลียว d. ชิ้นส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม หนา 3 ม.ม.	

ที่มา: วิวัฒน์และชัยรัตน์ (2538)

การสร้างต้นแบบรวดเร็ว

ในภาคธุรกิจอุตสาหกรรมการผลิตในปัจจุบันมีความต้องการในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงขึ้น ช่วยให้ต้นทุนในการผลิตลดลงและยังสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาดได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น จึงมีความจำเป็นต้องสร้างต้นแบบเพื่อวัตถุประสงค์หลายอย่าง เช่น เพื่อการเรียนรู้ การสื่อสาร การทำงานร่วมกันของชิ้นส่วนต่าง ๆ และการเน้นเป้าหมาย เพื่อใช้ทดสอบว่าชิ้นงานต้นแบบที่สร้างขึ้นนั้นตรงตามความต้องการที่ได้ทำการออกแบบไว้หรือไม่ หรือเพื่อใช้ทดสอบสมรรถนะการทำงานและความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ หรือเพื่อใช้ทดสอบขีดความสามารถของกระบวนการผลิตจริง (ฉัตรชัย, 2546; มณฑลี, 2546)

1. วิธีการทำต้นแบบ โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 3 วิธี คือ

1.1 วิธีอัดขึ้นรูป (Compressive Process) ทำต้นแบบโดยการหล่อ ทุบ หรือปั๊มขึ้นรูปวัสดุโดยใช้แม่พิมพ์เป็นแบบ ซึ่งจะใช้เวลามากเพราะต้องทำแม่พิมพ์ก่อน และไม่สามารถทำต้นแบบที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

1.2 วิธีหักออก (Subtractive Process) โดยการนำก้อนวัสดุมากัดเอาเนื้อวัสดุออกให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการโดยใช้เครื่องมือทั่วไป ซึ่งใช้เวลาค่อนข้างนานในการทำต้นแบบ แต่ก็ยังไม่สามารถทำต้นแบบที่มีรูปร่างซับซ้อนมาก ๆ ได้ โดยเฉพาะเมื่อพื้นผิวที่ต้องการเอาออกมีส่วนอื่นบดบังอยู่

1.3 วิธีเพิ่มเข้า (Additive Process) เป็นวิธีที่ใช้ทำต้นแบบรวดเร็ว (Rapid Prototype, RP) ทำโดยการเติมวัสดุลงตามพื้นที่ภาคตัดขวางในแนวนอนของต้นแบบทีละชั้น เป็นวิธีที่สามารถสร้างต้นแบบได้รวดเร็วและมีรูปร่างซับซ้อนได้และใช้เวลาน้อย แต่มีข้อจำกัดเรื่องวัสดุที่ใช้ทำต้นแบบ (ฉัตรชัย, 2546)

2. ต้นแบบรวดเร็ว (Rapid Prototype, RP)

ต้นแบบรวดเร็ว (Rapid Prototype, RP) ได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อวกาศยาน การแพทย์ และเพื่อการอุปโภคบริโภคเป็นต้น การใช้ RP ในอุตสาหกรรมแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ การทำต้นแบบของผลิตภัณฑ์ (Prototyping) การทำเครื่องมืออย่างรวดเร็ว (Rapid Tooling, RT) และการทำการผลิตอย่างรวดเร็ว (Rapid Manufacturing, RM) อย่างไรก็ตามชิ้นงานต้นแบบที่สร้างขึ้นอาจนำไปใช้โดยตรงเพื่อให้มองเห็น

ภาพผลิตภัณฑ์ชัดเจนขึ้นหรือใช้เป็นต้นแบบสำหรับงานต่อไป แต่โดยมากมักใช้เป็นแม่แบบ (pattern) เพื่อสร้างแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์ต่อไป (ฉัตรชัย, 2546)

เทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็วมีหลายรูปแบบ ในปัจจุบันมีบริษัทประมาณ 30 บริษัททั่วโลก และทุกชนิดมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ (1) คอมพิวเตอร์และโปรแกรมการแยกตัดชั้นชิ้นงาน (2) ระบบควบคุมการทำงานและการเคลื่อนที่ด้วยคอมพิวเตอร์ และ (3) เครื่องจักร (ฉัตรชัย, 2546; มณฑลี, 2546)

2.1 กระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยเครื่องสร้างต้นแบบรวดเร็ว

ในการเตรียมแบบและสร้างชิ้นงานด้วยเครื่องสร้างต้นแบบรวดเร็วแต่ละประเภทนั้นจะมีหลักการในการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน แต่ลักษณะของกระบวนการจะคล้ายคลึงกัน โดยมีขั้นตอนที่สำคัญดังนี้คือ

2.1.1 ออกแบบชิ้นงาน 3 มิติด้วยคอมพิวเตอร์ (3D CAD) จากโปรแกรมสร้างชิ้นงาน 3 มิติ

2.1.2 นำไฟล์ชิ้นงานจาก 3D CAD มาแปลงให้เป็นไฟล์สเตอริโอไลโธกราฟฟี (stereolithography file หรือไฟล์ .stl) ซึ่งเป็นไฟล์ที่เก็บข้อมูลรูปสามเหลี่ยมหลาย ๆ รูปที่ประกอบกันเป็นพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งจะประกอบด้วย เวคเตอร์ที่บอกทิศทางของผิวด้านนอกของวัตถุ (facet normal) และตำแหน่งพิกัดของจุดยอดของสามเหลี่ยมทั้งสามจุด (vertex) ซึ่งเรียงตามกฎมือขวาหรือเรียงทวนเข็มนาฬิกา

2.1.3 เครื่องสร้างต้นแบบรวดเร็วจะต้องใช้ร่วมกับโปรแกรมของเครื่อง ซึ่งจะแบ่งไฟล์ .stl ที่ทำการแปลงมานั้น ออกเป็นหลาย ๆ ไฟล์ เป็นชั้น ๆ ตามพื้นที่ภาคตัดขวางในแนวนอนของแบบชิ้นงาน แล้วจัดเก็บไว้ในรูปไฟล์ .sli (slice) หลาย ๆ ไฟล์ ซึ่งได้จากการเฉือนชิ้นงานให้เป็นชั้น ๆ เท่า ๆ กันตามความหนาที่กำหนด

2.1.4 โปรแกรมของเครื่องจะทำการรวบรวมไฟล์ .sli ไว้ในไฟล์สร้างต้นแบบ (build file) ซึ่งจะใช้เป็นคำสั่งให้สร้างต้นแบบในเครื่องสร้างต้นแบบรวดเร็ว โดยโปรแกรมจะทำการคำนวณขอบเขตของพื้นที่หน้าตัดแต่ละชั้นรวมทั้งเส้นทางการสแกน (scan path) ที่ใช้ขึ้นรูปแต่ละชั้นเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่และการทำงานของเครื่อง

2.1.5 เตรียมเครื่องสร้างต้นแบบรวดเร็วให้พร้อม คือเตรียมวัสดุและปรับเงื่อนไขต่าง ๆ ในการสร้างต้นแบบที่ต้องการ

2.1.6 เครื่องสร้างต้นแบบรวดเร็วจะทำการสร้างต้นแบบทีละชั้นจากไฟล์สร้างต้นแบบจนได้ต้นแบบที่สมบูรณ์ ซึ่งใช้เวลาน้อยมาก

2.1.7 นำชิ้นงานต้นแบบมาทำความสะอาดและตกแต่งผิว เช่น ขัดผิวชิ้นงานตามต้องการ

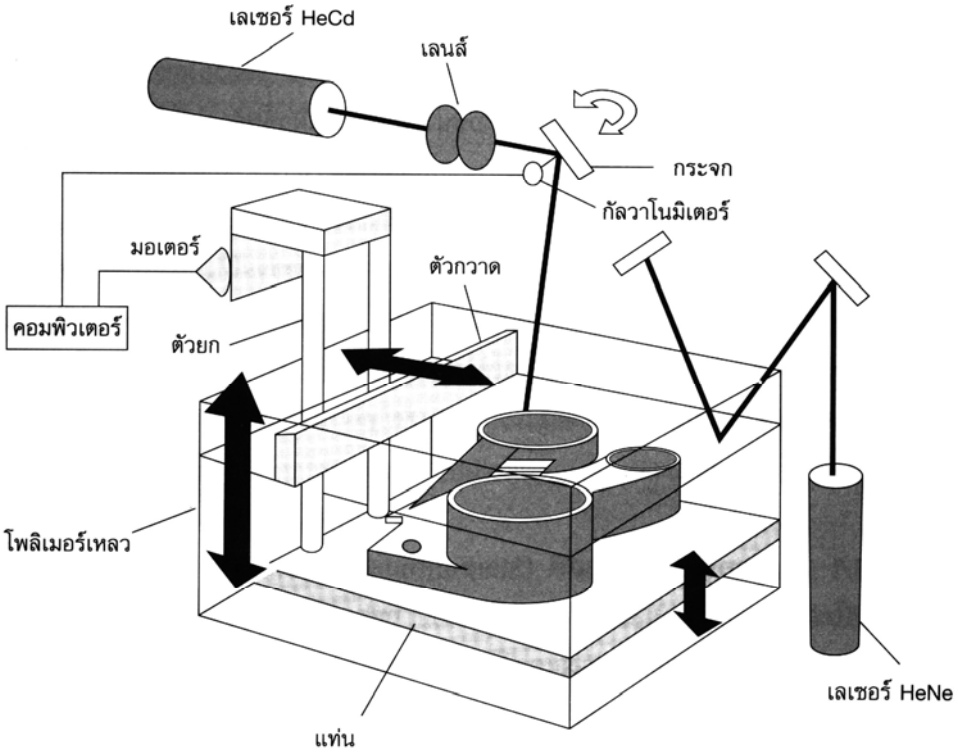
นอกจากนี้ในบางโปรแกรมยังอนุญาตให้ผู้ใช้ย่อหรือขยายขนาดชิ้นงานหรือตัดแบ่งเป็นชิ้นงานใหญ่เป็นชิ้นย่อย ๆ เพื่อนำมาประกอบภายหลังได้ ส่วนบางชนิดจะคำนวณการสร้างฐานและโครงสร้างพยุง สำหรับปรับระดับชิ้นงานและรองผิวชั้นล่างของชิ้นงานไม่ให้เสียหายจากการแกะออกจากแท่น (มณฑลี, 2546)

2.2. การขึ้นรูปของเทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็ว

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็วมีหลายลักษณะ ซึ่งมีวิธีการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน ซึ่งแบ่งเป็นวิธี 6 วิธีหลัก ๆ (ฉัตรชัย, 2546; มณฑลี, 2546) ดังนี้

2.2.1 สเตอริโอไลโธกราฟฟี (Stereolithography) หรือ สเตอริโอไลโธกราฟฟี แอพพาราทัส (Stereolithography Apparatus, SLA)

ก. หลักการทำงานของ SLA (ภาพที่ 7) มีดังนี้ รูปต้นแบบในไฟล์ .stl จะถูกตัดออกเป็นชั้น ๆ ตามแนวนอน เป็นภาคตัดขวางสองมิติที่มีความหนา ซึ่งจะถูกเก็บไว้ในไฟล์ .sli ซึ่งจะถูกนำมารวมกันในไฟล์สร้าง (build file) และทำการสร้างชิ้นงานด้วยการปล่อยลำแสงเลเซอร์อัลตร้าไวโอเลท (ultra -violet laser) ไปยังเรซิ่นเหลวที่ไวต่อแสง (photopolymer) ให้แข็งตัวทีละชั้นจนได้เป็นรูปทรงที่ต้องการ โดยเริ่มจากการจุ่มแท่นรองต้นแบบ (platform) ในอ่างบรรจุเรซิ่นเหลวให้เรซิ่นเหลวท่วมแท่นรองต้นแบบสูงเท่ากับความหนาของภาคตัดขวางชั้นแรกของชิ้นงาน แล้วปล่อยลำแสงเลเซอร์ไปยังตามขอบ (boundary) และตามด้วยเนื้อของชิ้นงาน ทำให้เรซิ่นส่วนนั้นแข็งตัวเป็นชั้นแรก ทำให้ลดแรงตึงผิวและทำให้ผิวหน้าเรียบขึ้น จากนั้นแท่นวางชิ้นงานจะเลื่อนลงและสร้างชั้นต่อ ๆ ไปด้วยวิธีเดียวกัน ชิ้นงานที่สร้างขึ้นจะเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกันจนได้เป็นชิ้นงานต้นแบบ หลังจากนำชิ้นงานออกจากแท่นเครื่องแล้วจะต้องนำมาทำการบ่มชิ้นงาน (post-curing) ด้วยแสงอัลตร้าไวโอเลทอีกครั้งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน จากนั้นจึงนำมาตกแต่งผิว



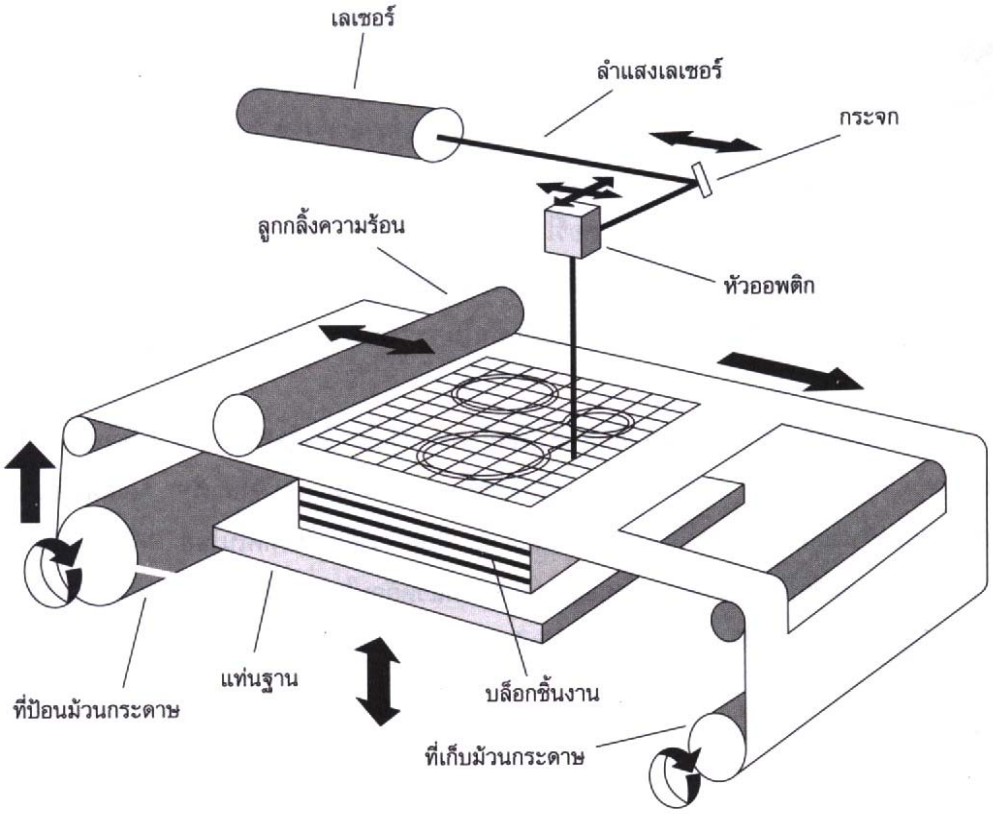
ภาพที่ 7 หลักการของสเตอริโอไลโธกราฟฟี
ที่มา:มณฑลี (2546)

ข. ข้อดีของวิธีนี้คือ ให้ความละเอียดแม่นยำถึง 0.001 มิลลิเมตร ให้รายละเอียดและผิวเรียบดี และสามารถผลิตต้นแบบได้ทุกรูปร่าง ข้อเสียคือ ชิ้นงานค่อนข้างบิดงอง่าย เรซิ่นมีความเป็นพิษ ต้นแบบที่ทำจากโพลิเมอร์บางชนิดจะบวมเมื่อโดนความชื้น และโครงค้ำยันต้องถูกออกแบบและสร้างพร้อมต้นแบบ

2.2.2 การสร้างต้นแบบด้วยกระดาษเคลือบ (Laminated Object Manufacturing, LOM)

ก. หลักการทำงานของ LOM (ภาพที่ 8) มีดังนี้ รูปต้นแบบในไฟล์ .stl จะถูกตัดออกเป็นชั้น ๆ ตามแนวนอนโดยโปรแกรม LOMSlice ซึ่งความหนาของแต่ละชั้นจะเท่ากับความหนาของแผ่นวัสดุที่ใช้ทำต้นแบบ โดยปกติจะใช้กระดาษเคลือบด้วยโพลีเอทิลีน (polyethylene) ด้านหนึ่งซึ่งเมื่อถูกความร้อนจะทำหน้าที่เป็นสารยึดติดหรือกาว โดยใช้ลำแสงเลเซอร์อินฟราเรดที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide, CO_2) ตัดกระดาษตามเส้นรอบรูปของชิ้นงานทีละชั้น ส่วนที่ไม่ใช่เนื้องานจะถูกแสงเลเซอร์ตัดเป็นลูกบาศก์เล็ก ๆ เพื่อง่ายต่อการแกะออกจากชิ้นงาน หลังการทำแต่ละชั้นจะมีลูกกลิ้งร้อน (heated bonding roller) กลิ้งทับด้วยความดันเพื่อให้โพลีเอทิลีนเปลี่ยนเป็นกาวยึดติดกับกระดาษชั้นล่าง จากนั้นแท่นรองต้นแบบจะถูกเลื่อนลงเท่า

ความหนาของกระดาษ และกระดาษแผ่นใหม่จะถูกดึงมาวางเพื่อสร้างชิ้นงานชั้นต่อ ๆ ไป ชิ้นงานที่ได้จะมีความแข็งและมีลักษณะคล้ายไม้ สามารถนำไปตกแต่งผิวได้ด้วยเครื่องมืองานไม้ทั่วไป



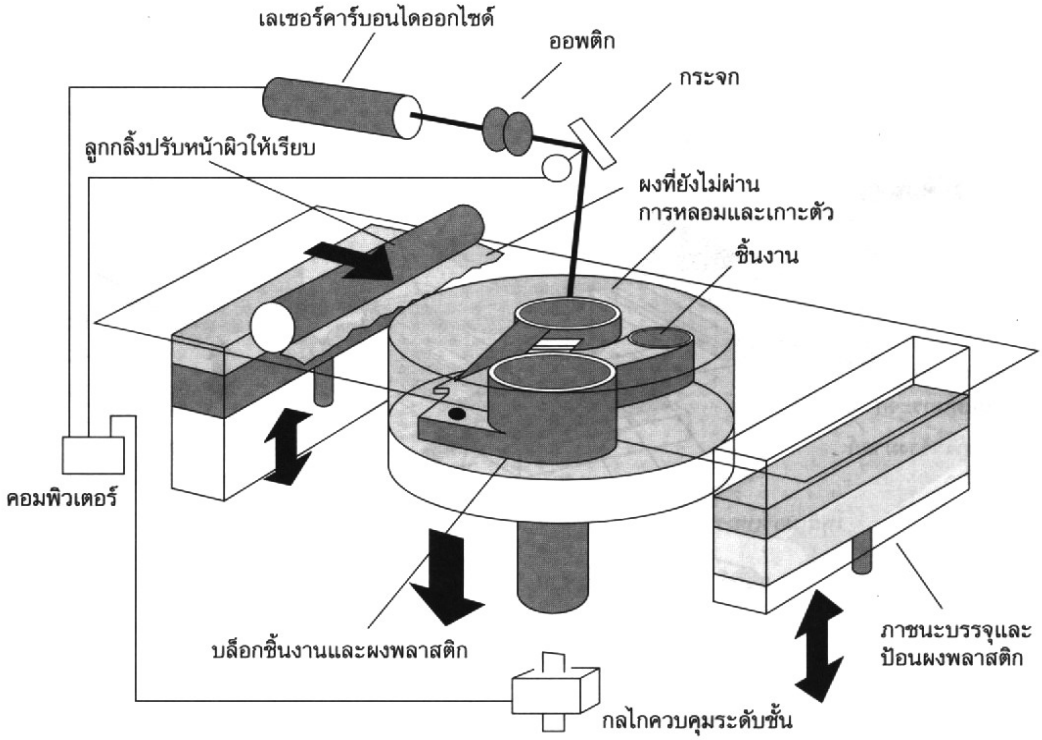
ภาพที่ 8 การสร้างต้นแบบด้วยกระดาษเคลือบ
ที่มา: มณฑลี (2546)

ข. ข้อดีของวิธีนี้คือ ไม่ต้องทำการบ่ม (posting-curing) ไม่ต้องสร้างโครงค้ำยัน (support) เป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็วและประหยัด เหมาะสำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่และสามารถใช้วัสดุได้หลายชนิดเช่น กระดาษ พลาสติก เซรามิกส์ และ คอมโพสิท ฯลฯ ข้อเสียคือ ต้นแบบดูดรับความชื้น ผิวไม่เรียบเหมือนกับวิธีอื่น ไม่สามารถสร้างต้นแบบที่ซับซ้อนและมีรูกลวงได้

2.2.3 การหลอมด้วยแสงเลเซอร์ (Selective Laser Sintering, SLS)

ก. หลักการทำงานของ SLS (ภาพที่ 9) คือ รูปต้นแบบในไฟล์ .stl จะถูกตัดออกเป็นชั้น ๆ ตามแนวนอน วัสดุผงที่เก็บไว้ในกระบอกสูบจะถูกเพิ่มอุณหภูมิจนใกล้จุดหลอมเหลวแล้วถูกลูกกลิ้งดันมายังกระบอกสูบที่ใช้สร้างชิ้นงาน โดยลูกกลิ้งจะเกลี่ยทับผงวัสดุเป็นชั้นบาง ๆ สม่ำเสมอ จากนั้นจึงยิงแสงเลเซอร์ลงบนผงวัสดุตามพื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นงาน พลังงานของแสงเลเซอร์จะหลอมอนุภาคของผงวัสดุให้ติดกัน จากนั้นกระบอกสูบที่เก็บผงวัสดุจะ

เลื่อนขึ้นและกระบอกสูบที่สร้างชิ้นงานจะเลื่อนลงเพื่อสร้างชิ้นงานชั้นต่อไป การทำต้นแบบวิธีนี้จะต้องทำในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน 98% เพื่อป้องกันผงวัสดุทำปฏิกิริยากับออกซิเจนขณะหลอม วิธีนี้มีการเปลี่ยนสถานะของวัสดุถึงสองครั้ง คือ จากของแข็งเป็นของเหลว และกลับเป็นของแข็งอีกครั้งหนึ่ง วัสดุผงที่สามารถใช้กับ SLS ในปัจจุบันได้แก่ โพลีไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride, PVC) โพลีคาบอเนต (polycarbonate) ไนลอน (nylon) แวกซ์ (waxes) และโลหะ



ภาพที่ 9 วิธีการหลอมด้วยแสงเลเซอร์

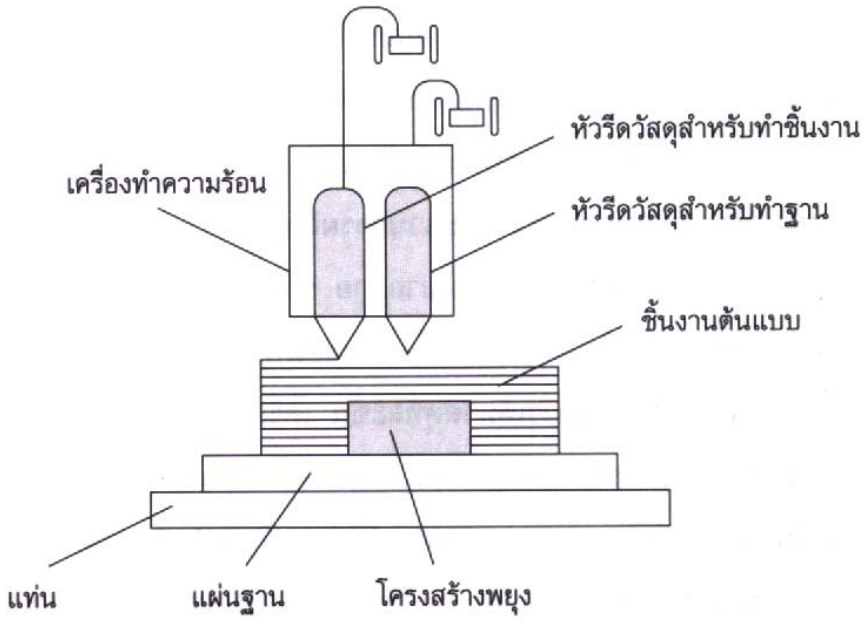
ที่มา: มณฑลี (2546)

ข. ข้อดีของ SLS คือ ไม่ต้องทำการบ่ม (posting-curing) ไม่ต้องสร้างโครงค้ำยัน สามารถใช้ผงเคลือบเซรามิกส์และโลหะ และชิ้นส่วนมีความแข็งแรง ข้อเสียคือ มีก๊าซเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต พื้นผิวเป็นรูพรุน และใช้เวลามาก

2.2.4 การสร้างต้นแบบด้วยการหลอมเส้นใยพลาสติก (Fused Deposition Modeling, FDM)

ก. หลักการของ FDM (ภาพที่ 10) วิธีนี้จะไม่ใช้ลำแสงเลเซอร์ วัสดุที่ใช้คือ เส้นใยเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic filament) กระบวนการสร้างเริ่มจากรูปต้นแบบในไฟล์ .stl จะถูกตัดออกเป็นชั้น ๆ ตามแนวนอน แล้วเก็บเป็นไฟล์ .slc ซึ่งจะถูกแปลงเป็นไฟล์ .sml ซึ่งเป็นไฟล์ที่

เก็บรหัสคำสั่งของเครื่อง FDM เส้นใยจะถูกดันเข้าหัวอัดรีดและจะถูกหลอมที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวเพียงเล็กน้อย จากนั้นจะถูกดันผ่านหัวอัดรีดทำให้เกิดเป็นแถบบาง ๆ เล็ก ๆ ฝังลงตามภาคตัดขวางของต้นแบบแต่ละชั้น และจะถูกทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อย เพื่อให้วัสดุแข็งตัวและการยึดติดที่ดีกับชั้นต่อไป ระบบทั้งหมดจะถูกควบคุมในห้องที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุเล็กน้อย



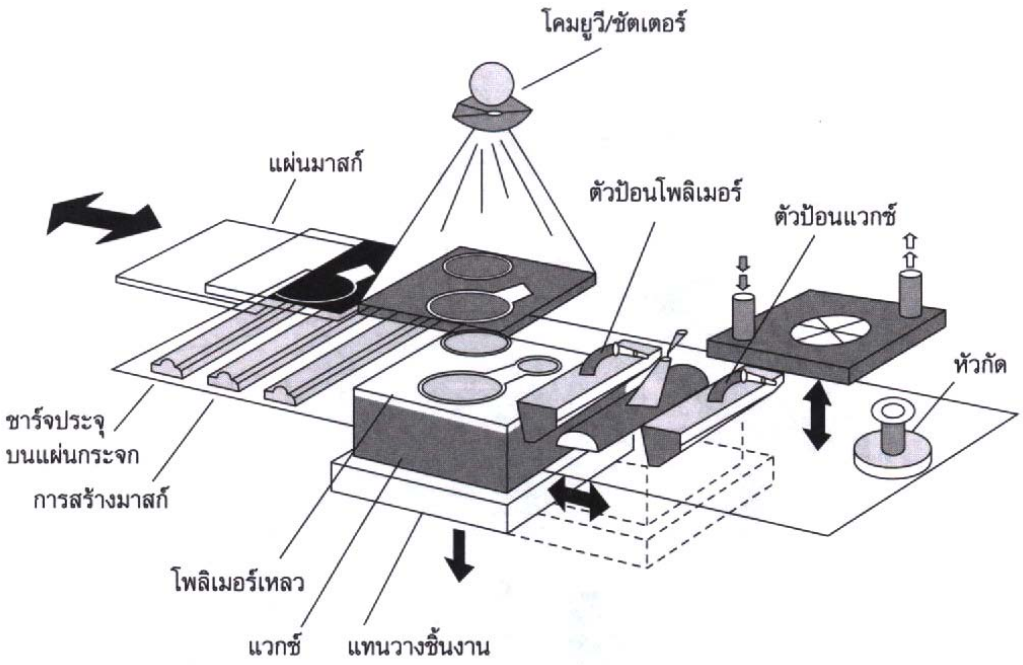
ภาพที่ 10 การสร้างต้นแบบด้วยการหลอมเส้นใยพลาสติก
ที่มา: มณฑลี (2546)

ข. ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถใช้วัสดุได้หลากหลายและสามารถเปลี่ยนวัสดุต่างชนิดระหว่างการผลิตได้ง่าย ไม่มีก๊าซพิษ ง่ายและประหยัด ไม่มีของเสีย ไม่ต้องทำความสะอาดชิ้นงาน และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีผิวบางหรือรูกลวงได้เร็ว ข้อเสียคือ ต้องสร้างโครงค้ำยันที่ต้องการ ชิ้นงานไม่แข็งแรงและใช้เวลานานสำหรับชิ้นงานที่มีปริมาตรมาก

2.2.5 การบ่มให้แข็ง (Solid Ground Curing)

ก. หลักการทำงาน (ภาพที่ 11) ใช้วัสดุเรซิ่นเหลวไวแสงที่แข็งตัวเมื่อถูกแสงอัลตร้าไวโอเลท แต่แตกต่างจากวิธี SLA โดยเริ่มจากรูปต้นแบบในไฟล์ .stl จะถูกตัดออกเป็นชั้น ๆ ตามแนวนอน แล้วเก็บเป็นไฟล์ .cfl (cubital facet list) แล้วใช้หลักการคล้ายเครื่องถ่ายเอกสารคือ นำแผ่นกระจกใสมาบรรจุประจุไฟฟ้าในบริเวณที่ไม่เป็นพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน จากนั้นนำผงโทนเนอร์สีดำมาโรยให้ทั่วทำให้ทึบแสงและจะยึดติดกับกระจกในส่วนที่มีประจุไฟฟ้า (แผ่น

มาส์ก) กระจกจะให้แสงผ่านได้ในส่วนที่ไม่มีผงโทนเนอร์ก็คือส่วนที่เป็นเนื้อชิ้นงาน จากนั้นนำแผ่นกระจกนี้มาวางเหนือผิวเรซิ่นเหลวและฉายแสงอัลตร้าไวโอเลทเพื่อให้เรซิ่นแข็งตัว เรซิ่นเหลวที่เหลือจะถูกกำจัดออกแล้วลงแวกซ์เหลวบนชิ้นงานและบริเวณรอบ ๆ จากนั้นทำให้แวกซ์แข็งตัวด้วยแผ่นความเย็น แล้วทำการปาดผิวหน้าให้ชั้นของชิ้นงานได้ความเรียบและหนาตามต้องการเพื่อเตรียมผิวสำหรับทำชั้นต่อไป เมื่อชิ้นงานเสร็จแล้วนำไปล้างแวกซ์ออกด้วยกรดซิตริก (citric acid) ผสมน้ำที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้แท่นวางชิ้นงานสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง การเคลื่อนที่ในแนวนอนจะช่วยพาชิ้นงานไปยังส่วนอื่นของเครื่องจักร



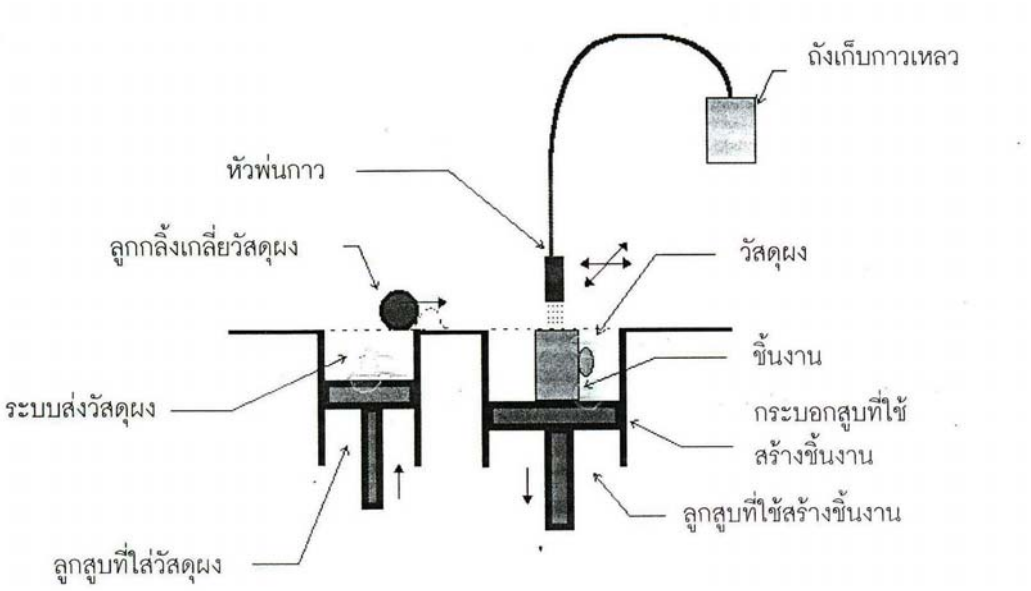
ภาพที่ 11 วิธีการบ่มให้แข็ง
ที่มา: มณฑลี (2546)

ข. ข้อดีของวิธีนี้คือ ผลผลิตสูง ไม่ต้องสร้างโครงค้ำยัน และสามารถคาดการณ์เวลาการผลิตได้ ข้อเสียคือ ต้องคอยเฝ้าดูตลอดเวลาระหว่างการผลิตและสิ้นเปลืองวัสดุมาก

2.2.6 การพิมพ์สามมิติ (Three Dimensional Printing, 3DP)

ก. หลักการทำงาน (ภาพที่ 12) คล้าย SLS แต่เปลี่ยนจากการใช้ลำแสงเลเซอร์มาเป็นการใช้หัวพ่นอิงค์เจท (ink-jet) ทำการพ่นสารยึดติดหรือกาวลงบนวัสดุผง ทำให้วัสดุผงยึดติดกันตามรูปภาคตัดขวางของชิ้นงานในแต่ละชั้น โดยแท่นเก็บวัสดุจะเลื่อนขึ้นและแท่นรอง

ชิ้นงานจะเลื่อนลงตามความหนาของแต่ละชั้น เพื่อให้ลูกกลิ้งเกลี่ยวัสดุให้เรียบจากนั้นหัวพ่นจะทำการพ่นกาวตามพื้นที่ภาคตัดขวางในแต่ละชั้น ๆ จนเสร็จ หลังจากได้ชิ้นงานแล้ว วัสดุผงจะถูกกำจัดออกไป และสามารถนำมาตกแต่งผิวชิ้นงานได้ สำหรับชิ้นงานโลหะจะถูกนำมาอบด้วยความร้อน (heat treatment) เพื่อเพิ่มความแข็งแรง



ภาพที่ 12 วิธีการพิมพ์สามมิติ
ที่มา: มณฑลี (2546)

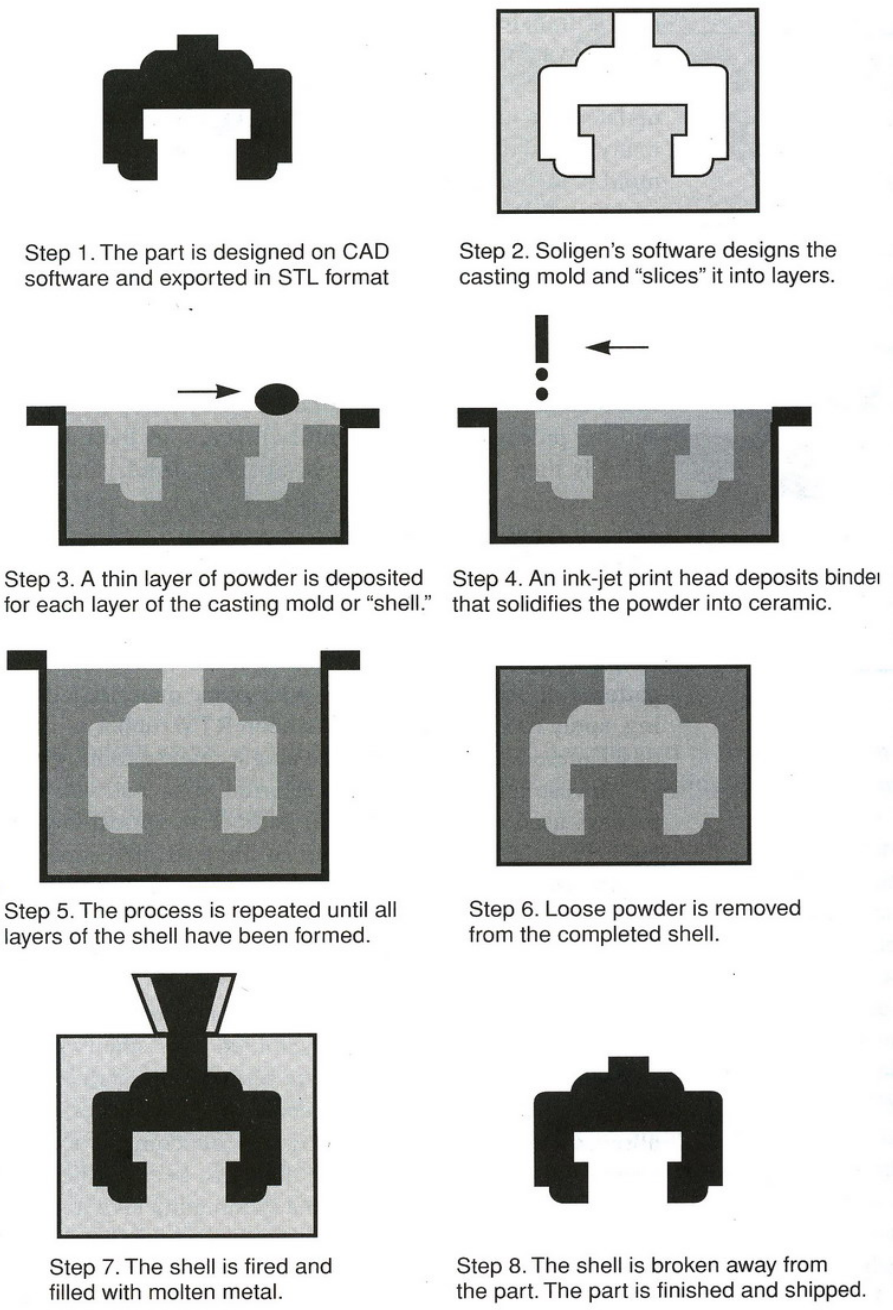
ข. ข้อดีคือ สามารถใช้วัสดุผงได้ทุกชนิด (โลหะ เซรามิกส์ โพลีเมอร์ และคอมโพสิท) ไม่ต้องสร้างโครงค้ำยันและสามารถสร้างต้นแบบได้ทุกรูปร่าง ข้อเสียคือ ผิวไม่เรียบ และวัสดุบางชนิดต้องนำชิ้นงานมาอบด้วยความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน

3. การประยุกต์ใช้ต้นแบบรวดเร็วในอุตสาหกรรม

3.1 การทำต้นแบบของผลิตภัณฑ์ เป็นการสร้าง RP เพื่อให้เป็นต้นแบบของชิ้นงานที่ต้องการเพราะจะสามารถเห็นและจับต้องได้ เพื่อใช้ทดสอบว่าชิ้นงานต้นแบบที่สร้างขึ้นนั้นตรงตามความต้องการที่ได้ทำการออกแบบไว้หรือไม่ เป็นต้น

3.2 การทำเครื่องมือรวดเร็ว ส่วนใหญ่นำมาใช้ในงานแม่พิมพ์ดังนี้

3.2.1 ใช้ทำแม่พิมพ์โดยตรง (direct tool) เป็นการใช้กระบวนการทำ RP สร้างแม่พิมพ์จากผงโลหะ เพื่อนำมาหล่อชิ้นงาน โดยมีเทคนิคการหล่อดังภาพที่ 13 (ฉัตรชัย, 2546; Kunwoo, 1999)

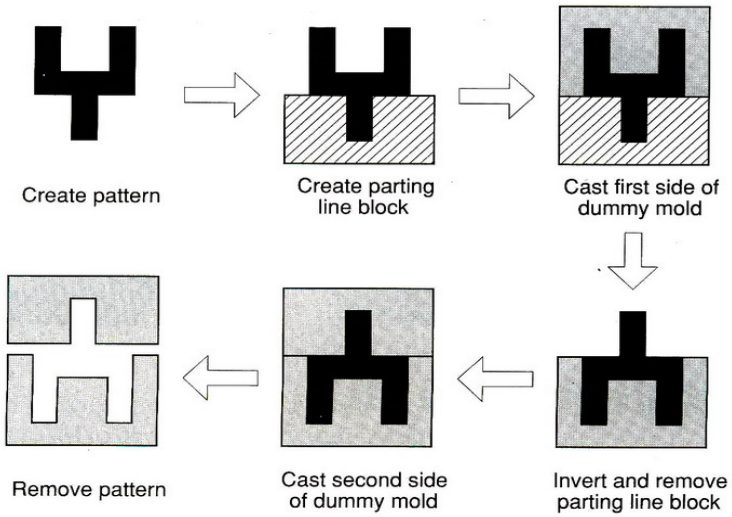


ภาพที่ 13 การทำแม่พิมพ์จาก RP โดยตรงแบบ Direct shell production casting

ที่มา: Kunwoo (1999)

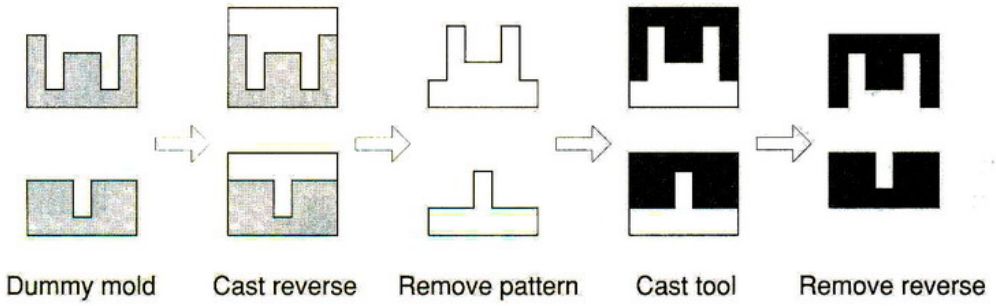
3.2.2 ใช้ทำแม่พิมพ์โดยอ้อม เป็นการนำเทคนิคการทำ RP มาเป็นต้นแบบหรือกระสวนในการหล่อแม่พิมพ์โลหะ โดยมีวิธีการหล่อแม่พิมพ์ดังนี้ (ฉัตรชัย, 2546; Kunwoo, 1999)

ก. วิธีการกลับข้างครั้งเดียว (Single - reverse method) เป็นวิธีการสร้าง RP เพื่อเป็นต้นแบบในการเทหล่อโดยมีการสร้างส่วนยึดต้นแบบตามเส้นแบ่ง (platen) จากนั้นทำการเทหล่อชิ้นงานแม่พิมพ์ด้านหนึ่งแล้วแกะ platen ออกแล้วทำการเทหล่อแม่พิมพ์อีกด้าน เมื่อหล่อเรียบร้อยแกะ RP ต้นแบบออกก็จะได้แม่พิมพ์ที่ต้องการ ดังภาพที่ 14



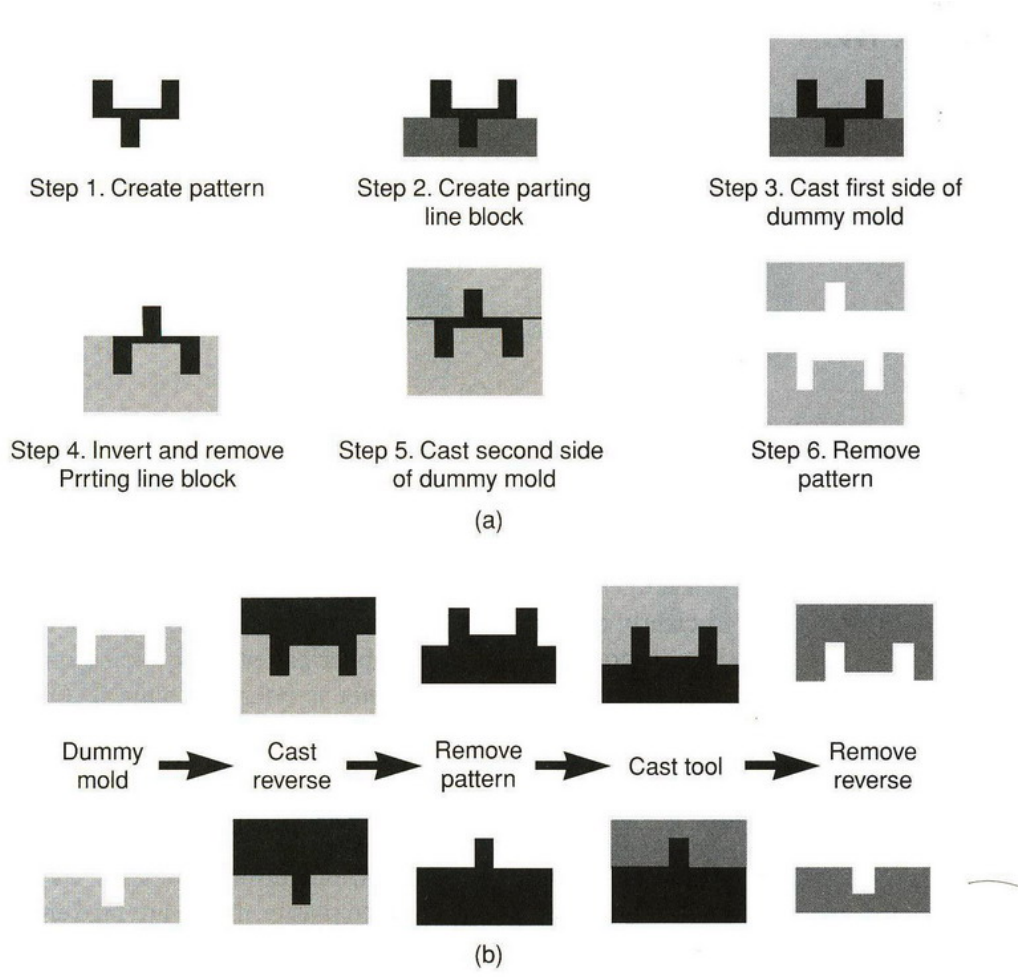
ภาพที่ 14 การทำแม่พิมพ์จาก RP โดยอ้อมแบบ Single - reverse method
ที่มา: Kunwoo (1999)

ข. วิธีการกลับข้าง 2 ครั้ง (Double - reverse method) เป็นการสร้าง RP เป็นแม่แบบครั้งแรกจากนั้นทำการเทหล่อแม่แบบจริงแล้วจึงทำการเทหล่อชิ้นงานที่ต้องการดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 การทำแม่พิมพ์จาก RP โดยอ้อมแบบ Double - reverse method
ที่มา: Kunwoo (1999)

ค. วิธีการกลับข้าง 3 ครั้ง (Triple - reverse method) เป็นการผสมผสานการเทหล่อกลับข้างครั้งเดียวและการเทหล่อกลับข้าง 2 ครั้ง เพื่อให้ได้แม่พิมพ์ที่ต้องการ ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 การทำแม่พิมพ์จาก RP โดยอ้อมแบบ Triple - reverse method
ที่มา: Kunwoo (1999)

สารประกอบอิพอคซี่เรซิ่นเติมอลูมิเนียม

เนื่องจากการตรวจเอกสารเกี่ยวกับสารประกอบอิพอคซี่เรซิ่นเติมอลูมิเนียมสามารถตรวจเอกสารได้จากข้อมูลทางเครือข่ายใยแมงมุม (World Wide Web, www) เท่านั้น และเนื่องจากเป็นข้อมูลทางการค้าของบริษัทผู้จำหน่ายสินค้า ทำให้ข้อมูลที่ได้จากแต่ละ website มีความแตกต่างกัน จึงขอสรุปการตรวจเอกสารเป็นของ website นั้น ๆ ดังนี้

1. website www.azom.com

ข้อดีและข้อด้อยและคุณสมบัติวัสดุของ Epoxy Resin Casting; Aluminium Filled มีดังนี้

1.1 ข้อดี สามารถนำความร้อนได้ดี ค่าการหดตัวและค่าความหนาแน่นของแม่พิมพ์มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับการหล่ออิพอคซี่เรซิ่นแบบอื่น

1.2 ข้อด้อย การเติมอลูมิเนียมลงไปบางครั้งทำให้ความสามารถในการแข็งตัวลดลง ไม่ต้านทานกรด ค่าความทนแรงดึง สัมประสิทธิ์การโก่งตัวและการทนแรงกระแทกต่ำ แต่ค่า linear expansion สูงกว่าเมื่อเทียบกับการหล่ออิพอคซี่เรซิ่นแบบอื่น

1.3 คุณสมบัติวัสดุมีดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณสมบัติทั่วไป

คุณสมบัติ	ค่าต่าง ๆ
Density (g/cm^3)	1.6
Surface Hardness	SD89
Tensile Strength (MPa)	48
Flexural Modulus (GPa)	9.5
Notched Izod (kJ/m)	0.04
Linear Expansion (/°C x 10^{-5})	7.2
Elongation at Break (%)	1
Strain at Yield (%)	N/A
Max. Operating Temp. (°C)	130
Water Absorption (%)	0.2
Oxygen Index (%)	28
Flammability UL94	V0
Volume Resistivity (log ohm.cm)	NA
Dielectric Strength (MV/m)	NA
Dissipation Factor1kHz	NA
Dielectric Constant 1kHz	NA
HDT @ 0.45 MPa (°C)	260+

ตารางที่ 5 (ต่อ)

คุณสมบัติ	ค่าต่าง ๆ
HDT @ 1.80 MPa (°C)	120
Material Drying hrs @ °C	NA
Melting Temp. Range (°C)	NA
Mould Shrinkage (%)	0.15
Mould Temp. Range (°C)	NA

ที่มา: www.azom.com (2006)

2. Blehm Plastics, Inc.

การหล่อสารประกอบ Aluminum Filled Epoxy Resin รหัสวัสดุ BP 4123 มีการแข็งตัวปานกลาง อุณหภูมิสูง การบ่มตัวให้แข็งต้องทิ้งไว้ข้ามคืน และจำเป็นต้องทำการบ่มขั้นสุดท้ายเพื่อเพิ่มคุณสมบัติวัสดุให้เหมาะสมที่สุดด้วย เนื่องจากเรซิ่นไม่สามารถแข็งตัวมากไปกว่านี้แม้จะมีการเพิ่มเวลาการบ่มตัว BP 4123 ได้ถูกพัฒนาให้ไม่มีเกิดการระคายเคืองต่อผิวและได้หลีกเลี่ยงการใช้สารก่อมะเร็งในวัสดุทั้งเรซิ่นและฮาร์ดเดนเนอร์ การเติมอลูมิเนียมเป็นการเพิ่มการนำความร้อนให้กับวัสดุในงานหล่อ โดยมีคุณสมบัติของวัสดุดังนี้

2.1 อัตราส่วนในการผสมระหว่างเรซิ่นกับฮาร์ดเดนเนอร์เท่ากับ 100 ต่อ 8 ส่วนโดยน้ำหนัก

2.2 Pot-life: 3 ชั่วโมง ที่ 72°F

2.3 ระยะเวลาในการบ่มตัว 16 ชั่วโมงถึงมากกว่า 24 ชั่วโมง

2.4 การบ่มขั้นสุดท้ายแนะนำให้ค่าที่ 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 130°F หรือ 200°F หรือ 300°F

3. De-Comp Composites, Inc.

มีค่าคุณสมบัติของอลูมิเนียม เรซิ่นและฮาร์ดเดนเนอร์ที่แตกต่างกัน ดังนี้

3.1 อลูมิเนียม ACR-500 ฮาร์ดเดนเนอร์ CS-215 (Standard) ออกแบบโดยเฉพาะสำหรับชิ้นงานที่ต้องใช้ผิวการหล่อ บ่มตัวได้ในอุณหภูมิห้อง สามารถตกแต่งชิ้นงานได้ดี มีคุณสมบัติวัสดุดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คุณสมบัติวัสดุอลูมิเนียม ACR-500 ฮาร์ดเดนเนอร์ CS-215 (Standard)

คุณสมบัติทั่วไป	ค่าต่าง ๆ
Ratio by Weight	100 pbw to 18 pbw
Pot Life (200 gram mass)	90/130 minutes
Tensile Strength @ 25°c	7,500
Flexural Strength @ 25°c	11,300
Compressive Strength	15,300
Heat Deflection	125°F
Hardness, Shore “D”	82
Density: Resin	12.9
Hardener	8.0
Mixed	12.1
Shelf Life: Resin / Hardener	1 year

ที่มา: De-Comp Composites, Inc. (2006)

3.2 อลูมิเนียม ACR-500 ฮาร์ดเดนเนอร์ C-201 (Standard) ออกแบบโดยเฉพาะสำหรับชิ้นงานที่ต้องใช้ผิวการหล่อ บ่มตัวได้ในอุณหภูมิห้อง สามารถทำการหล่อชิ้นงานที่มีความหนาเพียง 0.5 นิ้วได้ ACR-500 มีช่วง pot life ในระดับปานกลาง และสามารถจำลองแบบชิ้นงานได้ดีมาก มีคุณสมบัติวัสดุดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 คุณสมบัติวัสดุอลูมิเนียม ACR-500 ฮาร์ดเดนเนอร์ C-201 (Standard)

คุณสมบัติทั่วไป	ค่าต่าง ๆ
Ratio by Weight	100 pbw to 18 pbw
Ratio by Volume	3.6 to 1

ตารางที่ 7 (ต่อ)

คุณสมบัติทั่วไป		ค่าต่าง ๆ
Pot Life at 72° F (200 gram mass)		45
Cure Time		24 hours
Flexural Strength		11,200
Tensile Strength		7,400
Compressive Strength		15,200
Density:	Resin	12.9
	Hardener	8.5
	Mixed	12.23
Specific Gravity:	Resin	1.55
	Hardener	1.04
	Mixed	1.47
Shelf Life: Resin / Hardener		1 year

หมายเหตุ: ค่าต่าง ๆ เป็นค่าที่ทางบริษัทได้ทำการทดลองและกำหนดขึ้น อย่างไรก็ตามไม่มีการยืนยันว่าผู้ใช้จะได้ค่าคุณสมบัติตามนี้ ดังนั้นผู้ใช้ควรทดสอบหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่แท้จริง

ที่มา: De-Comp Composites, Inc. (2006)

4. website www.Smooth-On.com and www.sculpturesupply.com

วัสดุ Metalset A4™ คืออิพอคซี่ที่มีคุณสมบัติเหนียวมีกำลังยึดติดสูง ได้ถูกนำมาใช้ทั้งในวงการทหารของประเทศสหรัฐอเมริกา วงการการบินหลัก ๆ และในการผลิตทั่วโลกมาหลายปีแล้ว และยังถูกใช้ในวงการอุตสาหกรรมเพื่อใช้ในการยึดติดด้วยคุณสมบัติที่ยึดได้กับผิวชิ้นงานที่มีหรือไม่มีรูพรุนก็ได้ มีการบ่มตัวในช่วงข้ามคืนและไม่ต้องระวังเรื่องค่าหดตัว และยังสามารถตกแต่งผิวได้ง่ายด้วยเช่น ขัดด้วยกระดาษทราย เจาะรู ทำเกลียว ทั้งยังต้านทานด่าง กรดเจือจางและตัวทำละลายได้อีกด้วย การผสมสารควรทำการคนสารอย่างน้อย 3 นาที เพื่อให้ส่วนประกอบผสมเป็นเนื้อเดียวกัน Metalset A4™ จะต้องบ่มที่อุณหภูมิห้อง (22° c) นาน 16 ชั่วโมง หรือทำการอบที่

อุณหภูมิ 65°c นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบ่มขั้นสุดท้ายด้วยการนำไปอบที่อุณหภูมิ 65°c นาน 4 ถึง 8 ชั่วโมง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพและเพิ่มประสิทธิภาพให้ชิ้นงาน แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องจึงนำไปเก็บรายละเอียดชิ้นงาน

หมายเหตุ: เนื่องจากการใช้งานที่หลากหลายจึงควรทดลองหาส่วนผสมที่เหมาะกับการใช้งาน

5. website www.manufacturingtalk.com

Master Bond ได้แนะนำสาร aluminium filled epoxy ซึ่งมีส่วนประกอบของอลูมิเนียม อิพอคซี่และตัวประสานชื่อ EP22 ซึ่งสามารถเก็บรายละเอียดและบ่มตัวได้ในอุณหภูมิห้อง และใช้งานง่ายเนื่องจากสามารถผสมสารในสัดส่วนหนึ่งต่อหนึ่งโดยน้ำหนักหรือปริมาตรก็ได้ และยังมีค่าความแข็งแรงที่สูงขึ้นและเหนียวมากขึ้นในการเป็นตัวประสานโลหะซึ่งทนต่ออุณหภูมิและสารเคมีรวมถึงน้ำ น้ำมันและตัวทำละลายจากธรรมชาติอีกด้วย

6. website www.melrosechem.com

ALU-POXY เป็นชื่อของ aluminium filled epoxy resin และฮาร์ดเดนเนอร์เหลว ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อการซ่อมแซมจุดบนผิวชิ้นงานที่แข็งและกึ่งแข็ง เช่น อลูมิเนียม เหล็ก ไม้ คอนกรีต แก้ว เซรามิกส์ ทองเหลืองและผิวพลาสติกส่วนใหญ่ ประโยชน์ของ ALU-POXY คือ

6.1 สามารถเก็บรายละเอียดงานได้
6.2 ไม่มีการหดตัว ไม่เปราะแตกง่าย
6.3 ทนความร้อน ตัวทำละลาย กรด ด่างและน้ำมันกัดกร่อนส่วนใหญ่ได้
6.4 สามารถใช้ซ่อมแซมโลหะอัลลอยด์โดยไม่ต้องทำการเชื่อมหรือบัดกรี

7. QCM Industrail

ชื่อสารประกอบ aluminium-filled casting resin EHV-2911 ประกอบด้วย ECA-347 ฮาร์ด-เดนเนอร์ มีค่าหดตัวต่ำ เสียรูปได้ที่ความร้อนปานกลางถึงสูง สามารถเก็บรายละเอียดด้วยเครื่องจักรได้ ออกแบบสำหรับงานหล่อที่มีความหนามากกว่า 3 นิ้ว สามารถนำไปใช้เป็นแม่แบบหรือแม่พิมพ์ที่ อุณหภูมิสูงถึง 270°F โดยใช้แบบไม่ต่อเนื่อง หรือใช้แบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 180°F ส่วนผสมที่

ใช้ ใช้ EHV-2911 resin 100 ส่วนโดยน้ำหนักกับ ECA-347 ฮาร์ดเดนเนอร์ 16 ส่วนโดยน้ำหนัก แต่สำหรับงานที่จำเป็นต้องบ่มช้าเช่นชิ้นงานใหญ่ให้ใช้ ECA-347 ฮาร์ดเดนเนอร์ 14 ส่วนโดยน้ำหนัก (ความหนาถึง 5 นิ้ว) ค่า pot life ที่ 70°F (200 grams mass) ใช้เวลา 60 ถึง 70 นาที ปล่อยความร้อนสูงสุดที่ 256°F ไม่นำไฟฟ้า อัตราการบ่มตัว 72°F ที่ขนาดการหล่อ เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 5/8 นิ้ว หนา 3/16 นิ้ว เริ่มเป็นของแข็งที่ 5 ชั่วโมง เป็นของแข็งที่ 7 ชั่วโมงและบ่มตัวเต็มที่ใช้เวลา 1 ถึง 2 วัน การหล่อสามารถเร่งให้เร็วขึ้นได้โดย หลังจากปล่อยให้เริ่มเป็นของแข็งที่ 5 ชั่วโมงแล้วให้ทำการให้ความร้อนที่ 160°F ไปอีก 3 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้เกิดการบิดผิดรูปจากความร้อนเพิ่มขึ้นได้

การนำชิ้นงานไปใช้ต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 270°F สามารถทำได้โดยการใช้ฮาร์ดเดนเนอร์ ECA-408 ซึ่งเป็นฮาร์ดเดนเนอร์ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งใช้กับงานที่มีลักษณะบางเช่น แม่พิมพ์แบบกดอัดแน่น ของสเก็ตบอร์ด สกี สโนว์บอร์ด และเวกบอร์ดเป็นต้น ฮาร์ดเดนเนอร์ชนิดนี้สามารถบ่มตัวได้ที่อุณหภูมิสูง 190 ถึง 230°F ซึ่งฮาร์ดเดนเนอร์อื่นไม่สามารถทำได้ และ pot life ที่ยาวมีประโยชน์มากสำหรับงานที่ซับซ้อน โดยการผสมเรซิ่น 8 ส่วน ฮาร์ดเดนเนอร์ 1 ส่วน ทิ้งให้บ่มตัวที่อุณหภูมิห้องแบะ บ่มตัวขั้นสุดท้ายที่ 200°F อีก 2 ชั่วโมงจากนั้นบ่มที่ 300°F ต่ออีก 2 ชั่วโมง เพื่อให้ได้แม่พิมพ์ที่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ ค่า pot life ของส่วนผสมนี้อยู่ที่ 44 นาที (200 กรัม)

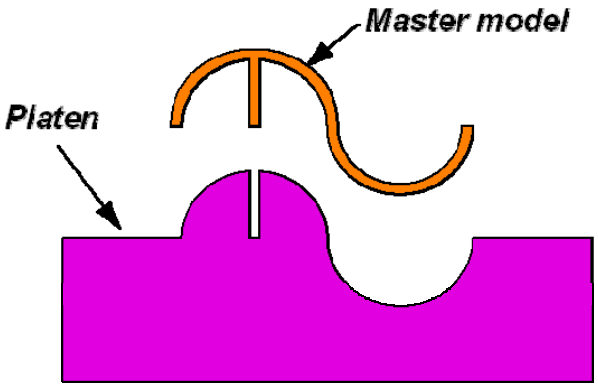
8. Rapid Product Development Resource Centre, Industrail Centre, PolyU

แม่พิมพ์สำหรับงานพลาสติกที่ถูกสร้างจากการหล่อจากอิพอคซี่เรซิ่นชนิดพิเศษโดยตรงเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องการความแม่นยำในการทำงานเหมือนกับแม่พิมพ์ที่สร้างด้วยวิธี conventional เทคโนโลยีนี้เป็นการถ่ายทอดโดยตรงจากชิ้นงานมาสเตอร์โมเดล เพื่อการลดราคาและเวลาในการผลิตแม่พิมพ์

ในอดีต พลาสติกไม่เหมาะในการนำมาทำแม่พิมพ์ฉีดเนื่องจากความแข็งแรงคงทนต่ำและค่าการหดตัวระหว่างการบ่มตัวมีสูง อย่างไรก็ตามอิพอคซี่เรซิ่นชนิดพิเศษได้ถูกพัฒนาเพื่อให้มีความแข็งแรงคงทนมากขึ้น อิพอคซี่เรซิ่นเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตซึ่งสามารถนำมาหล่อให้ได้รูปร่างก่อนนำไปบ่มได้ ซึ่งได้เติมอลูมิเนียมเข้าไปเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มความสามารถในการนำความร้อนได้

แม่พิมพ์ที่ได้จากกระบวนการนี้เหมาะสำหรับแม่พิมพ์ฉีดชิ้นงานพลาสติกเท่านั้น เช่น พลาสติกจำพวก ABS หรือ POM เป็นต้น ซึ่งสามารถผลิตชิ้นงานที่มีจำนวนน้อย ๆ ไปถึง 3,000 ชิ้น ได้ กระบวนการหล่อแม่พิมพ์ชนิดนี้มีดังนี้

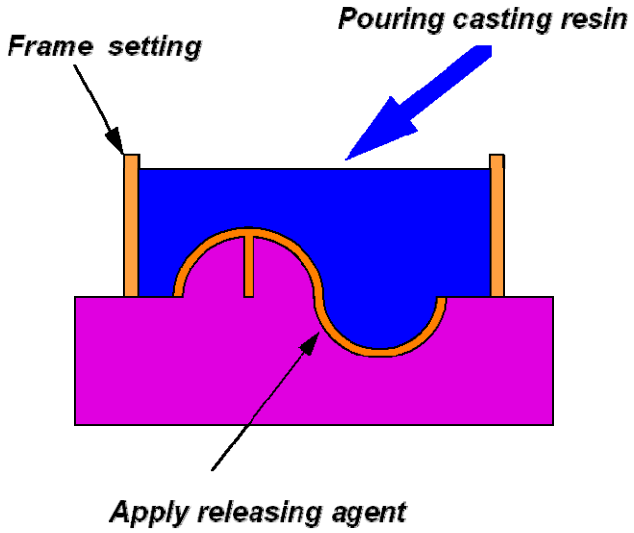
8.1 นำชิ้นงานมาสเตอร์โมเดลที่ไม่มี undercut ต้องทำการพ่นทรายและขัดผิวให้เรียบร้อย ก่อนตามชิ้นงานจริงที่ต้องการ จัดทำ platen ซึ่งจะมีการแบ่งเส้น parting line เรียบร้อยสามารถทำได้จากสิ่งที่ตัดได้ง่ายเช่น อะคลีลิค หรือ ไม้สังเคราะห์ ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ขั้นตอนที่ 1 การวางมาสเตอร์โมเดลและ platen

ที่มา: Rapid Product Development Resource Centre, Industrail Centre, PolyU (2006)

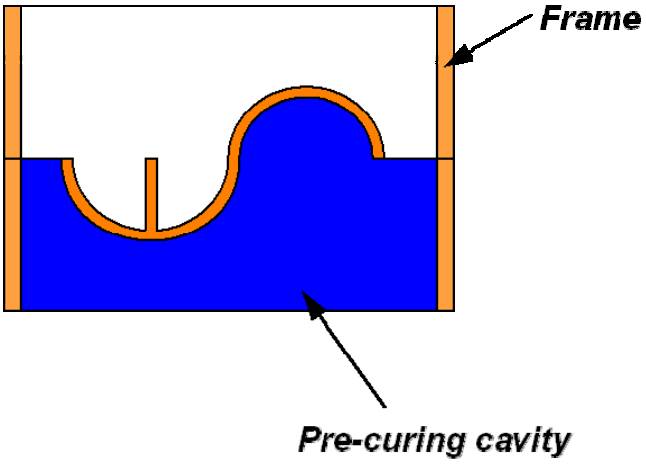
8.2 เตรียมแม่แบบหรือโครง (frame) ครอบปิดบน platen และพ่นสารเคลือบ (mold release agent) บนผิวชิ้นงานมาสเตอร์โมเดลเพื่อให้สามารถปลด platen และแม่แบบออกได้ง่ายภายหลัง การทำแม่พิมพ์ จากนั้นค่อย ๆ รินสารประกอบลงในแม่แบบดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ขั้นตอนที่ 2 เตรียมแม่แบบและเทหล่อแม่พิมพ์

ที่มา: Rapid Product Development Resource Centre, Industrail Centre, PolyU (2006)

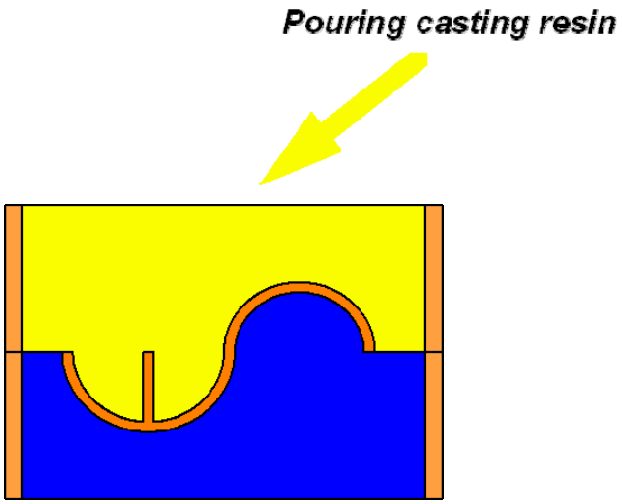
8.3 หลังการบ่มเบื้องต้นแล้ว ทำการกลับด้านแม่พิมพ์อย่างระมัดระวัง จากนั้นแยก platen ออกเพื่อเตรียมทำการเทหล่อแม่พิมพ์อีกด้านหนึ่งดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ขั้นตอนที่ 3 กลับด้านแม่พิมพ์และเตรียมเทหล่อแม่พิมพ์อีกด้านหนึ่ง

ที่มา: Rapid Product Development Resource Centre, Industrail Centre, PolyU (2006)

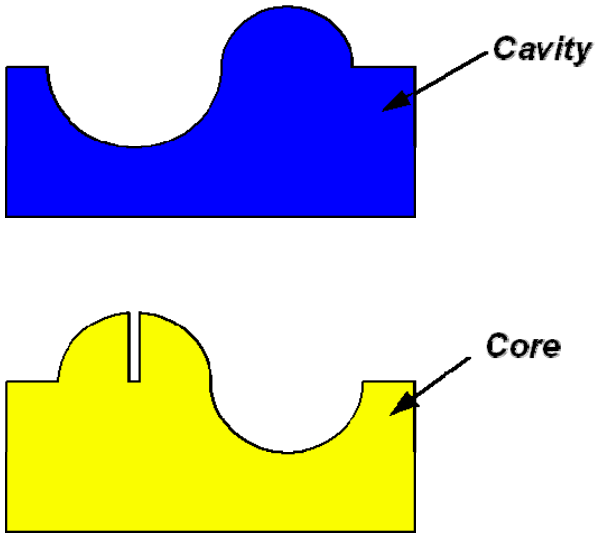
8.4 ทำการพ่นสารเคลือบ (mold release agent) บนผิวชิ้นงานมาสเตอร์โมเดลและรินสารประกอบลงในแม่แบบอีกครั้งดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ขั้นตอนที่ 4 พ่นสารเคลือบชิ้นงานและเทหล่อแม่พิมพ์อีกด้าน

ที่มา: Rapid Product Development Resource Centre, Industrail Centre, PolyU (2006)

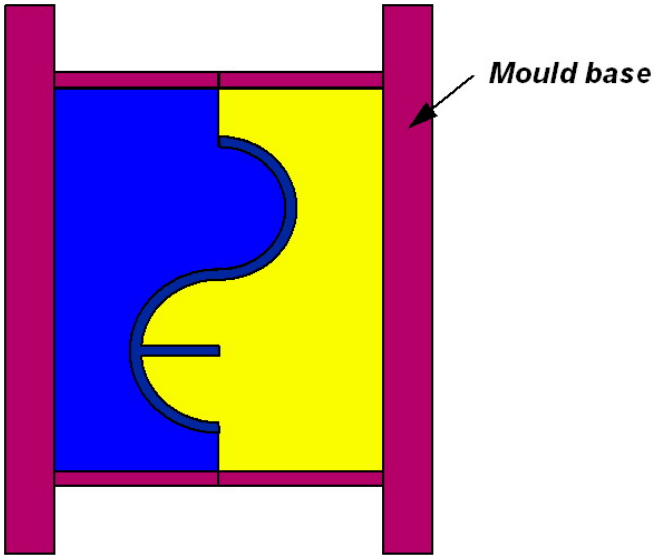
8.5 จากนั้นทำการแยกแม่แบบออก แล้วนำแม่พิมพ์ด้านคอร์และเบ้าไปทำการบ่มขั้นสุดท้ายเพื่อให้ชิ้นงานสามารถทนความร้อนสูงได้ จากนั้นทำการแยกแม่พิมพ์ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ขั้นตอนที่ 5 แยกแม่พิมพ์ด้านคอร์และเบ้าออกจากกัน

ที่มา: Rapid Product Development Resource Centre, Industrail Centre, PolyU (2006)

8.6 เก็บรายละเอียดขนาดมิติของแม่พิมพ์ด้านคอร์และเบ้า เช่น รูฉีด ทางเข้าน้ำพลาสติก รูสำหรับเข็มปลดชิ้นงาน และทำการประกอบแม่พิมพ์พร้อมฉีดชิ้นงานพลาสติก ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ขั้นตอนที่ 6 เก็บรายละเอียดและประกอบแม่พิมพ์

ที่มา: Rapid Product Development Resource Centre, Industrail Centre, PolyU (2006)

9. MCP Group

เนื่องด้วยความต้องการลดระยะเวลาในการผลิตชิ้นงานด้วยวิธีที่ดีกว่า เป็นที่ทราบกันดีว่าแม่พิมพ์ฉีดถูกใช้ในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกส่วนใหญ่ แต่การผลิตแม่พิมพ์ด้วยวิธี conventional นั้นมีราคาสูงและใช้เวลาในการผลิตนาน วิธีใหม่คือการทำเครื่องมือรวดเร็ว เช่น MCP epoxy tooling resins แสดงให้เห็นว่าสามารถทำได้เร็วกว่าและราคาถูกกว่า ด้วยคุณลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้ง่ายและทำได้สำเร็จตามความต้องการของแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งวัสดุต้องให้คุณภาพผิวสูง มีความคงทนใกล้เคียงกับอลูมิเนียม ด้วย MCP EP tooling resins ทำให้ MCP-HEK สามารถพัฒนาวัสดุที่ตรงกับความต้องการอย่างสมบูรณ์แบบได้สำเร็จ แม่พิมพ์ที่ผลิตด้วย EP tooling แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและค่า compressive strength ที่สูงมาก ค่าการหดตัวมีน้อยมาก ประมาณ 0.02 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น และการเติมอลูมิเนียมที่ 80 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ EP tooling resins มีคุณสมบัติการหล่อที่ดีมาก เนื่องจากสามารถตกแต่งผิวชิ้นงานได้ไม่ว่าจะขึ้นรูปด้วยชิ้นงานต้นแบบชนิดใดก็ตาม สามารถทนต่อสารเคมีได้มากกว่าค่าเฉลี่ย และค่าความหนาแน่นบริเวณผิวชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงทำให้สามารถขัดผิวชิ้นงานให้เงาใสเหมือนกระจกได้ และเนื่องจากสามารถปรับปรุงเปลี่ยนแปลงแม่พิมพ์ใหม่ได้ง่ายทำให้ผลิตแม่พิมพ์ได้รวดเร็วขึ้นอีกด้วย คุณสมบัติวัสดุของ EP tooling resins ดังตารางที่ 8

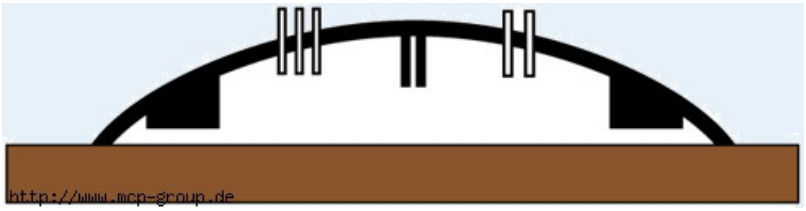
ตารางที่ 8 คุณสมบัติวัสดุของ EP tooling resins

ชนิด / คุณสมบัติ	EP 310 Resin/B Standard hardener	EP 310 Resin/BLP Long pot life hardener
Colour	grey	grey
Viscosity (cps)	30.000	40.000
Density (kg/dm)	2.0	2.0
Pot Life (min.) at 25°C	60 min	90 min
Hardness (Rockwell)/(Shore D)	112R / 91D	112R / 91D
Flexural Strength Mpa	130	125
Flexural Modulus Mpa	13.800	15.500
Tensile Strength Mpa	75	75
Tensile Modulus Mpa	14.000	14.500
Compressive Strength Mpa	265	255
Compressive Modulus Mpa	6.800	9.000
Izod Impact Strength (J/cm)	0,7	0,7
Shrinkage (%)	-0,01	~0
Thermal Conductivity (W/mK)	1,65	2,08
Linear Expansion (10^6 x mm/mm/K)	30	31
Deflection Temperature (°C)	250	250

ที่มา: MCP Group (2006)

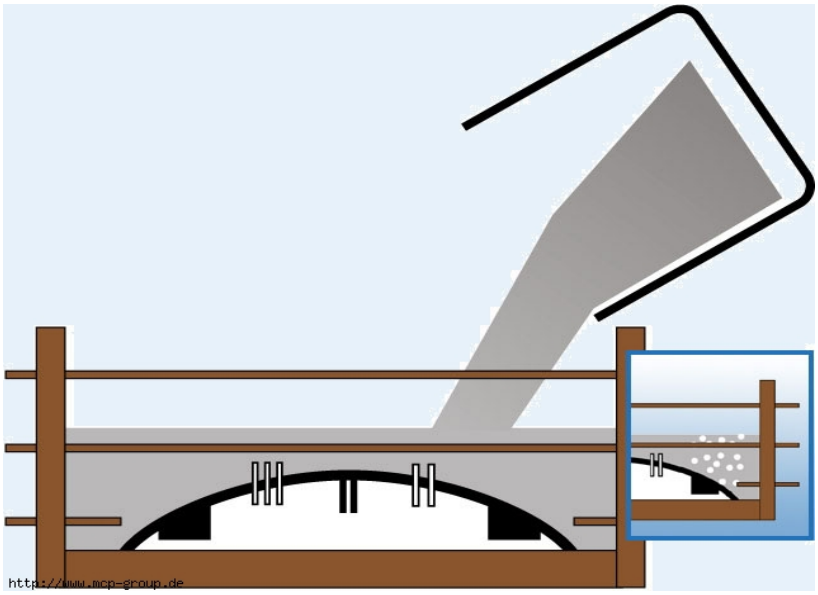
กระบวนการผลิต EP tooling resins มีดังนี้

9.1 ในวันที่ 1 เลือกต้นแบบจากวัสดุใด ๆ และกำหนดแม่แบบหรือโครงให้ได้ขนาดที่ต้องการจากนั้นทำการเทหล่อพร้อมทั้งไล่ฟองอากาศ (degas) ดังภาพที่ 23 และ 24



ภาพที่ 23 เลือกต้นแบบจากวัสดุใด ๆ

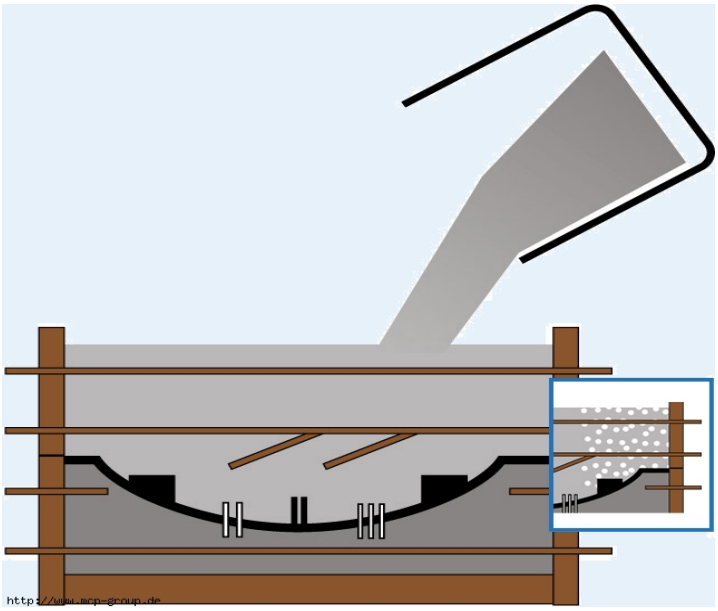
ที่มา: MCP Group (2006)



ภาพที่ 24 กำหนดแม่แบบ เทหล่อและไล่ฟองอากาศ

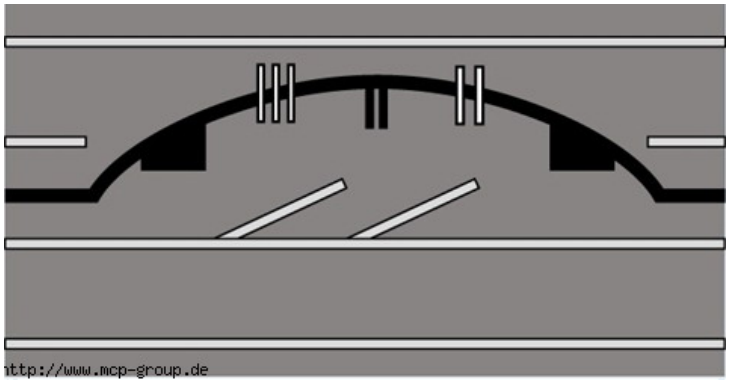
ที่มา: MCP Group (2006)

9.3 ในวันที่ 2 กลับด้านชิ้นงานและทำการเทหล่อทับพร้อมไหล่ฟองอากาศอีกครั้ง ดังภาพที่ 25

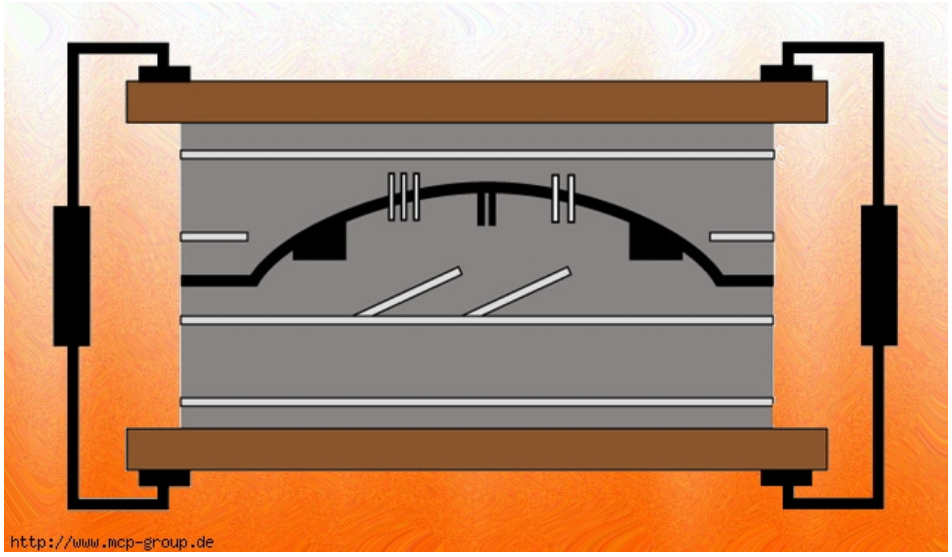


ภาพที่ 25 กลับด้านชิ้นงาน เทหล่อทับและไล่ฟองอากาศ
ที่มา: MCP Group (2006)

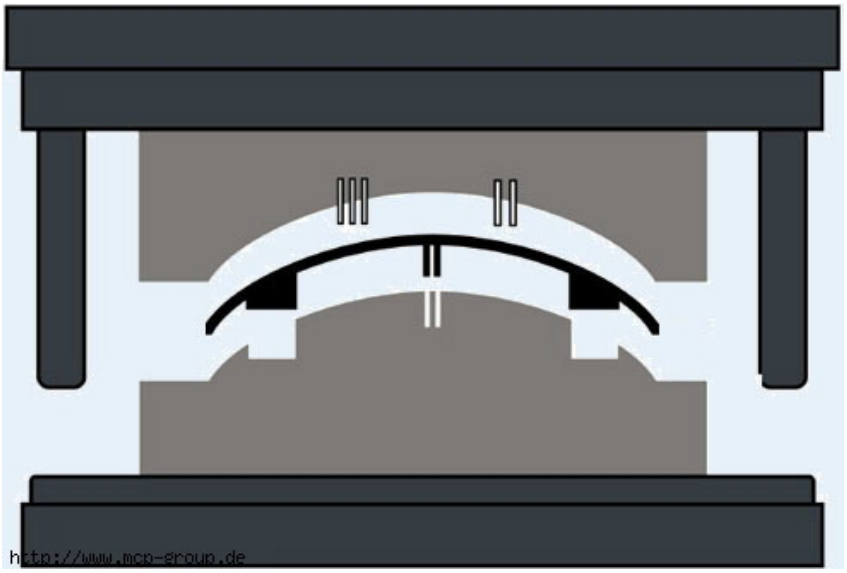
9.4 ในวันที่ 4 ถอดแม่แบบออก จากนั้นนำแม่พิมพ์ไปอบในเตาอบ เมื่อเสร็จเรียบร้อยจะได้แม่พิมพ์ฉีดที่สมบูรณ์ ดังภาพที่ 26 ถึง 28



ภาพที่ 26 ถอดแม่แบบออก
ที่มา: MCP Group (2006)



ภาพที่ 27 นำแม่พิมพ์ไปอบในเตาอบ
ที่มา: MCP Group (2006)



ภาพที่ 28 แม่พิมพ์ฉีดที่สมบูรณ์
ที่มา: MCP Group (2006)

10. Star Technology, Inc.

ER-3105 ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิด คือ อิพอคซี่เรซิ่นเติมอลูมิเนียมได้ถูกพัฒนาคุณสมบัติให้ถ่ายเทความร้อนของการหล่อได้ ซึ่งสามารถไหลได้แบบหนืด ๆ ที่เป็นลักษณะธรรมชาติพื้นฐาน

ของพันธะ ER-3105 มีขอบเขต gel time ที่ยาว ทำให้ถูกใช้ในงานหัตถกรรมด้วย ความที่เป็น gel และเวลาในการบ่มของ ER-3105 สามารถลดลงได้ด้วยการให้ความร้อนอ่อน ๆ เนื่องจากการปล่อยความร้อนสูงจึงไม่ควรเทหล่อหนาเกินกว่า 1 นิ้ว หากต้องการความหนามากกว่านี้ ต้องใช้ ER-3105 ที่มีเวลาบ่มตัวช้า

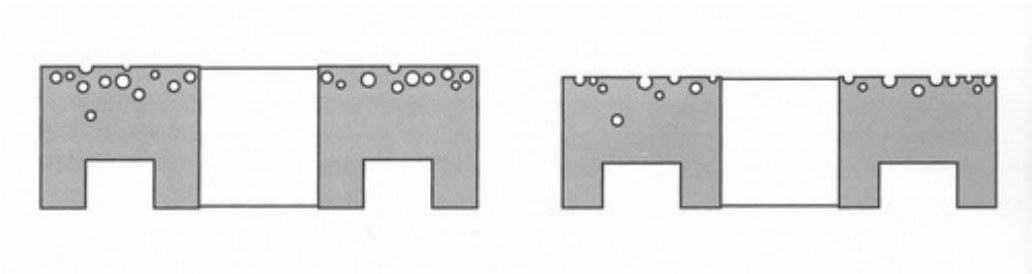
ตารางที่ 9 คุณสมบัติทางกายภาพทั่วไป

คุณสมบัติทางกายภาพทั่วไป	ค่าต่าง ๆ
Mixed Color	Grey with silver colored flecks
Mixed Viscosity	19,000 cps
Mixed Spacific Gravity	~ 1.50
Mixed Ratio	100.0 A : 9.3 B by weight
Gel Time 150 gram mass	100 minutes
Tack free time at 75° F in thin film	6.5 hours
Ultimate Shore D Hardness	90 D
Thermal Conductivity	70.7 Cal/hr cm °c
Glass Transition Temperature	~ 360° F
Ultimate Coefficient of thermal expansion	4.0×10^{-3} in/in/° c
Ultimate Compressive strength	9,000 psi
Shrinkage, mm/mm	0.015

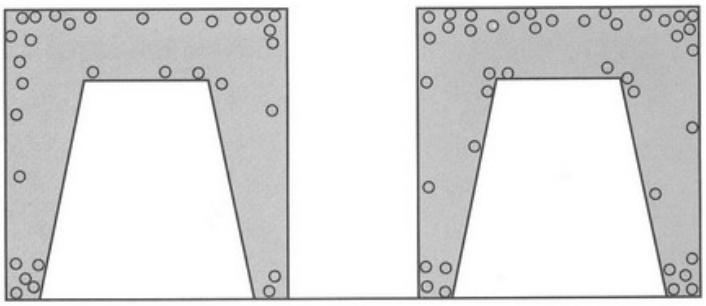
ที่มา: Star Technology, Inc. (2006)

ธนาภรณ์ (2543) กล่าวว่าเนื่องจากอลูมิเนียมผสมหลอมเหลวมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแข็งตัวอยู่มากจึงทำให้อลูมิเนียมที่มีอุณหภูมิสูงมากนั้นมีความสามารถในการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนในอากาศที่เกิดจากแหล่งต่าง ๆ เช่น การแตกตัวของความชื้นในบรรยากาศได้ดีมากในขณะที่ของเหลวไหลตัว ดังนั้นจึงต้องมีการพักรอเท (holding) ให้น้ำอลูมิเนียมเหลวเย็นตัวลงให้ใกล้จุดแข็งตัวมากขึ้นก่อนการเทลงแบบหล่อ ซึ่งไฮโดรเจนสามารถละลาย (hydrogen solubility) ในน้ำโลหะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อพักไว้ที่อุณหภูมิรอเท (holding temperature) แต่จะลดต่ำลงมากเมื่อน้ำโลหะเกิดการแข็งตัว ดังนั้นงานหล่อจะมีฟองของโพรงแก๊สไฮโดรเจนที่ไม่ได้ถูกกำจัดให้หมดไปด้วยกรรมวิธีลดแก๊ส (degassing) ก่อนที่จะเทน้ำโลหะซึ่งจะเป็นผลให้เกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ

อลูมิเนียมได้หลายอย่าง เช่น เกิดรูเข็มที่ผิวชิ้นงานหล่อ (ภาพที่ 29) และเกิดรูพรุนหรือโพรงแก๊ส สามารถพบได้ในขณะทำการกัดแต่งผิวชิ้นงาน (ภาพที่ 30)



ภาพที่ 29 รูเข็มที่ผิวชิ้นงานหล่อ
ที่มา: ธนาภรณ์ (2543)



ภาพที่ 30 รูพรุนหรือโพรงแก๊ส
ที่มา: ธนาภรณ์ (2543)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการตรวจเอกสารมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องมาสเตอร์โมเดลสำหรับแม่พิมพ์ประเภทอิพอคซี่เรซิ่นเติมอลูมิเนียมดังนี้

ชัชพล ชังชู (2548) ได้ทำข้อเสนอโครงการวิจัยและพัฒนาเรื่องการพัฒนาการผลิตแม่พิมพ์ฉีดยางจากวัสดุประกอบ โดยการหล่อแม่พิมพ์แบบ aluminium filled epoxy resin เพื่อศึกษาเทคนิคและวิธีการในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์แบบ aluminium filled epoxy resin และทำการปรับปรุง

กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ชนิดนี้ให้สามารถผลิตแม่พิมพ์ยางได้จริง และสามารถลดระยะเวลาในการผลิตแม่พิมพ์ยางลง และถ่ายทอดองค์ความรู้นี้ให้กับบุคลากรในกลุ่มอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ยาง

ณัฐพล จันทร์พาณิชย์และคณะ ได้ทำการวิจัยงานวิศวกรรมย้อนรอยในงานสร้างแบบกังหันต้นกำลังสามมิติ เนื่องจากกังหันต้นกำลังเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างค่อนข้างซับซ้อน จึงทำให้การออกแบบวิศวกรรมตามรอยนั้นต้องใช้เวลานาน ดังนั้นจึงประยุกต์ใช้เทคนิคทางวิศวกรรมย้อนรอยด้วยอุปกรณ์เก็บค่าพิกัดสามมิติแบบระบบแสงเลเซอร์มาช่วยในการสร้างแบบสามมิติของกังหันต้นกำลังจากชิ้นส่วนเดิมที่เสียหายน้อยที่สุดเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์และพลศาสตร์ต่อไป นอกจากนั้นการสร้างแบบจำลองของกังหันต้นกำลังในคอมพิวเตอร์เป็นการช่วยประหยัดต้นทุนและเวลาในการออกแบบ ผลการวิจัยพบว่าความโค้งงอของใบพัดเป็นอุปสรรคในการเก็บค่าพิกัดสามมิติซึ่งบางส่วนทำได้ไม่สมบูรณ์ ทำให้ต้องใช้เวลาในการเก็บข้อมูลและปรับแต่งผิวในโปรแกรมช่วยออกแบบ แต่ก็สามารถสรุปได้ว่าวิศวกรรมย้อนรอยเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยในการสร้างแบบจำลองสามมิติที่พร้อมจะนำไปสู่การวิเคราะห์ทางวิศวกรรมอื่น ๆ เช่น การไหลทางอากาศพลศาสตร์ ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่อไป

ปรัชญา เลาะหนับ (2542) ได้ทำการศึกษาตัวแปรในงานหล่อที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลของงานหล่ออลูมินั่มอัลลอย 390 โดยการใช้ตัวแปรสำคัญในการหล่อ คือ เวลาในการเย็นตัว การกรอง การไล่แก๊สและการทำโมดิฟิเคชั่นเป็นข้อมูลในการศึกษา พบว่าที่ความเร็วในการเย็นตัวเดียวกันการทำโมดิฟิเคชั่นมีผลต่อความแข็งของวัสดุสูงสุด ตามด้วยการไล่แก๊สและการกรอง แต่เมื่อใช้โมดิฟิเคชั่นร่วมกับการไล่แก๊สหรือการกรองแล้วพบว่ามีผลต่อความแข็งน้อยกว่าการใช้โมดิฟิเคชั่นเพียงอย่างเดียว และความเร็วในการเย็นตัวที่สูงกว่ามีผลต่อค่าความแข็งโดยมีการโมดิฟิเคชั่นเป็นตัวแปรทำให้ความแข็งดีขึ้น ดังนั้นหากต้องการความแข็งที่ดีก็ควรใช้การโมดิฟิเคชั่นร่วมกับการหล่อที่มีความเร็วในการเย็นตัวสูง เช่นการใช้ทุ่นเย็นเป็นต้น จากการวิจัยยังพบว่าการใช้เกลือแกงซึ่งเก็บรักษาง่ายและหาได้ง่ายในการทำโมดิฟิเคชั่นแทนการใช้โซเดียมซึ่งมีราคาแพงให้ผลใกล้เคียงกันอีกด้วย

ประเวศ ดำรงโภวรรณ (2541) ได้ศึกษาการใช้วิธีการหล่อประณีตด้วยแบบหล่อพลาสเตอร์ในการทำเบ้าแม่พิมพ์และคอร์แม่พิมพ์ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ซึ่งสร้างด้วยอลูมิเนียมเพื่อศึกษาความคลาดเคลื่อนของเบ้าและคอร์แม่พิมพ์ที่ผ่านการหล่อประณีตและทำความสะอาดแล้ว ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนตามเกณฑ์กำหนดอยู่ที่ 0.9 ถึง 3.9 ไมโครเมตร แต่จากการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานอยู่ที่ 0.2189 ถึง 0.5027 มิลลิเมตร ดังนั้นผลความคลาดเคลื่อนของ

ชิ้นงานไม่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดจึงไม่สามารถนำวิธีการหล่อประณีตด้วยแบบหล่อพลาสเตอร์ในการทำเบ้าแม่พิมพ์และคอร์แม่พิมพ์ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกไปใช้งานได้

พรชัย จุลโยธิน (2541) ได้ทำการออกแบบและสร้างส่วนเบ้า – ส่วนคอร์ของแม่พิมพ์ฉีดด้วยวัสดุสังเคราะห์เพื่อใช้ทดแทนแม่พิมพ์โลหะ โดยอาศัยเทคนิคการลอกแบบชิ้นงานเพื่อนำมาสร้างมาสเตอร์โมเดลเพื่อนำไปหล่อแม่พิมพ์โดยใช้วัสดุสังเคราะห์เป็นสารผสมเรซิ่นมีชื่อเรียกว่า “สารผสมระบบ Mishubishi Rapid Molding” และนำแม่พิมพ์ที่หล่อได้ไปทดลองฉีดพลาสติกซึ่งพบจุดบกพร่องมาก เริ่มจากการปรับตั้งอุณหภูมิในการฉีดยา การปลดชิ้นงานลำบาก การยุบตัวของวัสดุสังเคราะห์ การแตกร้าวของแม่พิมพ์เมื่อทดลองฉีดจำนวนมากขึ้น ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นสาเหตุเนื่องมาจากผู้จัดทำยังขาดเทคนิคและประสบการณ์งานหล่อผสมวัสดุสังเคราะห์

วิทยา เอียดเหตุ (2545) ได้ศึกษาการปรับสภาพเกรนให้ละเอียดของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนหล่อเกรด 356 โดยใช้โลหะแม่ชนิด Al-Ti-B โดยการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะแม่และทดลองเติมโลหะแม่ลงในโลหะหลอมเหลว เพื่อเทลงในแบบหล่อทราย พบว่าภายหลังการเติมโลหะแม่มีผลให้ขนาดเกรนของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนละเอียดกว่าการหล่อโดยไม่เติมโลหะแม่ และขนาดเกรนที่ได้จากการเติมโลหะแม่ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะให้ผลที่ละเอียดกว่าการเติมเพียง 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่หากค้างน้ำโลหะนานกว่า 25 นาที เกรนของโลหะผสมจะหยาบมากขึ้นเนื่องจากการเสื่อมประสิทธิภาพของโลหะแม่ นอกจากนี้ขนาดเกรนยังขึ้นกับอุณหภูมิการเทน้ำโลหะอีกด้วยโดยการเทน้ำโลหะที่อุณหภูมิ 680 $^{\circ}$c มีเกรนที่ละเอียดกว่าการเทที่อุณหภูมิ 720 $^{\circ}$c และ 760 $^{\circ}$c

ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ และคณะ (2547) ได้ทำการวิจัยการสร้างแบบจำลองของรถแข่งด้วยกรรมวิธีวิศวกรรมย้อนรอย ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาในการถอดแบบทำให้สามารถทำการผลิตและปรับปรุงพัฒนาสินค้าได้ในปริมาณที่มากขึ้น งานวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองรถแข่งจากต้นแบบขนาดมาตราส่วนย่อ 1 ต่อ 5 ทำการสแกนด้วยอุปกรณ์เก็บค่าพิกัดสามมิติระบบแสงเลเซอร์เพื่อจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบของไฟล์ CAD ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลได้ ผลการวิจัยพบว่าการนำเอาวิธีวิศวกรรมย้อนรอยมาใช้ในการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์จะช่วยลดระยะเวลาในการสร้างแบบจำลอง ทำให้สามารถทำงานได้เร็วขึ้น แต่ก็พบว่าในการสแกนแต่ละครั้งควรทำการสแกนไปในทิศทางเดียวกันและไม่ควรทำการสแกนเร็วเกินไป เนื่องจากจะทำให้ค่าพิกัดสามมิติที่ได้มีความผิดพลาดมากขึ้นเป็นผลให้ปรับแก้ค่าพิกัดได้ยากและเกิดความคลาดเคลื่อนได้

อนิรุทธิ์ สายเสียง (2545) ได้ทำการศึกษาแนวโน้มของการแตกร้าวขณะร้อนของงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรด 356 ในแบบหล่อถาวร ซึ่งมีสมบัติต้านทานการแตกร้าวขณะร้อนสูงโดยการปรับและไม่ปรับสภาพเกรนละเอียดโดยการเติมโลหะผสมสำหรับปรับสภาพเกรนกลุ่ม Al-5% Ti-1% B-2% โดยใช้อุณหภูมิเทน้ำโลหะที่ 720°c และ 780°c และให้อุณหภูมิแบบหล่อถาวรที่ 220°c 250°c และ 280°c พบว่าในกรณีที่ไม่ปรับสภาพเกรนละเอียด ชิ้นงานหล่อมีการแตกร้าวสูงและมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอุณหภูมิน้ำโลหะและอุณหภูมิแบบหล่อที่เพิ่มขึ้น ขนาดเกรนมีขนาดใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีปรับสภาพเกรนละเอียดพบว่าแนวโน้มการแตกร้าวลดลงทุกอุณหภูมิน้ำโลหะและอุณหภูมิแบบหล่อที่ใช้ในการทดลอง และขนาดเกรนยังเล็กลงกว่าเดิมมาก จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณแตกร้าวมีลักษณะการแตกร้าวแบบตามขอบเกรน และจากการวัดอุณหภูมิพบว่ากรณีไม่ปรับและปรับสภาพเกรนละเอียดมีผลต่อการเกิด undercooling ที่แตกต่างกันและยังมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อความรุนแรงของการแตกร้าวขณะร้อน

T. LIM *et al*. (2002) ได้ทำการศึกษาโครงการ RPBloX – A novel approach towards rapid prototyping โดยการขึ้นรูปที่หลากหลายของเทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็วและการผลิต ของการใช้งานในวงกว้างทางวิศวกรรมที่หลากหลายสาขา เช่น Aerospace, Automotive and Medical Engineering แต่การใช้งานยังมีปัญหาเกี่ยวกับเทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็ว ที่พบบ่อย ๆ คือ เรื่องของเวลาและขีดจำกัดของวัสดุที่ใช้ในการสร้างชิ้นส่วน โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาความเป็นไปได้ของเทคนิคใหม่ ๆ ซึ่งไม่เพียงแต่สนับสนุนเทคนิคการสร้างต้นแบบรวดเร็วเท่านั้น แต่ยังเป็นการสร้างวิธีที่เป็นมาตรฐานที่สามารถทำให้เวลาในรอบการออกแบบการผลิตสั้นลง ซึ่งวิธี RPBloX นี้เป็นการแยกต้นแบบและสร้างเป็นชิ้นส่วนประกอบย่อย ๆ ในการสร้างชิ้นงาน โดยวิธีในแบบดั้งเดิมนั้น การผลิตและประกอบของชิ้นงานจะใช้วิธีแยกชิ้นงานเป็นชั้นบาง ๆ เช่นในกรณีของเครื่อง CNC แต่วิธี RPBloX จะเป็นการผลิตและประกอบในลักษณะของชิ้นส่วน 3 มิติในจุดที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง เนื่องจากสามารถลดเรื่องค่าปรับในการส่งงานช้าและควบคุมเวลาการผลิตได้ดีขึ้น

Mark A. Evan and R. Ian Campbell (2003) ได้ศึกษาความสามารถในการเปลี่ยนจากการออกแบบทางคอมพิวเตอร์ (CAD Design) ให้เป็นแบบจำลองจริง ได้โดยใช้เทคนิค RP และได้ทำการเปรียบเทียบการสร้างแบบจำลองจริงด้วยเทคนิค RP กับแบบจำลองที่คนเป็นผู้สร้างด้วยเครื่องมือต่าง ๆ เอง จากผลสรุปจากค่าใช้จ่ายและเวลาในการสร้างแบบจำลอง สามารถพิสูจน์ได้ว่าการใช้ เทคนิค RP สามารถประหยัดชั่วโมงการทำงานได้ถึง 54 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการใช้เครื่องมือสร้างด้วยคน ถึงแม้ว่าด้านค่าใช้จ่ายจะไม่ต่างกันมาก แต่การใช้เทคนิค RP ยังสามารถสร้าง

ต้นแบบที่ยากในแบบต่าง ๆ ได้ เช่น ชิ้นงานที่มีมุมหลายมุม ถ้าทำงานด้วยมือคนแล้วอาจจะไม่สวยงามหรือไม่ได้ตามที่ออกแบบ และนอกจากนี้ยังพิจารณาถึงการข้ามไปสร้างตัวต้นแบบด้วย RP โดยที่ไม่ต้องสร้างแบบจำลองก่อนก็ได้ ซึ่งข้อสรุปนี้คาดว่าจะเป็นประโยชน์ในวงการออกแบบต่อไป

A. M. Ramos *et al*. (2003) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายและความคงที่ของโมลใบพัดที่สร้างด้วยวัสดุยาง RTV กับอลูมิเนียม (Aluminum) โดยใช้เทคนิค RP ในการทดลอง และได้กล่าวถึงประโยชน์ของการใช้โปรแกรม 3 มิติ (3D Programming) มาสร้างแบบจำลองจริงโดยใช้เทคนิค RP เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตยานอวกาศ เครื่องมือแพทย์ รถยนต์ เป็นต้น ซึ่งสามารถประหยัดเวลาในการสร้างชิ้นงาน ต่าง ๆ ซึ่งเวลาเป็นส่วนสำคัญในธุรกิจ จากผลการวิจัยได้สรุปว่าวิธี RTV จะประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าการใช้แม่พิมพ์อลูมิเนียม (Aluminum Mold) 65 เปอร์เซ็นต์ และค่าความคาดเคลื่อนในการสร้างแม่พิมพ์ RTV ยังเหมือนจริงมากกว่า แม่พิมพ์อลูมิเนียม (Aluminum Mold) อีกด้วย แต่ความคงทนในการผลิตชิ้นงานจากแม่พิมพ์ทั้ง 2 แบบนี้ แม่พิมพ์อลูมิเนียม (Aluminum Mold) จะทนกว่าและสึกหรอน้อยกว่า และถ้าผลิตชิ้นงานมาก ๆ จะคุ้มค่ากว่า

Wang *et al*. (2004) ได้ศึกษาว่าในการสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ เทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็ว (RP) และเครื่องมือรวดเร็ว (RT) มีประโยชน์มาก ซึ่งก็ต้องอาศัยองค์ความรู้ทั้งด้านวิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering) เรื่องแบบและการออกแบบ 3 มิติ (3D Drawing and Design) การวิเคราะห์โครงสร้างและความรู้เกี่ยวกับการผลิตด้วย ซึ่งรวมแล้วเรียกว่าเป็นการผสมผสานความรู้ทางเทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็ว (RP) และระบบการผลิต (Manufacturing System) ไว้ด้วยกัน จะทำให้สามารถลดขั้นตอนในการผลิตได้ และทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพ และความเชื่อถือได้ของแบบผลิตนั้นด้วย วิธีการสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ มี 2 วิธี คือ (1) การเริ่มด้วยการออกแบบ (2) การเริ่มด้วยการใช้ตัวอย่างจากทั้งสองแบบนี้ การเริ่มด้วยการใช้ตัวอย่างมาสแกนหรือวัดด้วยเครื่องมือ แล้วป้อนค่าสู่ระบบ 3 มิติ ส่งผ่านข้อมูลไปที่ระบบการสร้างต้นแบบรวดเร็ว (RP) จะสามารถสร้างออกมาได้รวดเร็วกว่าการเริ่มด้วยการวาดหรือออกแบบใหม่