บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อช่วยในการเพิ่มผลผลิตและลดปริมาณของเสีย ในอุตสาหกรรมหล่อโลหะก็เช่นกันได้มีการใช้เทคโนโลยีการขึ้นรูปแบบไม้ (Wooden pattern) ด้วยโปรแกรม CNC ใช้เทคโนโลยี CAD-CAM เข้ามาช่วยในการสร้างแบบ การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม (Computer Aided Engineering : CAE) รวมไปถึงการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการหล่อ (Casting Simulation Program) จึงมีความสำคัญเพื่อใช้ในการออกแบบระบบทางน้ำโลหะ (Gating system) และใช้ในการวิเคราะห์เพื่อลดจุดเสียของชิ้นงานหล่อซึ่งเป็นส่วนช่วยในการลดเวลา ช่วยลดปริมาณการทดลองหลายครั้งอีกทั้งยังสามารถลดต้นทุนจากการการทดลองได้อีกด้วย

2.2 ทฤษฎีทางด้านโลหะวิทยาของเหล็กหล่อหล่อแกรไฟต์กลม

เหล็กหล่อหล่อแกรไฟต์กลมหรือมีชื่อเรียกกันหลายแบบเช่น Nodular cast iron, Spheroid graphite cast iron หรือ Ductile iron เพราะคุณสมบัติและลักษณะของแกรไฟต์ที่ตกผลึกอยู่ในเนื้อของเหล็กจะอยู่ในลักษณะกลม (Nodule หรือ spheroid) ซึ่งแตกต่างไปจากลักษณะแกรไฟต์ของเหล็กหล่อสีเทาซึ่งอยู่ในรูปแถบยาวๆ (Lamellar flakes) ด้วยคุณลักษณะของแกรไฟต์กลมทำให้เหล็กหล่อชนิดนี้มีคุณสมบัติเหนียวรับแรงกระแทกได้ดีกว่าเหล็กหล่อเทา (Grey cast iron) พิจารณาในด้านคุณสมบัติทั่วไปแล้วเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมมีคุณสมบัติทนแรงดึงได้สูงและมีความเหนียวอยู่ในช่วงของ Low alloy steel คือทนแรงได้ดีประมาณ 40-70 kg/mm² และมีคุณสมบัติ Ductility อยู่ในช่วงเปอร์เซนต์ elongation 8-25% ส่วนดีอีกประการหนึ่งคือเหล็กชนิดนี้ยังอยู่ในตระกูลของเหล็กหล่อจึงมีจุดหลอมเหลวต่ำสามารถหลอมได้ด้วยเตาแบบธรรมดาที่ใช้ในการหลอมทั่วๆไป ด้วยข้อดีต่างๆนี่เองทำให้ปริมาณการใช้เหล็กหล่อประเภทนี้ในอุตสาหกรรมสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ที่สำคัญสองประการคือ

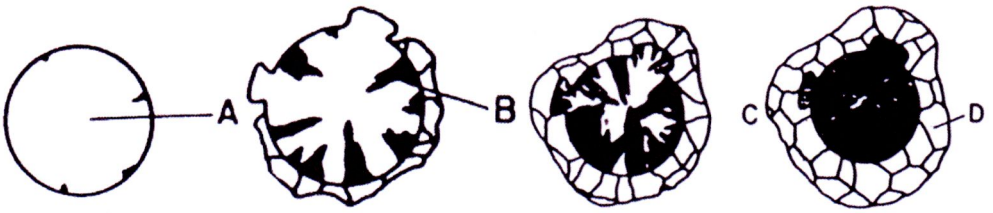
- โครงสร้างพื้นฐาน (Metallic matrix)
- ลักษณะของแกรไฟต์ และการกระจัดกระจาย

โครงสร้างพื้นฐานของเหล็กหล่อแบ่งได้เป็น เพิรไลท์, เฟอร์ไลท์ และ เพิรลิโต- เฟอร์ริติค (ในกรณีที่ชุบแข็งอาจจะมีโครงสร้างพื้นฐานเป็น Bainite หรือ Martensite) เพิรไลท์เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงสูง (80 kg/mm²) แต่มีความเหนียวน้อย (Elongation 10%) เฟอร์ไรต์เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งอยู่ในเกณฑ์ต่ำ (28 kg/mm²) แต่มีความเหนียวสูง (Elongation 50%) เพิรลิโต-เฟอร์ริติค เป็นโครงสร้างที่มีทั้งสองชนิดปนกันจึงมีคุณสมบัติอยู่ในเกณฑ์ปานกลางโดยจะสามารถเปลี่ยน

โครงสร้างโดยการทำการอบชุบการที่จะได้เหล็กหล่อที่มีแกรไฟต์เป็นเม็ดกลมสามารถกระทำได้โดยการผสมโลหะแมกนิเซียมหรือซีเรียมลงไปในเหล็กหล่อหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1300°C – 1450°C ซึ่งโลหะแมกนิเซียมหรือซิเรียมจะทำหน้าที่ไปช่วยให้คาร์บอนในเหล็กหล่อจับตัวกันเป็นเม็ดกลมและภายหลังการผสมแมกนิเซียมแล้วจะทำ Inoculate ด้วยเฟอร์โรซิลิกอน หรือ ซิลิโก- แคลเซียม เพื่อช่วยให้การกระจัดกระจายของแกรไฟต์ได้ดีขึ้นจะทำให้เหล็กหล่อมีความต้านทานสูงขึ้นวิธีการผสมแมกนีเซียมและหลักการเกิดแกรไฟต์กลมจะได้กล่าวต่อไป

2.2.1 ทฤษฎีของการฟอร์มเป็นแกรไฟต์กลม (ตามทฤษฎีของ GORSHKOV)

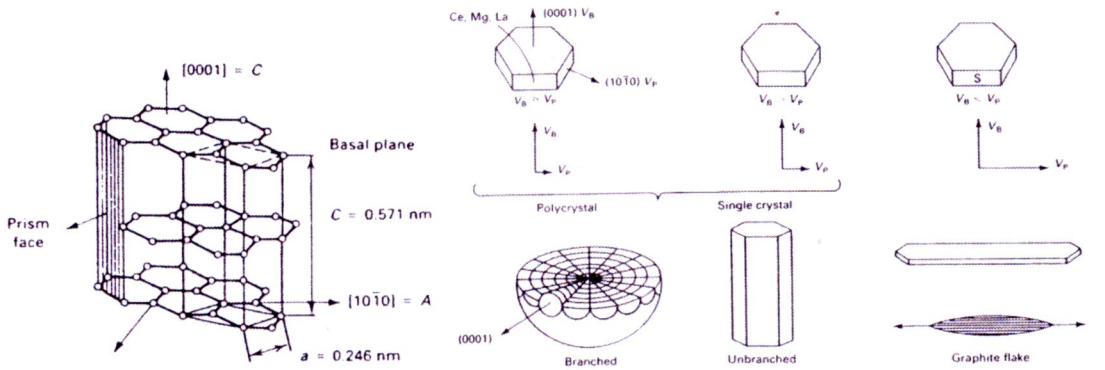
ในการเกิดแกรไฟต์กลมของเหล็กหล่อ Nodular มีลักษณะที่แตกต่างจากเหล็กธรรมดาก็คือการให้กำเนิดครั้งแรกของนิวเคลียสของคาร์บอนจะเกิดในโครงสร้างพื้นของออสเทนไนท์คือเกิดโครงสร้างที่เป็นของแข็งแล้วและการขยายตัวของแกรไฟต์จะอยู่ในลักษณะที่มี Austenite อยู่ล้อมรอบคาร์บอนจะ Diffuse ผ่าน Solid austenite เข้าไปรวมกับนิวเคลียสและขยายตัวโตขึ้นเป็นลักษณะกลมนิวเคลียสแต่ละตัวที่เกิดขึ้นจะเป็น Eutectic cell และปรากฏมีจำนวนมากกว่าจำนวนที่ปรากฏในเหล็กหล่อธรรมดาสาเหตุของการเกิดนิวเคลียสในสภาพที่เหล็กหล่อแข็งตัวแล้วนี้เกิดมาจากการผสมแมกนีเซียมหรือซีเรียมลงไปในขณะที่เหล็กหล่ออยู่ในสภาพหลอมเหลวก่อนการแข็งตัวยังไม่มีคำอธิบายที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนได้แต่ก็มีการทดลองเพื่อยืนยันเหตุผลไว้มาก จากทฤษฎี R.A. Gorshkov ได้อธิบายถึงทฤษฎีที่เกิดแกรไฟต์กลมไว้ดังนี้คือ แกรไฟต์กลมเกิดจากการให้กำเนิดของคาร์บอนจากจุดที่เป็นฟองเล็กๆ (Tiny bubles) ของแก๊สไฮโดรเจนและเมื่อกำเนิดเป็นนิวเคลียสแล้วก็จะขยายตัวอยู่ภายในฟองเล็กๆ ทำให้เกิดเป็นลักษณะกลม การทดลองที่ยืนยันทฤษฎีนี้กระทำโดยการหลอมโลหะนิเกิลบริสุทธิ์ หรือโคบอลบริสุทธิ์ กับ คาร์บอนโลหะผสมสองชนิดนี้มีขอบเขตการละลาย (Solubility) ของแก๊สไฮโดรเจนสูงมากและสามารถทำให้ปริมาณฟองเล็กๆของแก๊สไฮโดรเจนได้จำนวนมากในขณะเกิดการแข็งตัว ธาตุคาร์บอนสามารถที่จะแพร่ผ่านเข้าไปในฟองเล็กๆเหล่านี้และทำให้กำเนิดเป็นแกรไฟต์ที่มีลักษณะกลมและขยายตัวจนเต็มขนาดของฟองเล็กๆ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โลหะผสมทั้งสองชนิดมีจุดเล็กๆ ของแกรไฟต์อยู่ทั่วไปการกำเนิดแกรไฟต์กลมในโลหะผสมนี้อาจเกิดตอนที่โลหะผสมยังมีสภาพหลอมเหลวอยู่ก็ได้เพราะทั้งโลหะนิกเกิลและโคบอลไม่อาจรวมกันเป็นสารประกอบกับคาร์บอนได้เช่นซีเมนต์ไตต์ ดังเช่นแบบที่เกิดขึ้นในเหล็กหล่อ ดังนั้นการรวมตัวของคาร์บอนเป็นแกรไฟต์จึงเกิดได้โดยไม่มีอุปสรรคไม่ว่าจะเกิดในสภาพหลอมเหลวหรือในสภาพของแข็งอาจมีข้อสงสัยที่ว่าฟองแก๊สเล็กๆน่าจะสลายตัวไปหรือไม่ก็ลอยขึ้นมาและสลายตัวไปที่ผิวก่อนที่จะมีการให้กำเนิดแกรไฟต์แต่จากการทดลองพบว่าฟองแก๊สในโลหะหลอมเหลวที่มีขนาดระหว่าง 0.001~ 0.01 มม.จะสามารถคงสภาพอยู่ได้เป็นเวลานับชั่วโมงและมันจะลอยขึ้นมายังผิวด้วยความเร็วระหว่าง 0.4 ~ 40 มม.ต่อชั่วโมง เมื่อเป็นเช่นนี้คาร์บอนก็มีเวลานานพอที่จะแผ่ซึมเข้าไปรวมตัวกันเป็นแกรไฟต์ได้จนสมบูรณ์



รูปที่ 2.1 กลไกในการฟอร์มแกรไฟต์กลมตามทฤษฎีของ Gorshkov [1], [2]

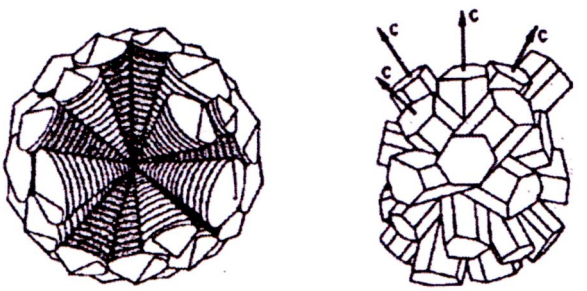
2.2.2 การแข็งตัวและการเกิดโครงสร้างจุลภาค

แกรไฟต์มีโครงสร้างเป็นโครงสร้างเป็นผลึกหกเหลี่ยมในกรณีที่ปราศจากธาตุอื่นเจือปนพฤติกรรมการโตของแกรไฟต์จะเกิดขึ้นบน Basal plane เกิดเป็นแกรไฟต์ที่มีรูปร่างลักษณะเป็นเกล็ด โครงสร้างผลึกของสัณฐานที่เป็นไปได้ของแกรไฟต์สังเกตได้ดังรูป 2.2 ในระหว่างการโตของยูเทกติกแกรไฟต์กิ่งก้านสาขาของเกล็ดแกรไฟต์จะมากขึ้นเมื่อมีอัตราการโตสูงขึ้น ซึ่งจะได้โครงสร้างที่มีกิ่งก้านสาขาความถี่ของกิ่งก้านสาขาของแกรไฟต์จะให้ผลของเกล็ดแกรไฟต์ที่ละเอียดซึ่งเรียกว่า Undercooled graphite การที่ธาตุที่ทำให้แกรไฟต์กลม ตัวอย่างกลไกการเกิดแกรไฟต์กลมแสดงไว้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 การโตของแกรไฟต์ [2], [3]

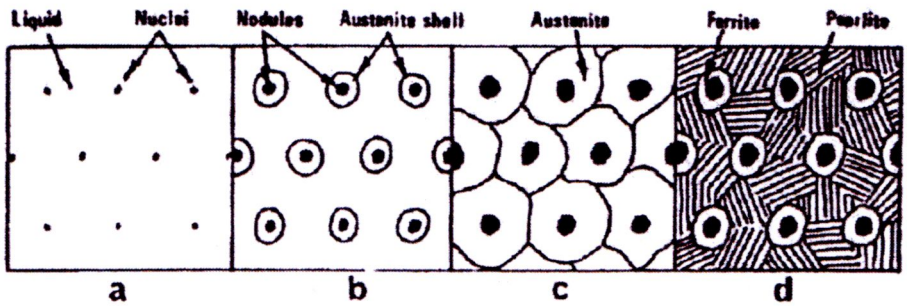
โดยปกติจะโตบนฐานราบ (basal plane) เกิดเป็นเกล็ดแกรไฟต์แต่สารที่ทำให้แกรไฟต์กลมเช่นแมกนีเซียมจะทำให้แกรไฟต์โตในแนวตั้งฉากกับฐานราบเป็นรูปร่างกลม



(a) กลุ่มขดเป็นวงโตรัศมีจากศูนย์กลาง (b) รูปดาวกิ่งก้านสาขาตามแนวแกน c ผ่านกลไกของ Screw dislocation

รูปที่ 2.3 รูปร่างของแกรไฟต์ที่สามารถโตขึ้นได้ในเหล็กหล่อเหนียว [3]

ลำดับขั้นตอนการแข็งตัวของเหล็กหล่อเหนียวได้อธิบายไว้ในรูปที่ 2.4 ยูเทกติกแกรไฟต์กลมออสเทนไนต์เริ่มโตจากนิวเคลียสของแกรไฟต์ภายในของเหลวที่ได้ผ่านการทำอินนอคคูเลชั่นอย่างเหมาะสมแล้วการที่แมกนีเซียมตกค้างภายในเหล็กหล่อจะช่วยป้องกันการเกิดเซลล์ยูเทกติกแบบเกล็ด ได้การโตของแกรไฟต์กลมแต่ละเม็ดจะถูกล้อมรอบด้วยชั้นของออสเทนไนต์และการโตของแต่ละเซลล์จะเกิดอย่างต่อเนื่องโดยการเคลื่อนที่ของอะตอมคาร์บอนจากของเหลวผ่านชั้นออสเทนไนต์เข้าไปยังแกรไฟต์กลมข้างในการเคลื่อนที่ของอะตอมคาร์บอนนี้เชื่อว่าเกิดขึ้นได้โดยกลไกการแพร่ของแข็ง และโดยการแพร่ผ่านของเหลวภายในชั้นออสเทนไนต์ การแข็งตัวจะสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อเซลล์ยูเทกติกแข็งตัวในบริเวณขอบเซลล์ซึ่งคล้ายกับขอบเกรนในสารละลายของแข็งที่มีของเหลวที่แข็งตัวช้าที่สุด และมักเรียกว่า Intercellular บริเวณนี้จะมีธาตุที่แยกตัวต่างๆที่สามารถก่อให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่ไม่พึงปรารถนาและนำมาซึ่งคุณสมบัติที่ด้อยลงของชิ้นงานหล่อได้

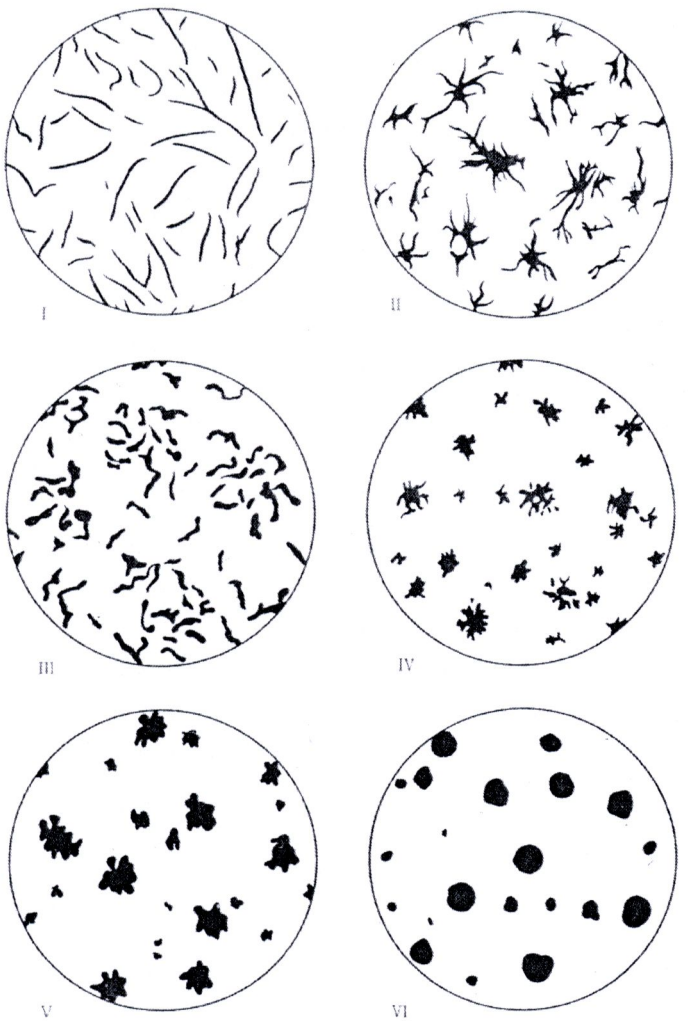


Stages in the formation of the austenite-nodular graphite eutectic

รูปที่ 2.4 ลำดับขั้นตอนการเกิดโครงสร้างยูเทคติกของออสเทนไนต์และแกรไฟต์กลม [3]

2.2.3 รูปร่างของชิ้นแกรไฟต์ในเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม

เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมมีแกรไฟต์รูปร่างต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ทั้งนี้ขึ้นกับสภาพการตกผลึก ถึงแม้ว่ารูปร่างของแกรไฟต์ที่ไม่ใช่รูปกลมจะทำให้คุณสมบัติทางกลต่ำลงแต่เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีแกรไฟต์รูปร่างเช่นในรูป III ก็ยังแข็งแรงกว่าเหล็กหล่อเทา ในกรณีที่เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมมีแกรไฟต์ที่มีรูปร่างไม่กลมปนอยู่ด้วยก็มักไม่มีผลกระทบกระเทือนในการใช้งานหนักแต่ตามมาตรฐานเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมจะต้องมีความแข็งแรงทางดึงกว่า 55kg/mm^2 (ประมาณ 550 MPa) โดยไม่ต้องมีการกระทำเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติใดๆ หลังจากการหล่อ เพื่อให้มีความแข็งแรงถึงระดับนี้เหล็กหล่อควรมีแกรไฟต์ที่มีรูปร่างกลมทั้งสิ้น



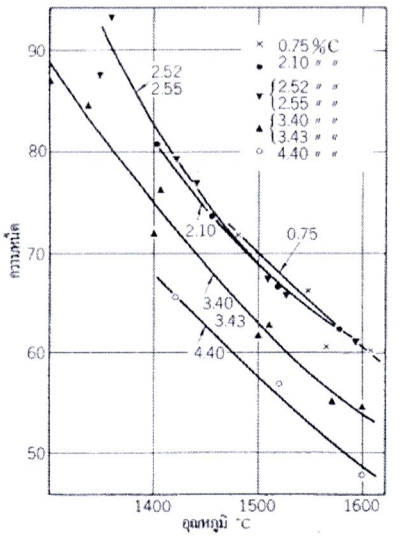
รูปที่ 2.5 ลักษณะการกระจายตัวของแกรไฟต์ที่ปรากฏให้เห็นในเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม [4]

2.3 คุณสมบัติของน้ำโลหะ

2.3.1 ความหนืด (Viscosity) ของน้ำโลหะ

การไหลของน้ำโลหะขึ้นกับความหยาบของผิวแบบหรือขึ้นกับวัสดุที่ใช้ทำผิวแบบและขึ้นกับความหนืดของน้ำโลหะมากกว่าอย่างอื่น ความหนืดขึ้นกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงความหนืดจะต่ำ และเมื่ออุณหภูมิต่ำความหนืดจะสูง รูปที่ 2.6 แสดงคุณลักษณะนี้สำหรับโลหะที่หลอมเหลวโดยสมบูรณ์ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนค่าสูงสุดของความหนืดเป็น 2~3 เท่าของค่าต่ำสุดของความหนืด ถ้าน้ำโลหะเย็นพอจะเกิดมีจุดเริ่มต้นการตกผลึก (Crystal nuclei) และความหนืดจะเพิ่มขึ้นได้มากทั้งนี้ขึ้นกับจำนวนของจุดเริ่มต้น (Nuclei) ในช่วงที่จุดเริ่มต้นการตกผลึกยังต่ำกว่า 20% โดยปริมาตร ความหนืดจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาตรของจุดเริ่มต้นแต่เมื่อจุดเริ่มต้นมีเกิน 30% ความหนืดจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก เช่นมากเป็น 10 เท่าของความหนืดเดิม ความหนืดสูงจะทำให้โลหะเสียความสามารถในการ

ไหล (Flow-ability) ความหนืดขึ้นกับชนิดของโลหะ ตาราง 2.1 แสดงค่าของความหนืดของโลหะต่างๆ ที่หลอมเหลวโดยสมบูรณ์เทียบกับความหนืดของน้ำ
ตารางนี้แสดงให้เห็นว่าโลหะบางชนิดมีความหนืดเท่ากับหรือต่ำกว่าน้ำ



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของเหล็กหล่อ
(โดย อาร์ เอ็น บาร์ฟิลด์ และ เจ.เอ. คิทเชินเนอร์ J. Iron & Steel Inst.) [5]

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์ของความหนืดและความตึงผิวของโลหะ

ชนิดของสาร	จุดหลอมละลาย (•C)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	สัมประสิทธิ์ของความหนืด ($g/cm^2.sec$)	สัมประสิทธิ์ของความหนืดคิเนมาติค (cm^2/sec)	ความตึงผิว (dyne/cm)	ความหนาแน่น (cm^3/sec^2)
น้ำ	100	0.9982 (20 C)	0.010046 (20 C)	0.010064	72 (20 C)	72
ปรอท	-38.9	13.56 (20)	0.01547 (20)	0.00114	465 (20)	34.5
ดีบุก	232	5.52 (232)	0.01100 (250)	0.00199	540 (247)	97.8
ตะกั่ว	327	10.55 (440)	0.01650 (400)	0.00156	450 (330)	42.6
สังกะสี	420	6.21 (420)	0.03160 (420)	0.00508	750 (500)	120
อลูมิเนียม	660	2.35 (760)	0.0055 (760)	0.00234	520 (750)	220
ทองแดง	1083	7.84 (1200)	0.0310 (1200)	0.00395	581 (1200)	74
เหล็ก	1537	7.13 (1600)	0.0400 (1600)	0.00560	970 (1600)	136
เหล็กหล่อ	1170	6.9 (1300)	0.016 (1300)	0.00230	1150 (1300)	167

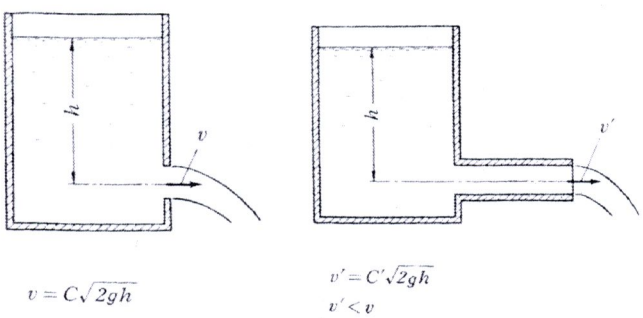
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 23 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน 247139
เลขเรียกหนังสือ

2.3.2 การไหลของน้ำโลหะ

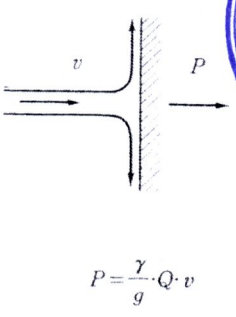
สมมุติว่าของเหลวในภาชนะไหลออกจากรูปข้างภาชนะให้ h เป็นความสูงของผิวของเหลวนับจากระดับของจุดศูนย์กลางของรู ความเร็วของการไหลจะแทนได้ด้วยสมการข้างล่าง

$$\upsilon = C\sqrt{2gh} \qquad (2.1)$$

โดยที่ g คือความเร่งที่เกิดจากความถ่วง (Gravity) และ C คือสัมประสิทธิ์ของความเร็ว ดูรูปที่ 2.7 ในกรณีที่ทางออกเป็นท่อแทนที่จะเป็นรูจะมีแรงต้านการไหลซึ่งเกิดจากแรงความฝืดที่ผิวในของท่อ ดังนั้นท่อที่ยาวและมีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กจะทำให้ความเร็วของการไหลออกจากภาชนะลดลงถ้าท่อโค้งความเร็วของการไหลก็จะลดลง เพราะพลังงานของของเหลวจะเสียไป เนื่องจากการเปลี่ยนในทิศทางการไหลค่า C ในสูตรข้างบนจะลดลงการเปลี่ยนแปลงในค่า C นี้ไม่ขึ้นกับชนิดของโลหะถ้าโลหะอยู่ในสภาพหลอมเหลวโดยสมบูรณ์ดังนั้นไม่จำเป็นต้องคิดถึงน้ำหนักจำเพาะ (หรือความหนาแน่น) และไม่ต้องคิดว่าเป็นโลหะชนิดใด เราอาจใช้สูตรเดียวกับสูตรที่ใช้กับน้ำได้



รูปที่ 2.7 อัตราความเร็วของของเหลวที่ไหลออกจากถัง [5]



รูปที่ 2.8 แรงที่เกิดจากของเหลวชนผนัง [5]

ถ้าของเหลวที่ออกจากภาชนะนั้นวิ่งเข้าชนกำแพงซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของความเร็ว υ ดูรูปที่ 2.8 ให้ Q แทนอัตราการไหล γ แทนน้ำหนักจำเพาะของของเหลวและ g แทนอัตราความเร่งเนื่องจากความถ่วงจะได้ P ซึ่งเป็นแรงที่กำแพงได้รับดังนี้

$$\mathrm{P} = \frac{\gamma}{\mathrm{g}} \cdot \mathrm{Q} \cdot \upsilon \qquad (2.2)$$

จะเห็นว่าแรง P ของโลหะจะสูงกว่าของน้ำ เพราะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่น ในการทำการไหลตรงๆ ให้โค้งนั้นต้องใช้แรงซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักจำเพาะ ดังนั้นเมื่อจะคิดเรื่องแรงที่เกิดจากการที่น้ำโลหะวิ่งเข้าชนกำแพงของแบบจะต้องคิดถึงน้ำหนักจำเพาะ (ความหนาแน่น) ของโลหะด้วยเมื่อน้ำโลหะวิ่งผ่านช่องว่างภายในแบบนั้นไม่จำเป็นว่าโลหะจะต้องเป็นของเหลวทั้งหมด ถ้าอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวมากๆ จะไม่มีโลหะที่แข็งตัวติดอยู่กับผิวของแบบแต่ถ้าอุณหภูมิใกล้จุดหลอมเหลวหรือถ้าแบบรับความร้อนจากน้ำโลหะได้ดีส่วนที่ติดกับผิวของแบบแข็งตัวและช่องที่โลหะไหลผ่านก็จะแคบลงนอกจากนั้นน้ำโลหะที่ไหลผ่านจะพาผลึกที่เกิดจากการแข็งตัว

ต่อไปด้วยทำให้ความสามารถในการไหลลงและเมื่อช่องสำหรับที่น้ำโลหะจะไหลผ่านก็แคบลงด้วย บางครั้งน้ำโลหะจะถึงกับต้องหยุดไหล

2.3.3 ความตึงผิว (Surface tension) ของน้ำโลหะ

เมื่อผิวของเหลวอยู่ตามลำพังจะเกิดปรากฏการณ์ซึ่งมีลักษณะเสมือนกับมีเยื่อบางๆ มาหุ้มของเหลวนั้น ปรากฏการณ์นี้เรียกกว่าความตึงผิว ตารางที่ 2.1 แสดงความตึงผิวของน้ำโลหะ ความตึงผิวของน้ำโลหะมีค่าสูงกว่าความตึงผิวของน้ำ นอกจากนั้นน้ำจะเกาะติดกำแพงโดยง่ายแต่โลหะจะไม่เกาะติดกำแพงและจะกลายเป็นเม็ดกลม (เช่นเม็ดปรอท) ดังนั้นเมื่อน้ำโลหะสัมผัสแบบทรายจะมีแรงต้านทานไม่ให้น้ำโลหะซึมผ่านผิดกับน้ำ

2.4 รูปร่างและมิติของชิ้นงานหล่อ

ชิ้นงานหล่อนั้นจะมีรูปร่างอย่างไรและมิติเท่าไรก็ได้แต่ในบางกรณีถ้าไม่คำนึงถึงรูปร่างหรือมิติเสียเลยจะทำให้หล่อยากและอาจมีจุดเสีย (Defect) ที่เกิดขึ้นเพราะรูปร่างและขนาดไม่เหมาะสม บางครั้งก็ทำให้ต้องมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นจึงควรพิจารณาเรื่องรูปร่างและขนาดอย่างละเอียด

- ประการแรกรูปร่างของกระสวน (Pattern) ควรจะทำได้ง่าย กระสวนที่ทำยากจะทำให้เสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย ดังนั้นรูปร่างกระสวนจะต้องเป็นรูปร่างง่าย ยกเว้นกรณีที่มีความจำเป็นในด้านการใช้งาน

- ประการที่สอง แบบหล่อ (Mold) ควรจะทำได้ง่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งควรเลี่ยงรูปร่างที่ทำแบบไม่ได้โดยใช้แต่เพียงหีบบน (Cope) และหีบล่าง (Drag) หรือโดยที่ทำให้ต้องมีหน้าผ่า (Parting line) ที่ซับซ้อน

- ประการที่สาม ชิ้นงานหล่อจะต้องไม่มีจุดเสีย ถึงแม้ว่ากระสวน (Pattern) และแบบหล่อจะทำง่าย แต่ถ้าทำให้เกิดจุดเสียขณะเทหรือขณะแข็งตัวก็ใช้ไม่ได้ เช่นควรเลี่ยงชิ้นงานที่บางเกินไปหรือมีการเปลี่ยนแปลงในความหนามากเกินไป ในบางครั้งการเปลี่ยนรูปร่างหรือขนาดเพียงเล็กน้อยก็ทำให้กระสวน (Pattern) และแบบหล่อทำได้ง่ายทั้งจุดเสียก็ไม่มี ดังนั้นผู้ออกแบบและผู้ผลิตจะต้องประสานงานกันอย่างดีจึงจะได้งานที่ทำง่ายและมีคุณภาพดี

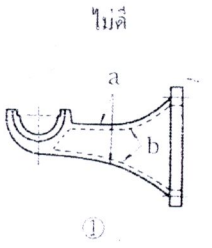
2.4.1 ตัวอย่างการปรับปรุงรูปร่างและมิติของชิ้นงานหล่อ

1. ตัวอย่างการเปลี่ยนรูปร่างเพื่อทำให้หล่อได้ง่าย

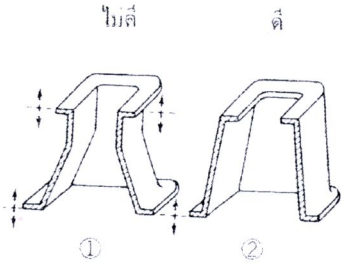
รูปที่ 2.9 แสดงส่วนรับรองลื่น (Bearing housing) ซึ่งจะต้องติดอยู่กับส่วนของเครื่องซึ่งอยู่ในแนวตั้งฉาก (Vertical) ในรูป 1 หน้า a และ b โค้งดังนั้นจะต้องทำแบบด้วยมือ ในรูป 2 ได้เปลี่ยนหน้าทั้งสองเป็นหน้าเรียบ ทำให้ทำได้ง่ายและราคาถูก

2. ตัวอย่างการทำให้การทำแบบง่ายขึ้นและลดจำนวนหน้าผ่า

รูปที่ 2.10 แสดงที่ตั้งเป็นรูปคล้ายหีบ ถ้ารูปร่างเป็นไปตามรูป 1 จะมีส่วนที่ยื่นออกทั้งตรงบนสุดและล่างสุดดังนั้นแบบจะต้องแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนบน กลางและล่างโดยมีหน้าผ่าตรงที่แสดงโดยลูกศร ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการถอดกระสวน ในรูป 2 ส่วนที่ยื่นออกที่อยู่ข้างบนกลับเป็นส่วนยื่นเข้าข้างใน ดังนั้นจึงต้องมีหน้าผ่าแห่งเดียวและใช้หีบบนและหีบล่างเท่านั้น



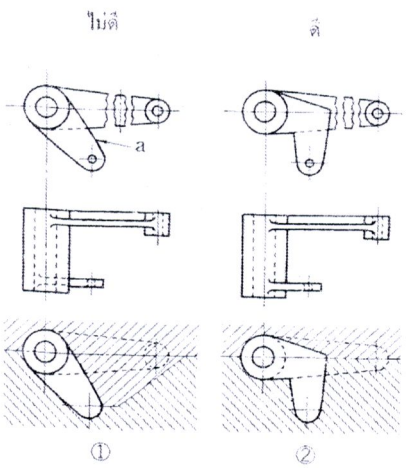
รูปที่ 2.9 รูปร่างของกระสวนเปลี่ยนแปลงให้ง่ายต่อการทำ [5]



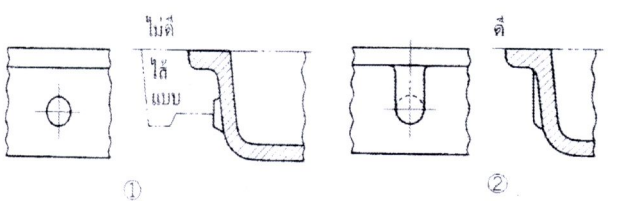
รูปที่ 2.10 ทำให้ไม่ต้องมีหน้าผ่า [5]

3. ตัวอย่างการทำให้การทำแบบง่ายขึ้น โดยการทำหน้าฝ่าให้เป็นหน้าเรียบ

รูปที่ 2.11 แสดงส่วนต่อ (Link) ในรูป 1 มีแขนหนึ่งซึ่งอยู่ในแนวเฉ ทำให้หน้าผ่าไม่เป็นหน้าเรียบและแบบมักจะแตกง่าย เมื่อดัดแขนนั้นใหม่ดังในรูป 2 หน้าผ่าจะกลายเป็นหน้าเรียบและการทำแบบจะง่ายขึ้น



รูปที่ 2.11 ทำให้หน้าผ่าเป็นพื้นราบ [5]



รูปที่ 2.12 ไม่ต้องมีชิ้นแยกอยู่ต่างหาก [5]

4. ตัวอย่างการลดจำนวนขั้นตอนการปฏิบัติงานในการทำแบบและเลี่ยงการมีชิ้นที่ต้องอยู่ลอยๆ ไม่ติดกับส่วนอื่น

รูปที่ 2.12 แสดงฝาปิด ในรูป 1 มีหน้าแปลนยื่นออกมา (Boss) จากด้านข้างทำให้ถอดกระสวนไม่ได้ จะต้องมีไส้สวมอยู่กับแบบหล่อหรือต้องมีชิ้นของกระสวนที่ลอยอยู่ไม่ติดกับส่วนอื่นสำหรับหน้า

แปลนที่ยื่นออกมาโดยเฉพาะ ในรูป 2 หน้าแปลนที่ยื่นออกมานั้นทำต่อมาจากส่วนบนทำให้ถอดแบบได้ ดังนั้นการทำแบบจึงง่ายขึ้น

5. ตัวอย่างปรับปรุงแบบโดยเปลี่ยนความหนาของชิ้นงานหล่อ

รูปที่ 2.13 แสดงข้องอ (Elbow) ทำด้วยอลูมิเนียมหล่อถ้าหนาเพียง 1 mm น้ำโลหะอาจเข้าได้ไม่เต็มทำให้งานเสียเป็นจำนวน 80% แต่ถ้าหนา 1.5mm จำนวนที่เสียจะลดลงเหลือ 35% และถ้าให้หนาขึ้นถึง 2mm จำนวนที่เสียจะลดลงถึง 10% ดังนั้นส่วนใดที่บางจะต้องเปลี่ยนให้มีความหนาพอควร

6. ตัวอย่างแสดงช่องโหว่เนื่องจากการหดตัวโดยลดการเปลี่ยนแปลงในความหนา

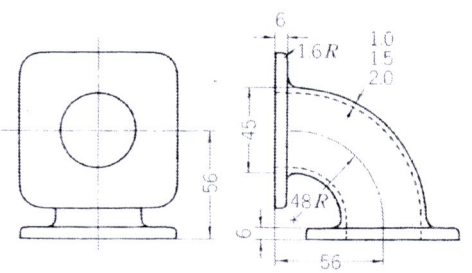
ในรูป 1 ของรูปที่ 2.14 จะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงในความหนาเป็นอย่างมากทำให้ส่วนที่หนาสุดแข็งตัวช้ามาก ดังนั้นจะเกิดช่องโหว่เนื่องจากการหดตัว ในรูป 2 ได้ดัดแปลงให้ความหนาเท่ากันให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้จุดเสียที่เคยมีก็จะหมดไป

7. ตัวอย่างการป้องกันไม่ให้เกิดรอยร้าว โดยลดการเปลี่ยนแปลงในความหนา

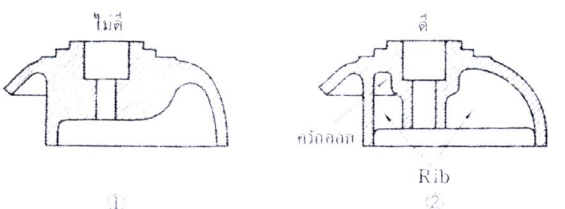
รูป 1 ของรูปที่ 2.15 แสดงงานรูปสี่เหลี่ยม (Lattice-shaped) เห็นได้ว่าตรงที่โครง (Rib) ตัดกันจะหนาและจะแข็งตัวและเย็นช้า ส่วนนี้จะถูกดึงโดยความเค้นดึง (Tensile stress) ซึ่งเกิดจากการเย็นตัวและหดตัวของโครงทำให้เกิดรอยร้าวตรงที่โครงตัดกันนั้นถ้าดัดแปลงเสียดังในรูป 2 การตัดกันเปลี่ยนเป็นแบบ Y ทำให้ตรงที่ตัดกันไม่หนาและไม่เกิดจุดร้อน (Hot spot) รุ่นแรงเท่าแบบเดิมดังนั้นความเค้นดึงก็จะลดลง

8. ตัวอย่างการออกแบบโดยคำนึงถึงการไหลของน้ำโลหะขณะเท

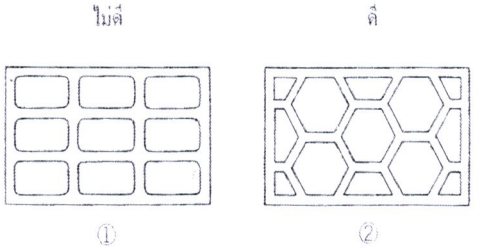
สำหรับข้อต่อในรูป 1 ของรูปที่ 2.16 ขณะเทน้ำโลหะค่อยๆ เต็มขึ้นมาจากข้างล่างจนกระทั่งถึงส่วนราบ a ที่อยู่ด้านบนดังนั้นบรรดาสิ่งที่ปนมากับน้ำโลหะจะสะสมอยู่ตรงนี้ทำให้เกิดจุดเสียเช่นมีขี้ตะกรัน (Slag) หรือทรายแทรกอยู่ในเนื้อบางครั้งน้ำโลหะไหลไม่แรงพอทำให้น้ำโลหะเข้าไม่เต็มหรือแข็งตัวเสียก่อนจะเต็ม (Cold shut) ถ้าทำให้ส่วน a เอียงดังในรูป 2 น้ำโลหะจะเต็มขึ้นมาตามแนวเอียงทำให้จุดเสียดังกล่าวหายไป



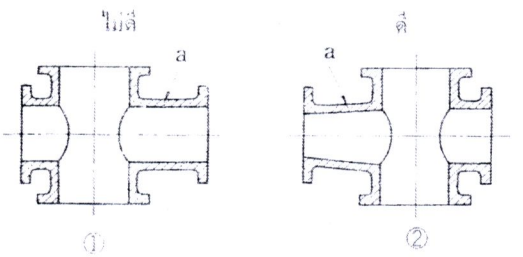
รูปที่ 2.13 หลีกเลี่ยงความบาง [5]



รูปที่ 2.14 ไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลงในความหนามากเกิน [5]



รูปที่ 2.15 ไม่ให้ตรงสันติดกันมีความหนามาก [5]



รูปที่ 2.16 ป้องกันการเกิดจุดเสียจากน้ำโลหะไหลไม่ดี [5]

2.4.2 รูปร่างและมิติมาตรฐานของชิ้นงานหล่อ

1. ความหนาต่ำสุด

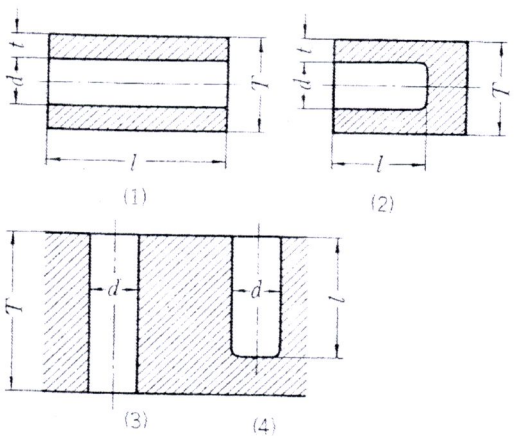
จะต้องกำหนดมิติของชิ้นงานหล่อให้หล่อได้ง่าย ถ้าความหนาน้อยเกินไปน้ำโลหะจะเข้าไม่เต็มทำให้งานเสียดังนั้นจึงมีการกำหนดความหนาต่ำสุดขึ้น ความหนาต่ำสุดนี้ขึ้นกับชนิดของน้ำโลหะ ตารางที่ 2.3 แสดงความหนาต่ำสุดสำหรับการหล่อที่ใช้แบบทรายค่าที่กำหนดไว้นี้เป็นค่ามาตรฐาน จะใช้ความหนาต่ำกว่าที่กำหนดก็อาจทำได้แต่จะทำได้ยาก

2. ขนาดของไส้แบบ

ในการใช้ไส้แบบเพื่อทำให้เกิดรูในชิ้นงานหล่อนั้นจะต้องคำนึงถึงพื้นที่หน้าตัดและความยาวของไส้แบบ ถ้าไส้แบบมีขนาดเล็กและยาวไส้แบบนั้นจะร้อนจัดจนทรายเกิดหลอมเหลวและแก๊สที่เกิดจากทรายจะทำให้เกิดรูแก๊ส (Blow hole) ในชิ้นงานหล่อ ดังนั้นไส้แบบจะต้องไม่มีรูปร่างยาวเรียว ค่าในตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.17 เป็นค่ามาตรฐาน

3. การเปลี่ยนแปลงในความหนา

ความหนาของชิ้นงานหล่อควรจะค่อยเปลี่ยนไม่ใช่เปลี่ยนโดยกะทันหันถ้าการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นทางด้านเดียวควรใช้มุมลาด 15 องศา และถ้าเปลี่ยนทั้งสองด้านควรใช้มุมลาดด้านละ 7.5 องศา (ดูรูปที่ 2.18)



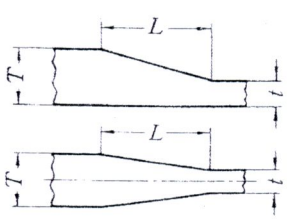
รูปที่ 2.17 พิกัดของไส้แบบใช้ในการทำรู [5]

ตารางที่ 2.2 พิกัดของไส้แบบใช้ในการทำรู

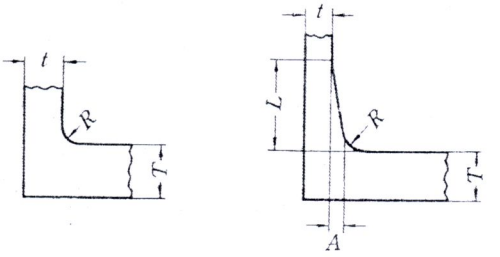
ชนิดของรู	เหล็กหล่อเทา	เหล็กเหนียวหล่อ	ความยาว
(1)	$d \geq t$ (อย่างต่ำ 10mm) หรือ $d \geq T/3$	$d \geq 2t$ (อย่างต่ำ 20 mm) หรือ $d \geq T/2$	$1 \leq 3d$
(2)	$d \geq t$ (อย่างต่ำ 10mm) หรือ $d \geq T/3$	$d \geq 2t$ (อย่างต่ำ 20 mm) หรือ $d \geq T/2$	$1 \leq 2d$
(3)	$d \geq T/2$ (อย่างต่ำ 10 mm)	$d \geq T$ (อย่างต่ำ 20 mm)	1 = T
(4)	$d \geq T/2$ (อย่างต่ำ 10 mm)	$d \geq T$ (อย่างต่ำ 20 mm)	$1 \leq 2d$

ตารางที่ 2.3 ความหนาต่ำสุด (mm) ของผนังที่จะหล่อได้โดยใช้แบบหล่อทราย

วัสดุ	ขนาดของชิ้นงานหล่อ (mm)					
	น้อยกว่า 200	200~400	400~800	800~1250	1250~2000	2000~3200
เหล็กหล่อเทา	3	4	5	6	8	10
เหล็กหล่อคุณภาพสูง	4~5	5~6	6~8	8~10	10~12	12~16
เหล็กหล่อแกรไฟต์กลม	5~6	6~8	8~10	10~12	12~16	16~20
เหล็กเหนียวคาร์บอน	5	4	8	10	12	16
เหล็กเหนียวไร้สนิม	8	10	12	16	20	25
บรอนซ์และของทองเหลือง	2	2.5	3	4	5	6
ทองเหลืองทนความเค้นดึงสูง	3	3	5	6	8	10
อลูมิเนียมผสม	2~3	2.5~4	3~5	4~6	5~8	6~10



รูปที่ 2.18 ความหนาเปลี่ยนไปตามความลาด [5]



รูปที่ 2.19 หัวต่อรูปตัว L [5]

กำหนดมุมลาดไว้ดังนี้ $L = 4\,(T-t)$ $A = (T-t)$ (2.3)

T: ความหนาของส่วนที่หนากว่า t : ความหนาของส่วนที่บางกว่า และมุมลาดตามที่กำหนดไว้นี้จะเท่ากับ 15 องศา รัศมีตรงมุมจะต้องเท่ากับ $R = T/3$

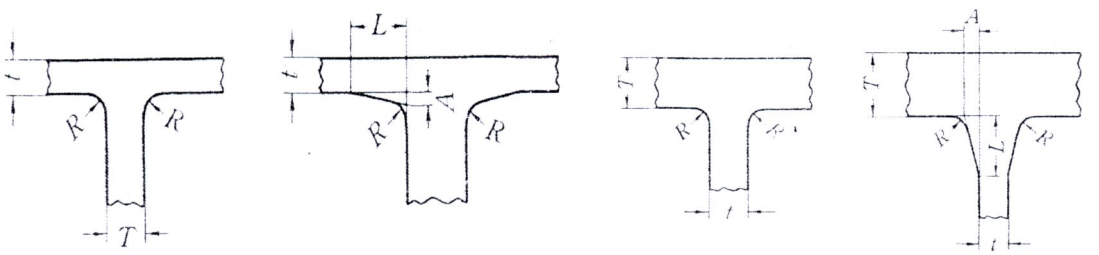
4. มุมฉากและมุมแหลม (หัวต่อรูปตัว L)

ส่วนที่มีรูปเป็นมุมฉากและมุมแหลมจะต้องมีการมนด้วยรัศมีที่เหมาะสมตรงมุมในนอกจากในกรณีพิเศษ ถ้าอัตราส่วนของความหนาที่มาบรรจบกันตรงหัวต่อต่ำกว่า 1.5 : 1 ให้ใช้รัศมี R ของมุมในเท่ากับ $T/3$ (T เป็นความหนาของส่วนที่หนากว่า) แต่ถ้าอัตราส่วนสูงกว่านั้น นอกจากจะต้องมีการมนตรงมุมแล้วยังต้องมีมุมลาดดังแสดงในรูปที่ 2.19

5. หัว ต่อ T และ Y

ตรงหัวต่อ T และ Y ความหนามักจะมาก ผู้ออกแบบจะต้องระวังมิให้ความหนามากจนเกินไป แต่ก็จำเป็นต้องมีการมนที่มุม (ทั้งๆ ที่การมนทำให้ความหนาเพิ่มขึ้น) เพราะถ้าไม่มนจะเกิดการร้าวที่หัวต่อ หรือมิฉะนั้นทรายที่อยู่ตรงมุมจะมีอุณหภูมิสูงจนหลอมละลายรัศมีของการมนที่มุมจะต้องเท่ากับ T/3 ถ้าได้ค่าเป็นจุดทศนิยมให้ปัดขึ้นเป็นหน่ายเต็ม

ถ้าอัตราส่วนของส่วนหนาและส่วนบางต่ำกว่า 1.5 : 1 อาจต่อกันได้ตรงๆ เลยและมีการมนตรงมุมแต่ถ้าอัตราส่วนสูงกว่านั้นจะต้องมีมุมลาดเพื่อมิให้เกิดการเปลี่ยนความหนาโดยกะทันหันแต่โครง (Rib) และปีก (Fin) จะไม่มีมุมลาดถึงแม้อัตราส่วนของความหนาจะสูง



(a) ส่วนหนามาชนส่วนบาง (b) ส่วนบางมาชนส่วนหนา

รูปที่ 2.20 หัวต่อรูปตัว T [5]

2.5 แบบรูป (Drawing) สำหรับการหล่อ

ก่อนที่จะทำกระสวนแบบรูป (Drawing) ซึ่งเป็นผลงานของผู้ออกแบบเครื่องกลจะต้องได้รับการเปลี่ยนให้เป็นแบบรูปสำหรับการหล่อ จะต้องคำนึงถึงประเด็นต่างๆ เป็นต้นว่าทำอย่างไรจึงจะได้ชิ้นงานหล่อที่ดี ทำอย่างไรค่าทำแบบหล่อจึงจะต่ำลง ทำอย่างไรจึงจะทำกระสวนได้โดยง่ายจะยึดไส้

หล่ออย่างไรให้เข้าที่ ทำอย่างไรจึงจะแกะชิ้นงานหล่อจากแบบหล่อได้โดยง่าย และจะต้องตัดสินเรื่องทิศทางของแบบหล่อส่วนบนและแบบหล่อส่วนล่างตำแหน่งของหน้าผ่าส่วนใดทำจากแบบหล่อและส่วนใดทำจากไส้หล่อแล้วกำหนดขนาดเผื่อหด (Shrink allowance) เผื่อการแต่งผิวด้วยเครื่องกลโรงงาน (Machine-finish allowance) และความลาดของแบบ (Pattern draft) ฯลฯ แล้วจากนั้นก็เขียนแบบสำหรับชิ้นงานหล่อแล้วส่งให้ผู้ทำกระสวน (Pattern maker)

2.5.1 การกำหนดว่าส่วนไหนควรจะอยู่กับแบบหล่อส่วนบน ส่วนไหนควรอยู่กับแบบหล่อส่วนล่างและการกำหนดหน้าผ่า (Parting Line)

การกำหนดว่าส่วนใดจะอยู่กับแบบหล่อส่วนบนหรือส่วนล่างและการกำหนดหน้าผ่าสำคัญอย่างยิ่งต่อการที่จะได้ชิ้นงานหล่อที่ดีงานนี้ต้องการประสบการณ์จึงจะทำได้ดีมีหลักเกณฑ์การพิจารณาดังนี้

1. จะต้องแกะกระสวนจากแบบหล่อได้ง่าย หน้าผ่าจะต้องเป็นแนวเรียบ (plane) ส่วนมากแบบหล่อส่วนบนจะค่อนข้างตื้น
2. การวางและยึดไส้แบบจะต้องทำได้ง่ายจะต้องมีบ่าหรือวิธีการอย่างอื่นที่จะกำหนดตำแหน่งที่แน่นอนของไส้แบบหล่อ
3. ระบบการจ่ายน้ำโลหะจะต้องสามารถจ่ายน้ำโลหะได้สะดวกที่สุด
4. ถ้าหน้าผ่าไม่อยู่ในแนวเรียบแนวเดียว (One plane) แต่ประกอบด้วยหลายระดับจะทำให้การทำแบบหล่อต้องใช้เวลานาน และจะทำให้แบบหล่อมีส่วนที่ปูดออกมา นอกจากนั้นจะทำให้มีค่าใช้จ่ายมากในการทำกระสวน (Pattern making) จึงสมควรอย่างยิ่งที่จะเลี่ยงหน้าผ่าในลักษณะดังกล่าว

การกำหนดหน้าผ่าเป็นเงื่อนไขสำคัญในการที่จะได้ชิ้นงานหล่อที่ดีจะต้องมีความเข้าใจแบบรูป (Drawing) และมีความชำนาญจึงจะสามารถกำหนดหน้าผ่าได้ดี

2.5.2 การกำหนดขนาดเผื่อหด

ชิ้นงานหล่อจะหดขณะที่แข็งตัวและเย็นตัว ผู้ทำกระสวนใช้ไม้บันทัดเผื่อหด (Shrink rule) ซึ่งเพิ่มความยาวมิติของกระสวนไว้เผื่อหด ขนาดการหดตัวมักไม่เท่ากันในทิศทางต่างๆ (Anisotropic) ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของโลหะรูปร่าง ตำแหน่งความหนาของชิ้นงาน ตลอดจนมิติและความแข็งแรงของไส้แบบในบางกรณีจะใช้ไม้บรรทัดเผื่อหดต่างกันสำหรับแนวตั้งและแนวนอน ทั้งนี้ขึ้นกับรูปร่างของชิ้นงาน ในกรณีเช่นนี้จะต้องระบุไว้ในแบบรูป (Drawing) สำหรับกระสวน ตารางที่ 2.4 ให้ตัวเลขที่มักใช้กันสำหรับขนาดเผื่อหด

ตารางที่ 2.4 ขนาดการเผื่อหดที่ควรใช้

การเผื่อหด	วัสดุที่หล่อ
8/1000	เหล็กหล่อ เหล็กเหนียวหล่อบางๆ
9/1000	เหล็กหล่อ, เหล็กเหนียวหล่อที่หดตัวมาก
10/1000	เหล็กหล่อ, เหล็กเหนียวหล่อที่หดตัวมาก และอลูมิเนียม
12/1000	อลูมิเนียมผสม, บรอนซ์, เหล็กเหนียวหล่อ (หนา5~7mm)
14/1000	ทองเหลืองทนความดันดึงสูง, เหล็กเหนียวหล่อ
16/1000	เหล็กเหนียวหล่อ (หนามากกว่า 10mm)
20/1000	เหล็กเหนียวหล่อขนาดใหญ่
25/1000	เหล็กเหนียวหล่อที่ใหญ่และหนา

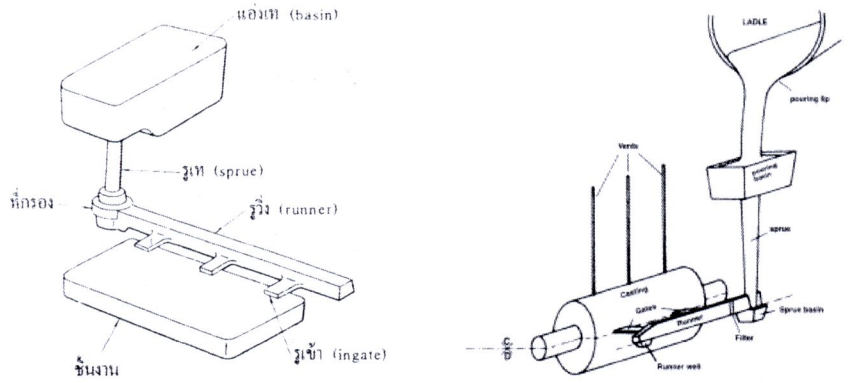
2.6 การจัดระบบงานหล่อ

การกำหนดรูเท (Sprue) รูล้น (Riser) ทุ่นเย็น (Chill) ฯลฯ สำหรับงานหล่อ การกระทำดังกล่าวนับได้ว่าสำคัญที่สุดในการหล่อโลหะ ในการทำการหล่อจะต้องมีรูเท ซึ่งนำน้ำโลหะเข้าสู่ช่องว่างของแบบหล่อและต้องมีรูล้นซึ่งส่งน้ำโลหะเข้าสมทบเมื่อมีการหดตัวขณะแข็งตัวและเย็นตัว ขนาดของรูเทและรูล้นขึ้นกับความหนาของชิ้นงานและชนิดของน้ำโลหะ ดังนั้นการกำหนดขนาดจึงเป็นงานที่ค่อนข้างยาก ยิ่งกว่านั้นยังต้องคำนึงถึงสภาวะของการเท เช่น อุณหภูมิน้ำโลหะขณะเท และอัตราการเท เนื่องจากคุณภาพของชิ้นงานหล่อขึ้นกับรูเท รูล้น สภาวะการเทต่างๆ ฯลฯ ดังนั้นการกำหนดสิ่งดังกล่าวนี้จึงควรกระทำด้วยความระมัดระวัง

2.6.1 ระบบจ่ายน้ำโลหะ (Gating system)

ระบบจ่ายน้ำโลหะคือทางที่น้ำโลหะเข้าสู่ช่องว่างของแบบหล่อ ทุกๆ ส่วนมีชื่อนับตั้งแต่แอ่ง (Pouring cup) ที่รับน้ำโลหะที่ลงมาจากเบ้า (Ladle) จนถึงรูที่นำเข้าสู่ช่องว่างในแบบหล่อ ชื่อเหล่านี้มี

- แอ่งเท (Basin) รูเทแอ่งเทเป็นที่รับน้ำโลหะจากเบ้า



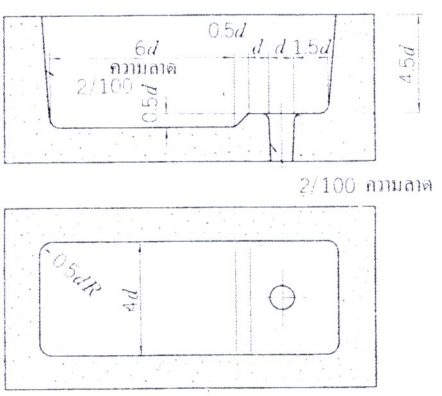
รูปที่ 2.21 ชื่อของส่วนต่างๆ ในระบบการป้อนน้ำโลหะ [5], [6]

- รูเท (Sprue หรือ Downsprue) เป็นทางที่นำน้ำโลหะจากอ่างเทไปสู่รูวิ่งและรูเข้า
- รูวิ่ง (Runner) เป็นทางที่นำน้ำโลหะจากรูเทไปยังส่วนต่างๆ ของแบบหล่อ
- รูเข้า (Ingate) เป็นทางที่น้ำโลหะจากรูวิ่ง เข้าสู่ช่องว่างในแบบหล่อ

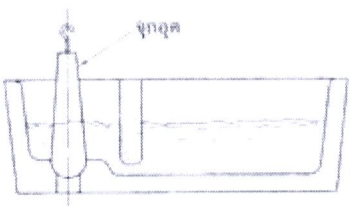
2.6.2 รูปร่างของส่วนต่างๆ ของระบบจ่ายน้ำโลหะ

1. แอ่งเท (Basin หรือ pouring cup)

แอ่งเทมีรูปร่างเป็นกรวยหรือถ้วย อยู่เหนือรูเท แอ่งเทต้องมีลักษณะที่จะกันมิให้สิ่งเจือปน (Impurity) ในน้ำโลหะจากเบ้าเข้าไปในรูเท ดังนั้นจะต้องไม่ตื้นนัก ถ้าอัตราส่วนระหว่างความสูงของระดับน้ำโลหะในแอ่งเทเรียกว่า H และเส้นผ่าศูนย์กลางของอ่างเทเรียกว่า d น้อยเกินไป เช่นต่ำกว่า 3 จะเกิดการหมุนตัวของน้ำ (Vortex) ซึ่งจะพาขี้ตะกรัน (Slag) หรือสิ่งเจือปนอื่นซึ่งลอยอยู่ที่ผิวน้ำโลหะเข้าไปในรูเทด้วย ดังนั้นความสูงของอ่างจึงควรจะมีมากแต่ถ้าลึกเกินไปจะเทไม่สะดวกและจะมีน้ำโลหะเหลืออยู่มากซึ่งเป็นการไม่ประหยัดดังนั้นมักให้ความสูงของแอ่งเป็น 5~6 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางมีแอ่งเทแบบที่มีส่วนกันตะกรัน (Skim core) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 จะต้องเทน้ำโลหะลงในส่วนที่ห่างจากรูเท ส่วนก้นจะกันมิให้ขี้ตะกรันและสิ่งเจือปนผ่านปล่อยแต่น้ำโลหะที่สะอาดลอดข้างใต้เข้าสู่รูเท



รูปที่ 2.22 แอ่งเทพร้อมด้วยส่วนกันขี้ตะกรัน [5]



รูปที่ 2.23 แอ่งเทพร้อมด้วยจุกอุด [5]

บางครั้งก็มีจุกรูเท (Sprue plug) อยู่ที่ทางเข้าของรูเทจะเปิดก็ต่อเมื่อมีน้ำโลหะในแอ่งเทเต็ม (รูปที่ 2.23) สิ่งเจือปนและขี้ตะกรันลอยอยู่ที่ผิวทำให้ไม่เข้ารูเท ถ้าแอ่งเทเล็กเมื่อเทียบกับชิ้นงานอาจต้องมีการเติมน้ำโลหะลงแอ่งเทอีก 2 ~3 ครั้งก่อนที่แบบหล่อจะเต็มในบางกรณีก็ทำแอ่งเทให้ใหญ่กว่าช่องว่างในแบบหล่อ ทำให้เทน้ำโลหะลงในแอ่งเทให้เต็มครั้งเดียวพอ

2. รูเท (Sprue)

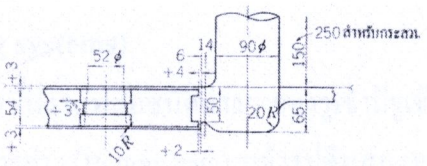
รูเทเป็นรูตรงและอยู่ในแนวตั้ง มีหน้าตัดเป็นรูปกลม บางครั้งหน้าตัดจะเท่ากันตลอดจากบนถึงล่าง แต่ส่วนมากจะใหญ่ข้างบนและค่อยๆ เล็กลง รูเทหน้าตัดเท่ากันนั้นใช้เมื่อต้องการให้น้ำโลหะเข้าเร็วและสม่ำเสมอหน้าตัดคอดลงนั้นใช้เมื่อต้องการกันมิให้สิ่งเจือปนเข้าคือต้องการปล่อยให้เข้าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ทำรูเทโดยการทะลวงแบบหล่อด้วยท่อนของแข็งหรือใช้ปลอกทำด้วยวัสดุทนไฟ (Refractory chamotte sleeve) วิธีทำประเภทหลังใช้สำหรับรูเทที่ยาว

3. รูวิ่ง (Runner)

รูวิ่งมักมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูหรือครึ่งวงกลม ทั้งนี้เพราะทำหน้าตัดรูปร่างดังกล่าวบนหน้าผ่าได้ง่ายและนอกจากนั้นเส้นรอบวงของหน้าตัดยังมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเนื้อที่ ดังนั้นโลหะจะเย็นช้า รูวิ่งนี้ยิ่งใหญ่ยิ่งดีเพราะทำให้น้ำโลหะเย็นช้า แต่ถ้าใหญ่เกินไปจะสิ้นเปลืองมาก รูปที่ 2.25 แสดงมิติที่เหมาะของหน้าตัดสำหรับความต่างๆของรูวิ่งน้ำโลหะในรูวิ่งจะยังคงสิ่งเจือปนลอยอยู่โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเริ่มเทดังนั้นควรพยายามเอาสิ่งเจือปนเหล่านี้ออกวิธีทำมีดังนี้

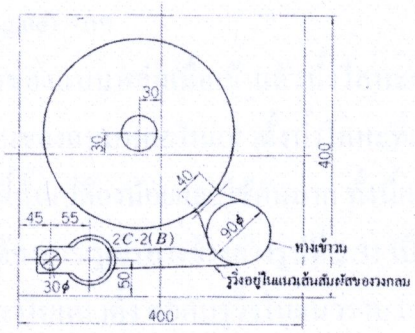
- ทำให้น้ำโลหะหมุนก่อนถึงรูเข้าดังแสดงในรูปที่ 2.26 น้ำโลหะเข้าอ่างพักตามแนวเส้นสัมผัสแล้วหมุนทำให้สิ่งเจือปนไปรวมกันอยู่ตรงกลาง

- มีส่วนต่อเพื่อดักสิ่งเจือปนตรงปลายรูวิ่งน้ำโลหะที่มาถึงในตอนแรกสุดพร้อมทั้งสิ่งเจือปนจะค้างอยู่ในส่วนนี้ (รูปที่ 2.27)

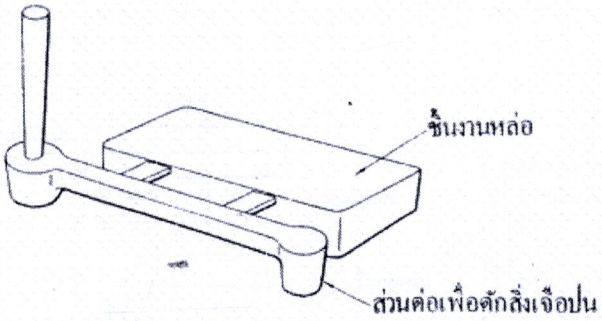


หน้าตัดของรูวิ่ง ($A \times A$) mm	ความยาวของรูวิ่ง (C) mm
$A-3$, A, $A+3$	C, รูเข้า
20×20	< 600
30×30	< 1000
40×40	< 2000
50×50	< 3000

รูปที่ 2.25 มิติของรูวิ่ง [5]



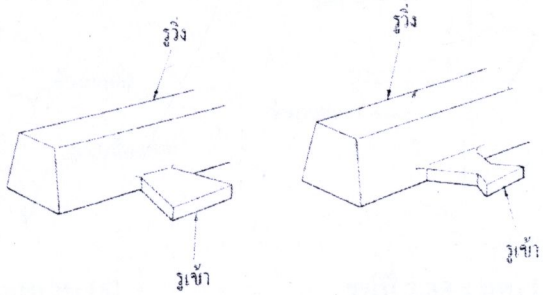
รูปที่ 2.26 ทางเข้าวน [5]



รูปที่ 2.27 ส่วนต่อเพื่อดักสิ่งเจือปน [5]

4. รูเข้า (Ingate)

รูเข้านั้นจะมีขนาดเล็กกว่ารูวิ่งเพราะต้องการกันมิให้สิ่งเจือปนเข้าไปในช่องว่างของแบบหล่อหน้าตัดของรูเข้ามีรูปร่างสี่เหลี่ยมมุมฉาก สี่เหลี่ยมคางหมู สามเหลี่ยมและครึ่งวงกลม รูเข้ามักจะคอดลงก่อนถึงช่องว่างของแบบหล่อแล้วจึงใหญ่ขึ้นเมื่อจะเข้าแบบ ทั้งนี้เพื่อกักเอาสิ่งที่หลุดติดมากับน้ำโลหะ (เช่นทราย) ไว้ไม่ให้เข้าแบบ ในตอนที่เอารูเทออกมักตัดส่วนที่คอดที่สุดนี้เพื่อไม่ให้ตัดผิดโดยไปตัดเอาส่วนหนึ่งของชิ้นงานหล่อ (รูปที่ 2.28)

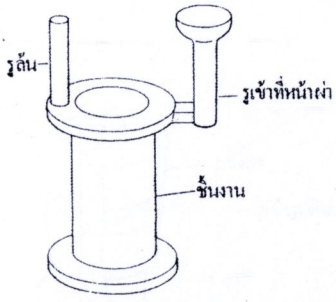


รูปที่ 2.28 รูปร่างของรูเข้า [5]

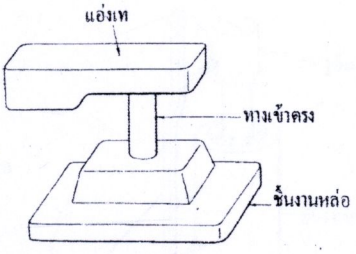
2.6.3 รูเข้าชนิดต่างๆ (Classification of gating systems)

รูเข้ามีชนิดต่างๆ กันชนิดของรูเข้าขึ้นกับรูปร่างของชิ้นงานหล่อชนิดต่างๆ ของรูเข้ามีรูเข้าที่หน้าผ่า (Parting gate) รูเข้าทางข้างบน (Top gate) รูเข้าทางข้างล่าง (Bottom gate) รูเข้ารูปดินสอ (Pencil gate) รูเข้าหลายระดับ (Step gate) และรูเข้ารูปลิ่ม (Wedge gate) ฯลฯ

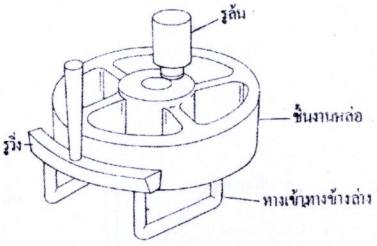
รูเข้าที่หน้าผ่า รูปที่ 2.29 เป็นรูเข้าที่เข้าตรงหน้าผ่าของแบบหล่อเมื่อเข้าแล้วน้ำโลหะจะลงไปในช่องว่างรูเข้าทางข้างบน (Top gate) เข้าตรงจากข้างบนของแบบหล่อในแนวตั้งน้ำโลหะที่เข้าตามวิธีนี้จะรบกวน รูปที่ 2.30 น้ำโลหะที่อยู่ในแบบรูเข้าชนิดนี้สิ้นเปลืองน้อยและใช้กันมาก ทั้งนี้เพราะในการทำแบบหล่อทำระบบรูเข้าได้สะดวก และรูมักจะไม่ต้องยาว รูเข้าทางข้างล่างรูปที่ 2.31 เป็นรูเข้าที่เข้าตรงส่วนล่างของแบบหล่อดังนั้นส่วนมากจะมีรูเทยาวในแนวตั้ง ต่อกับรูวิ่งในแนวราบ แล้วจึงมีรูเข้าต่อขึ้นสู่แบบ



รูปที่ 2.29 รูเข้าที่หน้าผ่า [5]



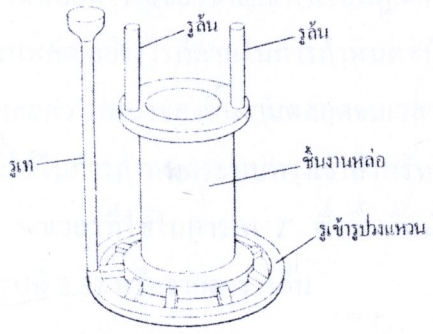
รูปที่ 2.30 รูเข้าทางข้างบน [5]



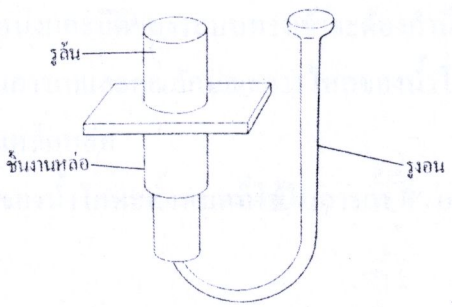
รูปที่ 2.31 รูเข้าทางข้างล่าง [5]

ในบางกรณีก็ใช้รูเข้ารูปวงแหวน (Ring gate) ดังในรูปที่ 2.32 และใช้รูงอน (Horn gate)

รูเข้าทางข้างล่างจะทำให้น้ำโลหะขยับขึ้นในช่องว่างของแบบโดยไม่มีสิ่งรบกวนเช่นรูเข้าทางข้างบน จึงเหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการให้น้ำโลหะไหลเข้าเร็วๆ เช่นเมื่อทำเหล็กเหนียวหล่อหรือเหล็กหล่ออื่นที่เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย เช่นเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม

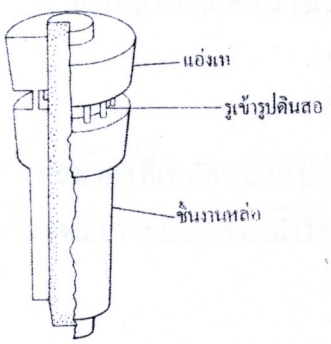


รูปที่ 2.32 รูเข้ารูปวงแหวน [5]

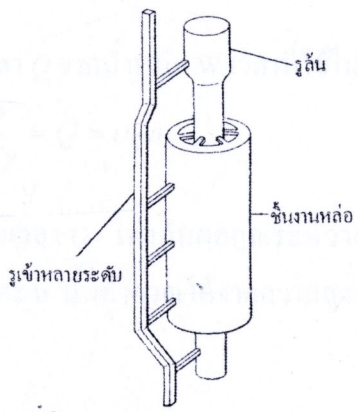


รูปที่ 2.33 รูงอน [5]

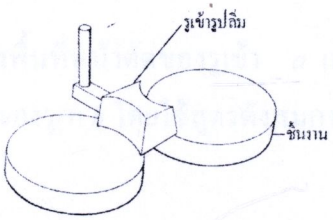
รูเข้ารูปดินสอ (Pencil gate) รูปที่ 2.34 เป็นระบบที่น้ำโลหะไหลลงจากรูเล็กๆ หลายรูที่เจาะไว้ในแอ่งเทเหมาะสำหรับชิ้นงานหล่อที่ยาวและบางเช่นท่อ เมื่อมีรูเข้ารูปดินสออยู่เหนือส่วนบนของแบบหล่อท่อที่อยู่ในแนวตั้งน้ำโลหะจะเต็มจากข้างล่างขึ้นมา อย่างสม่ำเสมอและจะได้ท่อที่มีเนื้อสม่ำเสมอ รูเข้าหลายระดับ (Step gate) รูปที่ 2.35 เป็นชนิดที่มีรูเทต่อกับรูเข้าหลายรู น้ำโลหะจะไหลเข้าช่องว่างในโลหะในช่องว่างเสมอและการแข็งตัวจะไล่จากข้างล่างมาถึงข้างบน ถ้าเป็นดังนี้ถึงแม้ในกรณีโลหะที่มีการหดตัวมากเช่นเหล็กเหนียวหล่อก็จะมีโพรงที่เกิดจากการหดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ถ้าไม่ได้ทำรูเข้าชนิดนี้อย่างดีเป็นพิเศษแล้ว น้ำโลหะจะไหลเข้าแบบจากรูเข้าอันต่ำที่สุดอันเดียวและดังนั้นจะไม่ได้ผลดีเท่าที่ควรได้จากรูเข้าชนิดหลายระดับ รูเข้ารูปลิ่ม (Wedge gate) รูปที่ 2.36 เป็นชนิดที่รูมีรูปร่างยาวแต่แคบอยู่ตรงส่วนบนของแบบ ใช้สำหรับชิ้นงานหล่อที่เรียบและแบนที่มีความหนาปานกลาง น้ำโลหะจะค่อยๆ เข้าโดยไม่กระทบกระเทือนน้ำโลหะที่อยู่ในแบบแล้ว ในกรณีนี้น้ำโลหะที่อยู่ข้างบนจะร้อนกว่าที่อยู่ข้างล่าง และจะมีโพรงที่เกิดจากการหดเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.34 รูเข้ารูปดินสอ [5]



รูปที่ 2.35 รูเข้าหลายระดับ [5]

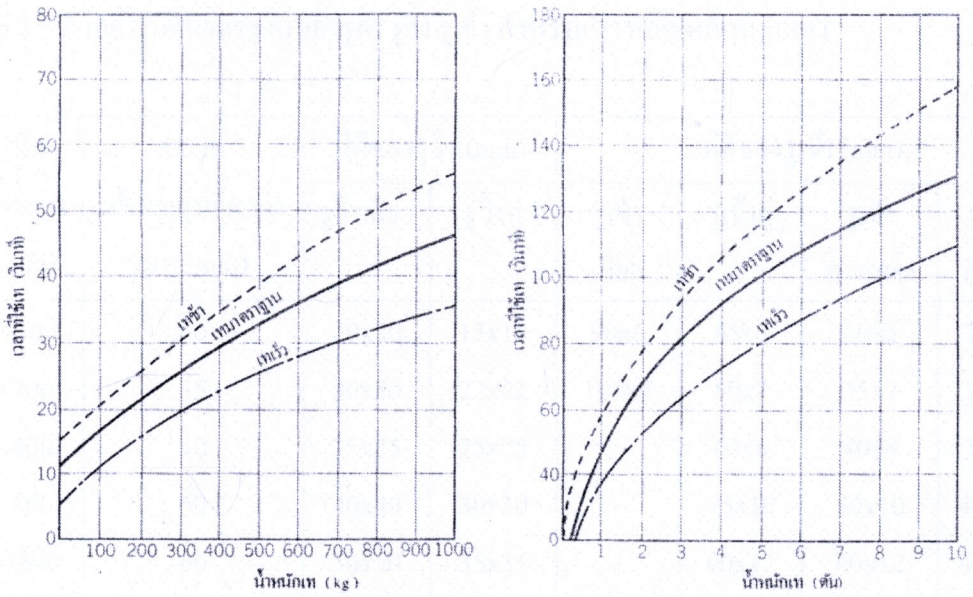


รูปที่ 2.36 รูเข้ารูปลิ่ม [5]

1. ระบบรูเข้าสำหรับชิ้นงานเหล็กหล่อ

กำหนดระบบรูที่ผู้ทำแบบหล่อกำหนดเอาเองโดยไม่มีหลักเกณฑ์อะไรก็ทำกันมากแต่ก็มีโรงหล่อเป็นจำนวนไม่น้อยที่ใช้ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะเป็นผู้กำหนดและถือเป็นส่วนหนึ่งของกระสวน และจึงส่งต่อให้ผู้ทำแบบหล่อ อย่างไรก็ตามในการกำหนดชนิดตำแหน่งและมิติของระบบทางเข้าจะต้องคำนึงถึงมิติรูปร่างและความหนาของชิ้นงานตลอดจนเวลาที่ใช้ในการเทและคุณลักษณะการไหลของน้ำโลหะวิธีต่อไปนี้ใช้ในการกำหนดระบบทางเข้าสำหรับชิ้นงานเหล็กหล่อ

- หาเวลาที่ใช้ในการเท T ซึ่งขึ้นกับน้ำหนักของน้ำโลหะทั้งหมดที่ใช้ในการเท W อาจหา T ได้จากรูปที่ 2.37 หรือจากตารางอื่น



รูปที่ 2.37 แผนภูมิอัตราการเทน้ำโลหะ [5]

- หาปริมาตรที่เทต่อหน่วยเวลา Q จากน้ำหนัก W เวลาที่ใช้ในการเท T และน้ำหนักจำเพาะของโลหะ

$$\frac{W}{T\gamma} = Q = \upsilon \cdot a \qquad (2.4)$$

- ปริมาตรที่เทต่อหนึ่งหน่วยเวลา Q เท่ากับผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดของรูเข้า a และความเร็วมัชฌิมา (Mean) ของน้ำโลหะ υ นั้นคำควณได้จากความสูงของรูเท h โดยใช้สูตรดังสมการที่ (2.1)

- ถ้ารูเข้ามากกว่า 2 รู พื้นที่หน้าตัดของรูเข้าแต่ละอันจะเท่ากับพื้นที่หน้าตัด a ที่หาได้จากข้างบนหารด้วยจำนวนรูเข้า รูเข้าจะต้องมีขนาดที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับที่เพิ่งหาได้

- มิติของรูเทและรูวิ่งหาได้จากพื้นที่หน้าตัดรวมของรูเข้าสำหรับเหล็กหล่อมีหลักเกณฑ์ดังนี้

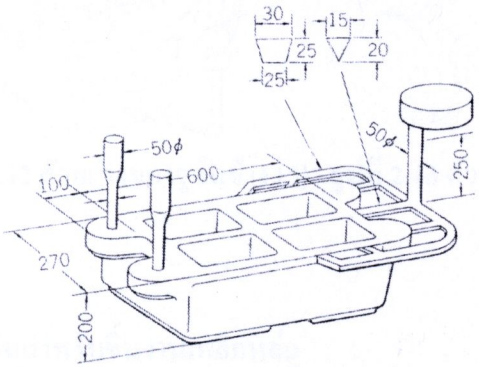
พื้นที่หน้าตัดของรูเท > พื้นที่หน้าตัดของรูวิ่ง > พื้นที่หน้าตัดของรูเข้า

อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ทั้งสามเป็นดังนี้ 1: 0.9 : 0.8 หรือ 1.0 : 0.75 : 0.5 ส่วนรูเข้าที่เข้าจากข้างล่าง (Bottom gate) นั้นจะต้องมีพื้นหน้าตัดของรูเข้าที่ใหญ่ในกรณีเช่นนี้ในบางครั้งก็ใช้อัตราส่วน 1: 1.1: 1.2 หรือ 1: 1.25 : 1.5 เพื่อความสะดวกมีตารางที่ 2.5 ซึ่งบอกขนาดของรูเท รูวิ่งและรูเข้ามาตรฐานสำหรับชิ้นงานหล่อขนาดต่างๆ สำหรับในตารางที่ 2.5 รูเทใหญ่กว่ารูเข้า

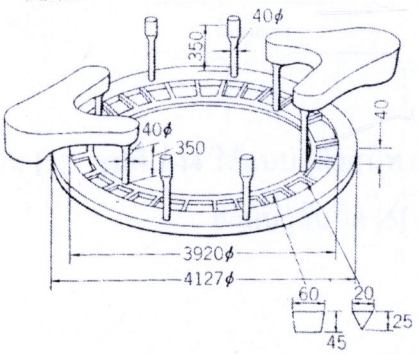
ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างมิติมาตรฐานของรูเท รูวิ่ง รูเข้า สำหรับการหล่อเหล็กหล่อเทา

น้ำหนักของชิ้นงานหล่อ (kg)	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูเท (mm)	มิติของรูวิ่ง (mm)		มิติของรูเข้า (mm)			
		รูวิ่งเดียว	รูวิ่งคู่	รูเข้าเดี่ยว	รูเข้าคู่	รูเข้าสามทาง	รูเข้าสี่ทาง
150 ~100	30	20x20	15x15	90x6	45x6	30x6	25x6
100~200	35	30x30	22x22	100x7	50x7	35x7	25x7
200~400	40	35x35	25x25	-	60x8	40x8	30x8
400~800	50	40x40	30x30	-	75x10	50x10	40x10
800~1600	60	50x50	35x35	-	90x12	60x12	45x12
1600~3200	75	60x60	45x45	-	-	70x15	60x15

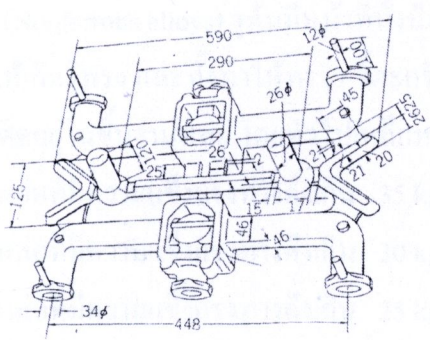
จำนวนของรูวิ่งและรูเข้าขึ้นกับรูปร่างของชิ้นงาน น้ำโลหะจะต้องเข้าโพรงโดยสม่ำเสมอที่สุดเท่าที่จะทำได้ และระยะทางจากรูเทถึงโพรงจะต้องสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ รูเข้าจะต้องอยู่ในทิศทางที่จะทำให้น้ำโลหะไม่วิ่งเข้าชนแบบหรือชนไส้แบบ



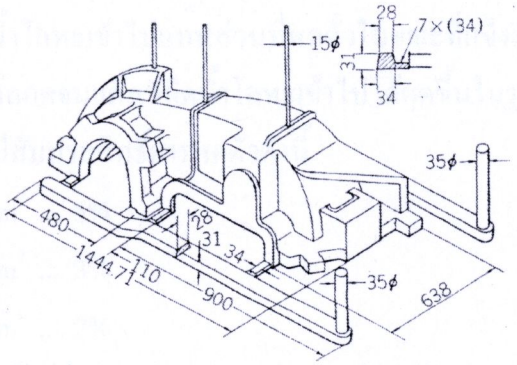
รูปที่ 2.38 ระบบรูเข้าของที่ตั้งแบริ่ง [5]



รูปที่ 2.39 ระบบรูเข้าของปลอกเพลากันรั่ว [5]



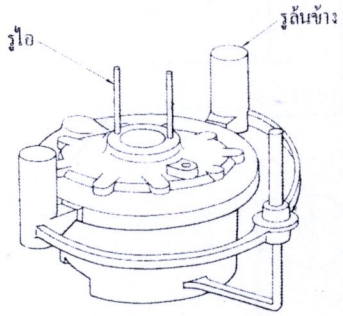
รูปที่ 2.40 ระบบรูเข้าของท่อไอดี [5]



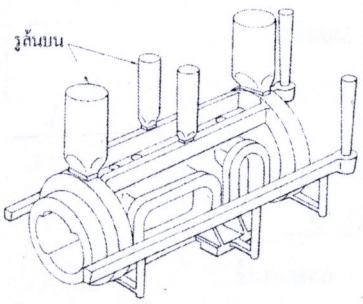
รูปที่ 2.41 ระบบรูเข้าของกล่องเฟือง รูปตัดของรูวิ่งและรูล้น (Riser) [5]

2.6.4 รูล้นชนิดต่างๆ และความแตกต่างในการใช้งาน

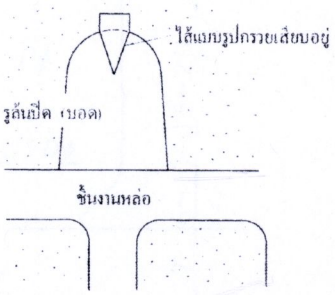
รูล้นทำหน้าที่ป้อนน้ำโลหะเข้าไปแทนส่วนที่หดในขณะที่แข็งตัว ดังนั้นน้ำโลหะในรูล้นจะต้องแข็งตัวหลังน้ำโลหะในชิ้นงาน ถ้ารูล้นใหญ่เกินไปก็จะเป็นการสิ้นเปลืองและถ้าเล็กเกินไปจะเกิดโพรงเนื่องจากหดตัว รูล้นแบ่งออกได้เป็นสองชนิดคือ รูล้นข้าง (Side riser) และรูล้นบน (Top riser) รูล้นข้างอยู่ทางข้างของชิ้นงานหล่อต่อกับรูเทและรูวิ่งโดยตรง ในลักษณะนี้ใช้ได้ผลดีสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กหรือขนาดกลาง รูล้นบนอยู่ข้างบนของชิ้นงานซึ่งมักมีรูปร่างทรงกระบอกหรือมีขนาดใหญ่ รูปที่ 2.42 แสดงตัวอย่างของรูล้นข้างและรูปที่ 2.43 แสดงตัวอย่างของรูล้นบน รูล้นเปิดให้น้ำโลหะสัมผัสบรรยากาศเรียกว่ารูล้นเปิด (Open riser) ส่วนรูล้นที่ข้างบนปิด (มักปิดด้วยรูปครึ่งทรงกลม) เรียกว่ารูล้นปิด (Blind riser) รูล้นปิดจะไม่สามารถป้อนน้ำโลหะเมื่อน้ำโลหะตรงที่ผิดในของรูล้นแข็งตัว เพราะมีความดันเหนือน้ำโลหะในรูล้นน้อยมาก (ใกล้สุญญากาศ) จะต้องมีไส้รูปกรวย (Conical core) ปลายแหลมเสียบอยู่ข้างบนเพื่อให้ความดันจากบรรยากาศเข้าช่วย (ดูรูปที่ 2.44)
รูล้นปิดจะทำให้ประหยัดน้ำโลหะเพราะสามารถใช้รูล้นปิดได้ขนาดเล็กกว่ารูล้นเปิด แต่จะเสียเวลาทำแบบหล่อมากกว่ารูล้นเปิด



รูปที่ 2.42 ตัวอย่างของรูล้นข้าง [5]



รูปที่ 2.43 ตัวอย่างรูล้นบน [5]



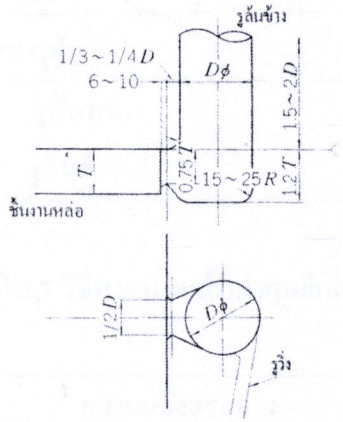
รูปที่ 2.44 ไส้แบบแห้งสนิท เสียบอยู่บนรูล้นปิด [5]

1. รูล้นสำหรับชิ้นงานเหล็กหล่อ

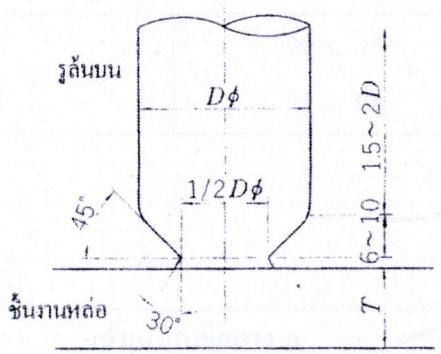
การหดตัวของเหล็กหล่อในระหว่างแข็งตัวจะน้อยกว่าของเหล็กเหนียวหล่อและโลหะผสมนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous alloys) รูล้นมีหน้าที่ทั้งป้อนน้ำโลหะเข้าไปแทนส่วนที่หดตัวในขณะที่แข็งตัวเพื่อกันมิให้เกิดโพรง และทั้งทำให้ทราย ขี้ตะกรัน ตลอดจนแก๊สที่ติดน้ำโลหะเข้าไปได้ผุดขึ้นในรูล้นจะได้ไม่ติดอยู่ในชิ้นงานหล่อ โดยทั่วไปเหล็กหล่อมีสัมประสิทธิ์การหดตัวดังนี้

เหล็กหล่อที่มีความแข็งแรงทางดึงเกิน 35 kg/mm^2 .... 5%
เหล็กหล่อที่มีความแข็งแรงทางดึงเกิน 30 kg/mm^2 .... 3%
เหล็กหล่อที่มีความแข็งแรงทางดึงเกิน 25 kg/mm^2 .... 2%
เหล็กหล่อที่มีความแข็งแรงทางดึงเกิน 20 kg/mm^2 .... 0~1%

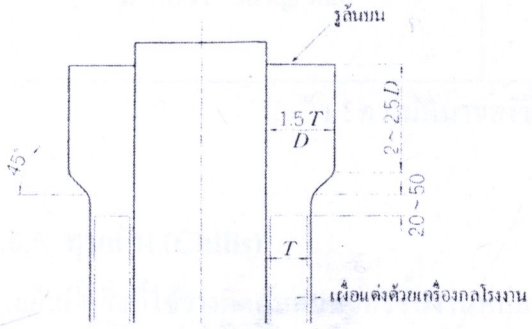
ก่อนอื่นจะต้องหาขนาดของรูล้นที่จะทำให้สามารถป้อนน้ำโลหะเข้าไปแทนส่วนหดได้อย่างเพียงพอ เนื่องจากน้ำโลหะที่สัมผัสผิดของแบบรูล้นและที่สัมผัสบรรยากาศจะแข็งตัวเสียก่อน เพราะอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นน้ำหนักเพียงส่วนหนึ่งของรูล้นเท่านั้นที่ทำหน้าที่ของรูล้นไม่ใช่น้ำหนักทั้งหมด อัตราส่วนการป้อนน้ำโลหะที่ใช้ได้จริง (Effective feed ratio) ของรูล้นข้างซึ่งต่อกันกับระบบทางเข้าจะต่างไปจากของรูล้นบนซึ่งใช้น้ำโลหะที่ล้นขึ้นมาจากโพรง ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิของน้ำโลหะในแต่ละรูล้นต่างกันตารางที่ 2.6 แสดงอัตราส่วนการป้อนที่ใช้ได้จริงหมายความว่าถ้าน้ำหนักทั้งสิ้นของรูล้นเท่ากับ 100 kg. น้ำหนักส่วนที่ทำหน้าที่ป้อนจริงสำหรับรูล้นข้างจะเท่ากับ 35 ~ 40 kg. และสำหรับรูล้นบนเท่ากับ 30 ~ 35 kg. รูปร่างของรูล้นควรเป็นทรงกระบอก ทั้งนี้เมื่อคำนึงถึงผลงานตามหน้าที่ของรูล้นและความสะดวกในการทำแบบหล่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกระบอกขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในตารางที่ 2.7 เมื่อหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางได้แล้วมิติอื่นๆ ทุกอันก็จะหาได้จากรูปที่ 2.45 และรูปที่ 2.46



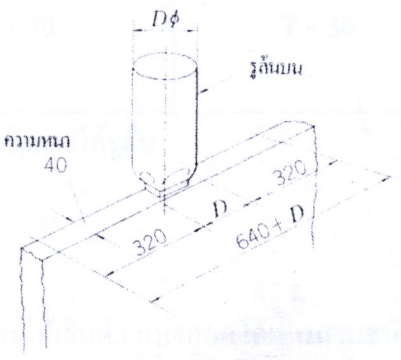
รูปที่ 2.45 มิติของรูล้นข้าง [5]



รูปที่ 2.46 มิติของรูล้นบน [5]



รูปที่ 2.47 มิติของรูล้นบน [5]



รูปที่ 2.48 ระยะทางที่รูล้นสามารถป้อนน้ำโลหะถึง [5]

นอกจากนี้ยังมีรูล้นซึ่งต่อยอดจากชิ้นในรูปร่างทรงกระบอกยาว เช่นปลอกเสื้อสูบหรือลูกสูบ รูล้นชนิดนี้ใช้กันมากเพราะใช้ได้ดีกว่าอย่างอื่นในด้านการควบคุมให้การแข็งตัวดำเนินไปตามทิศทางที่ต้องการ และในด้านการทำหน้าที่ของรูล้นเมื่อน้ำโลหะเข้าสู่แบบโดยใช้รูเข้ารูปดินสอ รูปที่ 2.47 เมื่อหามิติและรูปร่างของรูล้นได้แล้วจะต้องพิจารณาเรื่องขอบเขตการทำงานของรูล้นโดยทั่วไป ขอบเขตการทำงานของรูล้นจะเท่ากับประมาณ 8 เท่าของความหนาของชิ้นหล่อในตำแหน่งใต้รูล้น ถ้าความหนาของชิ้นงานหล่อเท่ากับ 40 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.48 ขอบเขตการทำงานของรูล้นเท่ากับ 3.20 mm นับจากขอบของรูล้นในทางด้านซ้ายและขวาตามลำดับ

ตารางที่ 2.6 อัตราส่วนการป้อนที่ใช้ได้จริง

วัสดุที่หล่อ / ชนิดของรูล้น	เหล็กหล่อเทา (%)	เหล็กหล่อเหนียว (%)
รูล้นบน	30 ~ 35	20 ~ 25
รูล้นข้าง	35 ~ 40	25 ~ 30

ตารางที่ 2.7 วิธีหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูล้น

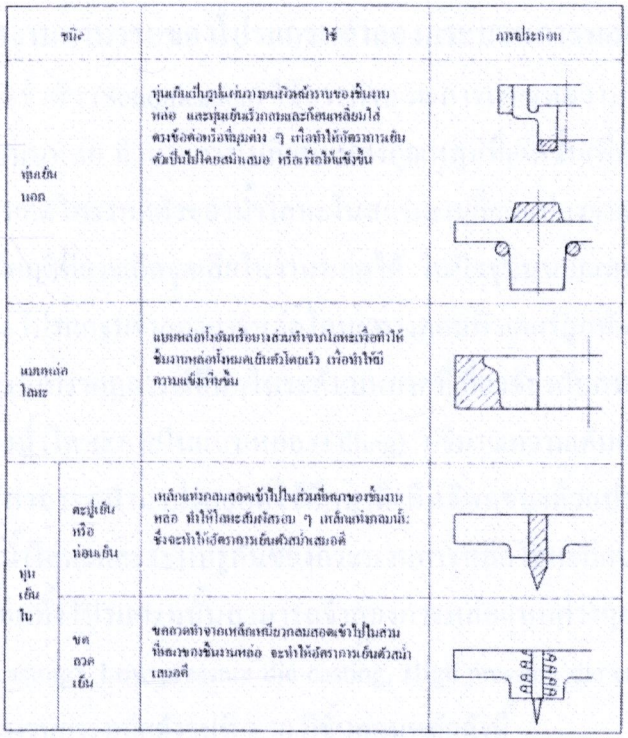
ความแข็งแรงทาง แรงดึงของวัสดุ	เส้นผ่าศูนย์กลาง n	
	รูล้นข้าง	รูล้นบน
20 ~ 25 kg/mm^2	T + 30	T + 40
มากกว่า 30 kg/ mm^2	T + 40	T + 50

T : ความหนาของชิ้นงานหล่อภายใต้รูล้น

2.6.5 ทุ่นเย็น (Chills)

ทุ่นเย็นคือสิ่งที่ใช้วางติดกับส่วนของชิ้นงานหล่อที่ต้องการให้เย็นตัว แบ่งออกได้เป็นสามชนิดคือทุ่นเย็นนอก (External chill) แบบหล่อโลหะใช้เป็นทุ่นเย็นและทุ่นเย็นใน (Internal chill) ทุ่นเย็นนอกนั้นใช้กับส่วนของชิ้นงานที่หนามากหรือที่รูล้นไม่สามารถป้อนน้ำโลหะให้ได้ ทุ่นเย็นนอกดึงความร้อนจากส่วนนอกของชิ้นงาน ทุ่นเย็นชนิดแบบหล่อโลหะโดยทั่วไปใช้สำหรับชิ้นงานหล่อนอกกลุ่มเหล็กเพื่อทำให้เย็นเร็ว และเพื่อทำให้ส่วนภายนอกทั้งหมดของชิ้นงานแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เพื่อกันมิ

ให้เกิดการมีส่วนผสมต่างกัน (Segregation) และการสูญเสียความทนต่อความดันของของเหลว ทุ่นเย็นในใช้วางตรงจุดตัด (Intersection) หรือที่หน้าแปลนที่นูนขึ้นมา (Boss) ขนาดเล็กที่อยู่ห่างจากรูล้น ทั้งนี้เพื่อกันมิให้เกิดโพรงในเนื้องาน



รูปที่ 2.49 การใช้ทุ่นเย็น [5]

1. ทุ่นเย็นสำหรับชิ้นงานเหล็กหล่อ

เนื่องจากชิ้นงานเหล็กหล่อมีโพรงที่เกิดจากการหดตัวน้อยกว่าเหล็กเหนียวและโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous metals) จึงมักไม่ต้องใช้ทุ่นเย็น แต่สำหรับเหล็กหล่อเหนียว (Ductile cast iron) ซึ่งปัจจุบันใช้กันมากนั้นก็ใช้ทุ่นเย็นกันมากทุ่นเย็นทำให้เกิดการประหยัดโลหะที่ต้องใช้ทำรูล้น

ทุ่นเย็นสำหรับชิ้นงานเหล็กหล่อใช้ในการกันมิให้เกิดโพรงที่เกิดจากหดตัวโดยทำให้ส่วนที่หนาแข็งตัวและเย็นตัวเร็วขึ้น ทำให้ส่วนที่หนาและส่วนที่บางแข็งตัวพร้อมกัน ถ้าให้ทุ่นเย็นไม่เพียงพอจะทำให้เกิดจุดเสีย (Defects) กล่าวคือการบิดเบี้ยวและรอยร้าวตลอดจนโพรงที่เกิดจากการหดตัวรูปที่ 2.49 แสดงวิธีการใช้ทุ่นเย็น

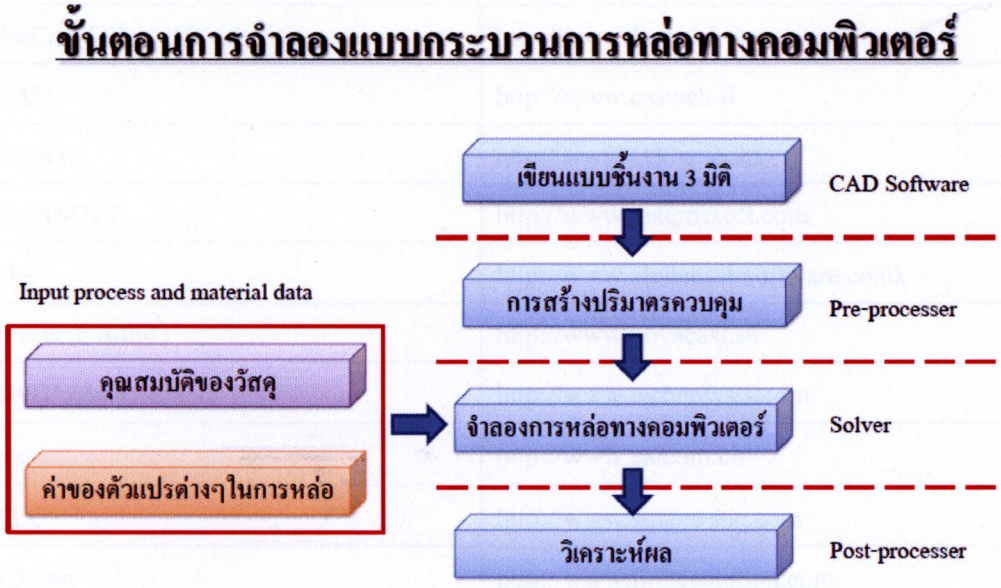
2.7 การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์จำลองแบบงานหล่อ

การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์จำลองแบบงานหล่อคือ การนำเอาเทคโนโลยีการจำลองกระบวนการหล่อโลหะด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้จำลองปรากฏการณ์ทางกายภาพในขณะที่น้ำโลหะไหลเข้าสู่โพรงแบบ

ซึ่งในการปฏิบัติการหล่อโลหะนั้นไม่สามารถมองเห็นได้ว่าเกิดอะไรขึ้นระหว่างการเทน้ำโลหะลงสู่แบบและระหว่างการแข็งตัวการจำลองพฤติกรรมการแข็งตัวจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งและโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อมาประยุกต์ใช้ในงานหล่อโดยใช้วิเคราะห์ทางวิศวกรรม

2.7.1 ขอบเขตและความสามารถของโปรแกรมจำลองกระบวนการหล่อ

การจำลองจำลองการแข็งตัว (Solidification) ใช้การคำนวณการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะหลอมเหลวกับแบบหล่อ ทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเพื่อช่วยในการทำนายทิศทางการแข็งตัว และการเกิดโพรงหดตัวของน้ำโลหะในสถานะเปลี่ยนแปลงจากของเหลวเป็นของแข็งซึ่งสามารถบอกถึงจุดวิกฤติที่อาจเกิดจุดเสียในงานหล่อได้ ในปัจจุบันนอกเหนือจากการจำลองแบบการแข็งตัวของน้ำโลหะโปรแกรมจำลองการหล่อโลหะทางคอมพิวเตอร์ถูกพัฒนาให้มีความสามารถสูงขึ้นสามารถจำลองแบบปรากฏการณ์อื่นๆในระดับมหภาคที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหล่ออีก เช่น การจำลองการไหลของน้ำโลหะภายในแบบหล่อ (Filling) ปริมาณความเค้นและความเครียดตกค้างบนชิ้นงานหล่อทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆนำมาออกแบบปรับปรุงระบบทางเข้าน้ำโลหะและระบบรูล้นของกระบวนการหล่อโลหะก่อนนำไปหล่อจริงเพื่อลดการลองผิดลองถูกได้อีกทั้งโปรแกรมนั้นสามารถจำลองการหล่อแบบต่างๆเช่น หล่อแบบตามแรงโน้มถ่วง (Cavity die casting), Low pressure die casting, High pressure die casting, Lost foam เป็นต้น โดยการจำลองกระบวนการหล่อดังรูปที่ 2.50 มีขั้นตอนหลักดังนี้



รูปที่ 2.50 ขั้นตอนการจำลองแบบกระบวนการหล่อ

จากตารางที่ 2.8 เป็นตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนภาพ 3มิติ เพื่อใช้ในกระบวนการจำลองการหล่อด้วยคอมพิวเตอร์ และตารางที่ 2.9 เป็นตัวอย่างโปรแกรมการจำลองการหล่อที่ใช้กันโดยทั่วไป

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างของโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ (3D CAD Modeling Software)

Autodesk Inventor	http://www.autodesk.com
CATIA	http://www.catia.com
DesignSpace	http://www.ansys.com
Form-Z	http://www.formz.com
Pro/Engineer	http://www.ptc.com
SolidEdge	http://www.eds.com
SolidWorks	http://www.solidworks.com
Space-E	http://www.nttd-es.co.jp
Unigraphics	http://www.eds.com

ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการหล่อ (Commercial Software for computer simulation in metal casting)

ConiferCast / Flow-3D	http://www.flow-3d.com
CastCAE	http://www.castech.fi
CAPCAST	http://www.ekkinc.com
MAGMASOFT	http://www.magmasoft.com
MAVIS	http://www.alphacast-software.co.uk
NovaFlow & Solid	http://www.novacast.se
PASSAGE/PowerCAST	http://www.technalysis.com
ProCast	http://www.calcom.ch
SIMTEC	http://www.simtec-inc.com
SOLIDCast	http://www.finitesolution.com

1. การสร้างแบบจำลองสามมิติ (3D Solid Model)

การสร้างแบบจำลองสามมิติโดยเริ่มจากเขียนเป็นแบบสามมิติของแบบชิ้นงานหล่อ รวมถึงระบบทางเข้าน้ำโลหะ (Gating System) เช่น รูเท (Sprue) ทางวิ่งน้ำโลหะ (Runner) ช่องทางเข้าน้ำโลหะ (Ingate) รวมไปถึงรูล้น (Riser) ทุ่นเย็น (Chill) เป็นต้น

2. การสร้างปริมาตรควบคุม (Enmeshment)

หลังจากสร้างแบบจำลองสามมิติแล้วนำเข้าโปรแกรมจำลองการหล่อขั้นตอนต่อไปเป็นขั้นตอนการสร้างเมสทบล็อก (Mesh blocks) เพื่อแบ่งออกเป็นลูกบาศก์ขนาดเล็กๆ เรียกว่า ปริมาตรควบคุม (Control volume)

3. การกำหนดสภาวะขอบเขตตัวแปรต่างๆ (Boundary Condition)

เป็นขั้นตอนการกำหนดสภาวะขอบเขตของตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการหล่อ เช่นการกำหนดสถานะว่าเป็นชิ้นงานหล่อ ไส้แบบ ชนิดของทรายทำแบบ วัสดุที่ต้องการจำลองการหล่อ การกำหนดอุณหภูมิเท อุณหภูมิเริ่มต้นของแบบหล่อ คุณสมบัติเชิงความร้อนทางกายภาพของวัสดุ เช่นค่าความหนืดของน้ำโลหะ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เป็นต้น ให้กับโปรแกรมเพื่อนำข้อมูลทั้งหมดไปคำนวณผลลัพธ์ต่อไป

4. การวิเคราะห์ผล (Post processor)

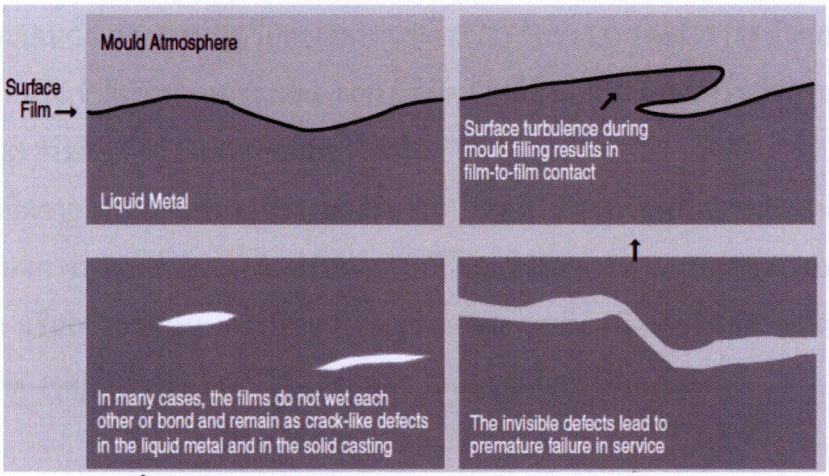
ผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรมจำลองแบบการหล่อซึ่งแยกออกหลักๆเป็น 2 ลักษณะคือการจำลองการแข็งตัวของน้ำโลหะและการจำลองการไหลของน้ำโลหะซึ่งสามารถนำผลไปวิเคราะห์ผลการจำลองการหล่อได้หลายแบบดังนี้เช่น

ผลการจำลองการแข็งตัวของน้ำโลหะ สามารถบอกได้ถึงการเปลี่ยนแปลงต่างๆดังนี้

- อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะซึ่งมีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวของโลหะ (Viewing shrinkage)
- การหาเกณฑ์เกิดการแตกร้าวในขณะร้อน (Viewing hot cracking criterion)
- การหาจุดเย็นตัวสุดท้าย (Last liquid metal)
- การหารูพรุนขนาดเล็ก (Viewing micro porosity)

ผลจำลองการไหลของน้ำโลหะ (Gravity filling metal)

ผลที่ได้จากการจำลองการไหลของน้ำโลหะทำให้ทราบถึงลักษณะการไหลเข้าของน้ำโลหะไปสู่ชิ้นงานซึ่งในความเป็นจริงเราไม่สามารถที่จะมองการไหลของน้ำโลหะจากการหล่อจริงได้ ดังนั้นโปรแกรมจึงมีส่วนช่วยในการบ่งบอกการไหลผ่านส่วนใดก่อน-หลังไหลเต็มแบบ อีกทั้งยังสามารถบอกถึงความเร็ว อุณหภูมิ ความดัน เวลาที่ในการเท ข้อมูลเหล่านี้ทำให้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งและโอกาสเกิดจุดเสีย เนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) ดังรูปที่ 2.51 ซึ่งควรหลีกเลี่ยงโดยทั่วไปต้องการไหลเข้าแบบราบเรียบ (Laminar) เพื่อลดโอกาสการกระแทกซึ่งเป็นโอกาสการเกิดจุดเสียตามมา



รูปที่ 2.51 ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) [7]

2.7.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้โปรแกรมการจำลองการหล่อด้วยคอมพิวเตอร์

- เป็นส่วนช่วยในการวิเคราะห์อิทธิพลต่างๆของระบบทางเข้าน้ำโลหะ ช่วยให้การออกแบบให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ
- ช่วยในการทำนายการไหลของน้ำโลหะได้ และการแข็งตัวของน้ำโลหะ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลา บอกถึงบริเวณที่มีโอกาสเกิดจุดเสียของชิ้นงานได้
- สามารถปรับแก้เพื่อลดจุดเสียในงานหล่อโลหะได้
- สามารถลดต้นทุน และเวลาที่สูญเสียไปจากการลองผิดลองถูกหลายครั้ง
- หลังการทดลองสามารถเป็นชิ้นงานต้นแบบในการนำไปผลิตชิ้นงานจำนวนมากต่อไป
- ผลิตสินค้าได้คุณภาพตามความต้องการของลูกค้า

2.8 จุดเสียในงานหล่อและวิธีแก้ไข

จุดเสียในงานหล่อมีลักษณะต่างๆ กันหลายลักษณะ โดยทั่วไปจุดเสียขึ้นกับวิธีการทำแบบและการเท และไม่ขึ้นกับชนิดของวัสดุหรือประเภทของงานหล่อ เมื่อได้สำรวจจนทราบแน่ถึงสาเหตุของจุดเสียก็จะแก้ไขได้ไม่ว่างานจะทำด้วยวัสดุอะไร ในการทำชิ้นงานหล่อขึ้นมานั้นจะต้องมีกระบวนการมากมาย วิธีการปฏิบัติอันใดอันหนึ่งในแต่ละกระบวนการอาจเป็นสาเหตุของจุดเสีย ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะวิเคราะห์ได้ถูกต้องว่าอะไรเป็นสาเหตุแน่ ผู้วิเคราะห์ต้องมีประสบการณ์มากจึงจะวิเคราะห์ได้ถูกในการทำงานของโรงหล่อแต่ละโรงงานจะต้องมีการวางเทคนิคและกระบวนการมาตรฐาน เมื่อเกิดจุดเสียขึ้นสิ่งแรกที่ควรจะสำรวจคือวิธีการปฏิบัติต่างๆ ที่ใช้ในการทำชิ้นงานหล่ออันที่มีจุดเสียเป็นไปตามวิธีมาตรฐานหรือไม่ ในบางกรณีก็ต้องมีการทดลองเพื่อหาสาเหตุลักษณะที่สำคัญของจุดเสียในงานหล่อและวิธีการแก้ไขมีดังนี้

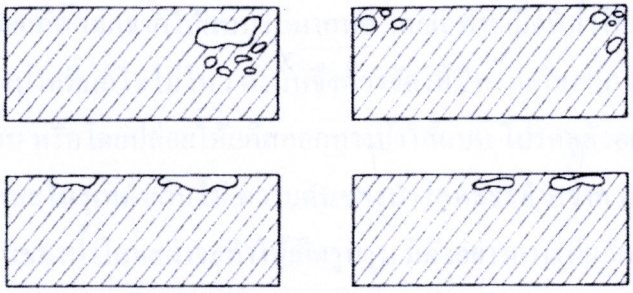
จุดเสียชนิดต่างๆ และลักษณะ โดยคณะกรรมาธิการหล่อโลหะระหว่างชาติได้แบ่งประเภทของจุดเสียออกเป็น 9 ประเภทคือ (1) หางหนูหรือสะเก็ดบานปลาย (2) โพรง (3) รอยร้าว (4) ผิวหยาบ (หน้าข้าวตัง) (5) น้ำโลหะวิ่งเข้าไม่เต็มแบบ (Misrun) (6) มิติผิด (7) มีสิ่งแปลกปลอมหรือมีความไม่สม่ำเสมอในเนื้อเหล็ก (8) การบิดเบี้ยว (9) จุดเสียที่มองไม่เห็น

จุดเสียเหล่านี้เกิดจากการออกแบบ (รูปร่างของชิ้นงาน) วัสดุที่ใช้ (เช่นวัสดุที่หลอมละลาย ทราย ฯลฯ) กระบวนกรรม (การหลอมละลาย การปรับคุณสมบัติของทราย การทำแบบหล่อ การเท การแต่งขั้นสุดท้าย ฯลฯ) หรือการออกแบบการหล่อ (รูเท รูวิ่ง ฯลฯ) จุดเสียชนิดเดียวกันอาจเกิดจากสาเหตุที่ต่างกันรูปร่างของจุดเสียขึ้นกับวัสดุที่ใช้หล่อแต่ถือว่าเป็นจุดเสียประเภทเดียวกัน

2.8.1 รูพรุน (Blow holes)

1. ลักษณะ

รูพรุนดังแสดงในรูปที่ 2.52 เป็นจุดเสียที่เกิดบ่อยที่สุดในงานหล่อ รูพรุนมีรูปร่างต่างๆ กัน รูพรุนอาจเป็นรูที่ผิวงานหรืออาจเป็นโพรงภายใน มักเป็นโพรงกลมอยู่ใต้ผิวเล็กน้อย รูพรุนมีสีต่างกันแล้วแต่สาเหตุ คือสีในกรณีที่มีการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และในกรณีที่ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน สำหรับเหล็กหล่อและเหล็กเหนียวหล่อจะเป็นสีดำหรือน้ำเงินและสำหรับโลหะผสมทองแดงจะเป็นสีน้ำตาลหรือสีเหลือง



รูปที่ 2.52 ลักษณะจุดเสียการเกิดรูพรุน [5]

2. สาเหตุ

สาเหตุของรูพรุนนั้นแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 2 กลุ่มคือที่เกิดจากแก๊สจากน้ำโลหะและที่เกิดจากแก๊สจากแบบหล่อ รูป 2.52 แสดงการเกิดแก๊ส รูพรุนมักเกิดจาก

- การหลอมเหลวที่มีการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน
- เบ้าไม่แห้งพอ ทำให้น้ำโลหะมีแก๊ส
- อุณหภูมิเทต่ำ
- เทช้า

- แอ่งรับน้ำโลหะในแบบหล่อและระบบรูเข้าเปียก

- แบบหล่อปล่อยซึมไม่มากพอ

- ไม่มีการปล่อยแก๊สออกจากไส้แบบมากพอ

- แบบหล่อไม่แห้งพอ

- เกิดแก๊สจากแบบหล่อมากเกินไป

- ความดันของน้ำโลหะน้อยเกินไป

- เกิดแก๊สจากหมุดยึดไส้แบบ ทุ่นเย็นในหรือทุ่นเย็นนอก

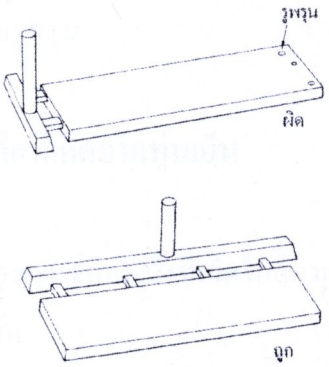
3. วิธีการแก้ไข

- รูพรุนมักเกิดขึ้นถ้าอุณหภูมิเทต่ำ หรือเมื่อตำแหน่งของรูเทไม่เหมาะสม หรือใช้เวลานานเกินไป จึงจำเป็นต้องวางรูเทให้ถูกจุดและเทน้ำโลหะที่อุณหภูมิพอและเทอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.53 และ 2.54

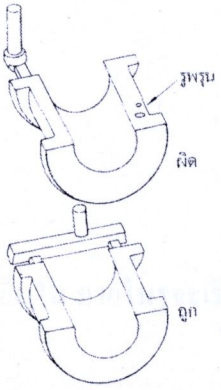
- เนื่องจากรูพรุนเกิดจากการที่แบบหล่อปล่อยซึมไม่มากพอ หรือเมื่อมีความชื้นเฉพาะจุดหรือมีวัสดุที่ทำให้เกิดแก๊ส จึงต้องแก้ไขในจุดต่างๆ ดังกล่าว

- ในกรณีที่ปล่อยแก๊สออกจากไส้แบบไม่มากพอ โดยเฉพาะเมื่อมีน้ำโลหะหุ้มไส้แบบไว้เกือบมิด จะเกิดรูพรุนใหญ่ขนาดที่แก้ไขไม่ไหว ดังนั้นจึงต้องจัดให้มีทางแก๊สออก หรือโดยผสมขี้เถ้าถ่านโค๊กเข้ากับทรายไส้แบบ หรือโดยปล่อยให้แก๊สออกทางบ่าไส้แบบ โปรดดูตัวอย่างในรูปที่ 2.55

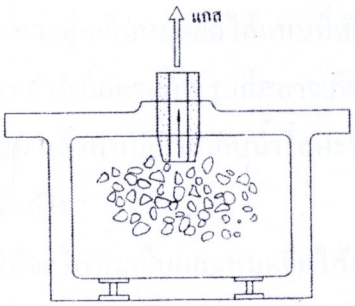
- ถ้าระดับน้ำโลหะในรูเทต่ำเกินไป ความดันของน้ำโลหะจะต่ำกว่าความดันของแก๊สในแบบหล่อดังนี้การที่ความดันของน้ำโลหะต่ำจะทำให้เกิดรูพรุน มีตัวอย่างกรณีที่แก้การเกิดรูพรุนได้โดยให้ความดันน้ำโลหะไม่ต่ำกว่า 200 mm ดังรูปที่ 2.56 และความเร็วเทต้องสูงด้วย



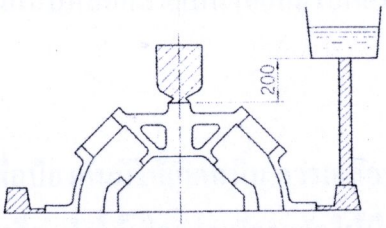
รูปที่ 2.53 การเปลี่ยนตำแหน่งรูเทเลี่ยงการเกิดรูพรุน [5]



รูปที่ 2.54 การเปลี่ยนตำแหน่งรูเทเพื่อลดการเกิดรูพรุน [5]



รูปที่ 2.55 จัดให้มีรูไอที่โตพอสำหรับให้แก๊สออกเสี่ยงการเกิดรูพรุน [5]

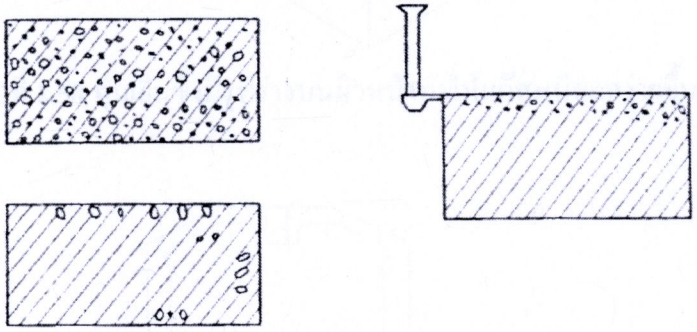


รูปที่ 2.56 การหลีกเลี่ยงรูพรุนโดยการจัดให้มีเพื่อความดันของน้ำโลหะสูง [5]

2.8.2 รูเข็ม (Pin holes)

1. ลักษณะ

รูเข็มคือรูซึ่งมีผิวในเรียบ และมักเป็นรูกลม ขนาดของจุดเสียแบบรูเข็มอยู่ในราว 1 ~ 2 mm หรือต่ำกว่าคือเป็นรูเล็ก ๆ คล้ายรูที่เกิดจากเข็มเจาะ รูเข็มมักเกิดขึ้นทั่วๆ ผิวงานภายในของรูมีสีขาวเงินหรือสีน้ำเงินที่เกิดจากปฏิกิริยากับออกซิเจน



รูปที่ 2.57 ลักษณะการเกิดจุดเสียชนิดรูเข็ม [5]

2. สาเหตุ

เช่นเดียวกับรูพรุน

3. วิธีแก้ไข

เช่นเดียวกับรูพรุน

2.8.3 รูแก๊สที่เกิดจากทุ่นเย็น

1. ลักษณะ

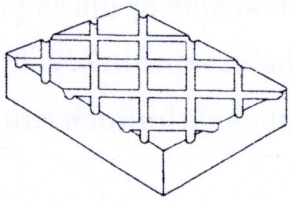
รูแก๊สเป็นรูพรุนชนิดหนึ่งที่เกิดใกล้หมุดยึดไส้แบบ ทุ่นเย็นหรือทุ่นเย็นใน ภายในรูจะเรียบและรูมีขนาดต่างกัน

2.สาเหตุ

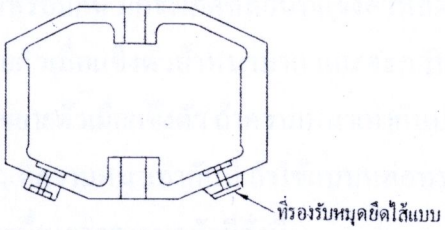
ถ้าผิวของทุ่นเย็นหมุดยึดไส้แบบที่สัมผัสกับน้ำโลหะเป็นสนิมหรือถ้าวัสดุที่เคลือบผิวกลายเป็นไอได้ง่ายจะทำให้เกิดรูแก๊ส รูแก๊สอาจเกิดจากการที่ความชื้นในแบบหล่อกลายเป็นไอและไปกลั่นตัวที่ผิวทุ่นเย็น แล้วทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะที่เป็นแก๊ส

3. วิธีแก้ไข

ก่อนที่จะใส่ทุ่นเย็นและหมุดยึดไส้แบบจะต้องขัดให้ดี เพื่อป้องกันมิให้เกิดสนิม ควรเคลือบทุ่นเย็น ทุ่นเย็นใน ฯลฯ ด้วยดีบุก แต่ถ้าเคลือบด้วยวัสดุที่ใช้บัดกรีจะทำให้เกิดพรุนมักจะจัดให้มีร่องที่ผิวตรงที่สัมผัสกับน้ำโลหะเพื่อให้แก๊สหนีออกได้ง่าย ดูรูปที่ 2.58 รูพรุนที่เกิดจากหมุดยึดไส้แบบอาจทำให้น้ำรั่ว ถ้าใช้กับน้ำที่รับความดันทำให้งานหล่อนั้นใช้ไม่ได้ รูปที่ 2.59 แสดงการใช้ที่รองรับหมุดยึดไส้แบบเพื่อป้องกันมิให้เกิดการรั่ว ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้เกิดรูพรุน ดังนั้นจึงต้องทำให้อุณหภูมิเท่ากัน



รูปที่ 2.58 ทุ่นเย็นซึ่งมีรูปร่างบนผิวหน้าทำให้แก๊สหนีออกง่ายขึ้น [5]

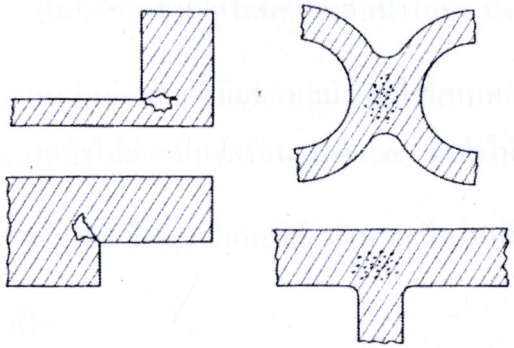


รูปที่ 2.59 ที่รองรับหมุดยึดไส้แบบ [5]

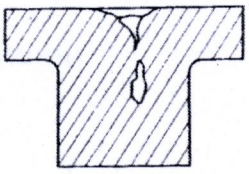
2.8.4 การหดตัวที่เกิดตรงส่วนนอก

1. ลักษณะ

การหดตัวที่เกิดตรงส่วนนอกทำให้เกิดรูที่ผิวนอกของชิ้นงาน ทั้งนี้เพราะการหดตัวขณะที่โลหะแข็งตัว



รูปที่ 2.60 ลักษณะการหดตัวภายใน [5]



รูปที่ 2.61 ลักษณะการหดตัวภายนอก [5]

2.8.5 โพรงที่เกิดจากการหดตัวภายใน

1. ลักษณะ

โพรงที่เกิดจากการหดตัวเกิดจากสาเหตุเดียวกับ จุดเสียที่เกิดจากการหดตัวที่ส่วนในและการหดตัวที่ส่วนนอกและอาจเกิดตรงส่วนที่หนาที่แข็งตัวหลังสุดจะเกิดเป็นกลุ่มรูเล็กๆ ซึ่งมีโครงสร้างกิ่งไม้หยาบที่ผิวในและมักเกิดขึ้นตรงส่วนหนา ส่วนที่หน้าตัดตัดกัน ส่วนเว้าของมุมบน (Concave fillet part) ฯลฯ ของชิ้นงานหล่อ

2. สาเหตุ

โพรงและรูโหว่ที่เกิดจากการหดตัว เกิดจากสาเหตุชุดเดียวกัน คือเกิดในขณะที่โลหะแข็งตัว โดยที่ส่วนต่างๆ ของชิ้นงานแข็งตัวไม่พร้อมกัน มักจะเกิดที่ส่วนที่แข็งตัวหลังสุด เหล็กหล่อจะหดตัว 2.0% โดยเฉลี่ยเมื่อแข็งตัว แต่จะขยายตัวเมื่อแข็งตัวถ้าหนามาก และจะกลับกลายเป็นหดตัวถ้าหนาน้อย เหล็กหล่อที่มีคาร์บอน 3.4% จะขยายตัวเมื่อแข็งตัว ถ้าความหนาเท่ากับประมาณ 25 mm แต่ถ้าปริมาณคาร์บอนต่ำลงจะกลายเป็นหดตัว ที่ความหนาเท่ากันนี้ ถ้าใช้แบบหล่อทรายชื้นเหล็กหล่อจะหดตัวเมื่อแข็งตัว สาเหตุของการเกิดจุดเสียเนื่องจากการหดตัวมีดังนี้

- อุณหภูมิเทต่ำเกินไป ทำให้รูล้นแข็งตัวเร็วจึงป้อนน้ำโลหะได้ยาก
- ความสูงของรูล้นน้อยเกินไป หรือเมื่อเทไม่เทเผื่อให้มีน้ำโลหะในรูล้นมากพอ
- วัสดุที่ใช้บรรจุเข้าเตามีสนิมและสิ่งไม่บริสุทธิ์มาก
- การออกแบบหรือการทำรูล้นไม่ดี
- น้ำโลหะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้หดตัวมากเมื่อแข็งตัว
- คอของรูล้นเล็กเกินไป
- ตำแหน่งของรูล้นไม่เหมาะ ระยะที่ต้องป้อนน้ำโลหะสูงเกินไป

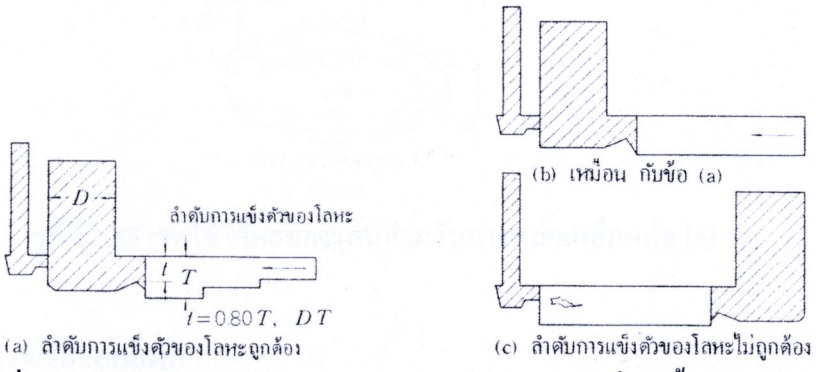
- แบบหล่อพองเมื่อโดนความดันน้ำโลหะ ทั้งนี้เนื่องจากกระทุ้งไม่แน่นพอ

- แบบหล่อทรายที่มีมุมแหลม และไส้แบบหล่อทำด้วยทรายที่บางและล้อมรอบด้วยน้ำโลหะที่จะร้อนมากทำให้เกิดเป็นจุดร้อน (Hot spot) ซึ่งทำให้เกิดโพรง

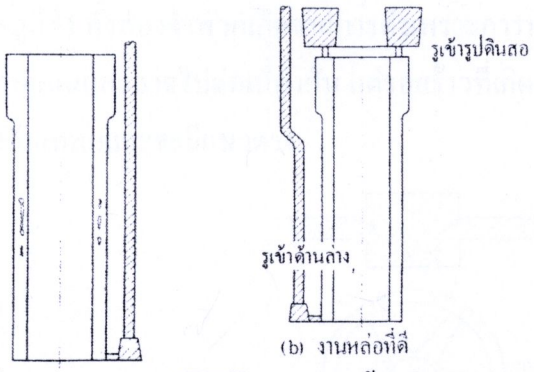
- เมื่อรูล้นป้อนน้ำโลหะได้ยากเพราะมีการเปลี่ยนแปลงความหนา

3. วิธีแก้ไข

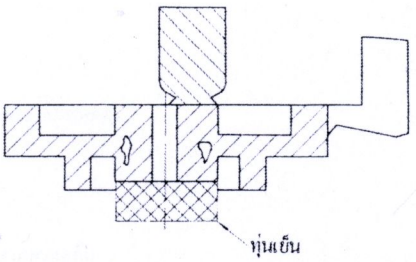
(a) การจัดลำดับการแข็งตัวก่อนหลังของชิ้นงานจะต้องเป็นไปในทางที่จะทำให้รูล้นทำงานได้ผลที่สุด ส่วนที่ได้รับน้ำโลหะเข้าเต็มก่อนจะมีอุณหภูมิต่ำที่สุด และส่วนที่เต็มหลังสุดจะมีอุณหภูมิสูงสุด การวางรูล้นไว้ตรงส่วนที่เต็มหลังสุดเป็นเรื่องที่สำคัญมาก ในกรณีเช่นนี้ควรเทน้ำโลหะเข้าแบบหล่อทางรูล้น ดังนั้นวิธีที่แสดงในรูปที่ 2.62 a , b เป็นวิธีที่ดี แต่สำหรับวิธี c จะไม่สามารถป้อนน้ำโลหะร้อน ๆ เข้าแทนที่การหดตัวได้ ถึงแม้จะเทน้ำโลหะอุณหภูมิสูงลงรูเท น้ำโลหะที่เข้ารูล้นซึ่งอยู่ตรงส่วนหัวจะมีอุณหภูมิต่ำ ทำให้รูล้นทำงานได้ไม่ดี รูปที่ 2.63 แสดงการจัดรูเทสำหรับปลอกเสื้อสูบ รูป (a) แสดงวิธีการป้อนจากข้างล่าง วิธีนี้น้ำโลหะที่สวนล่างจะมีอุณหภูมิสูง และน้ำโลหะที่ส่วนบนสุดจะมีอุณหภูมิต่ำสุดดังนั้นโลหะจะเริ่มแข็งจากข้างบนและโพรงที่เกิดจากการหดตัวมักเกิดที่ตรงกลาง เพราะเป็นส่วนที่ได้รับความดันจากรูล้นต่ำกว่าส่วนล่าง วิธีที่ดีคือวิธีที่ให้เริ่มแข็งตัวจากข้างล่างโดยใช้รูเข้าชนิดดินสอดังในวิธี (b) แต่ถ้าเทน้ำโลหะผ่านรูเข้าดินสอตั้งแต่ต้น น้ำโลหะอาจวิ่งเข้ากระทบแบบหล่ออย่างแรงดังนั้นจึงควรเริ่มโดยการเทน้ำโลหะเข้าตามวิธี (a) ก่อน แล้วจึงเป็นเทเข้าทางรูเข้าดินสอตามวิธี (b) วิธีดังกล่าวนี้จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้กัน



รูปที่ 2.62 การวางตำแหน่งต่างๆ ของรูเทและรูล้นและผลที่เกิดขึ้นจากรูล้น [5]



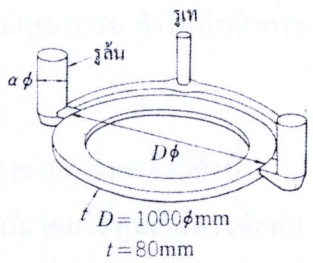
รูปที่ 2.63 การวางรูเทสำหรับปลอกเสื้อสูบ [5]



รูปที่ 2.64 โพรงที่เกิดจากการหดตัวอาจเกิดแต่ใส่ทุ่นเย็นแล้วจะไม่เกิด [5]

(b) การใช้ทุ่นเย็น วิธีนี้คือวิธีใช้ทุ่นเย็นในการบังคับให้เกิดการแข็งตัวของส่วนต่างๆ ก่อนหรือหลังตามที่ต้องการทั้งนี้เพื่อให้รูล้นข้าง แต่จะไม่สามารถป้อนเข้าหน้าแปลนนูน (Boss) ได้ เพราะต้องผ่านส่วนที่บาง ทำให้ไม่ได้รับผลจากรูล้นเลย ดังนั้นจึงจัดทุ่นเย็นไว้ที่ส่วนล่างของหน้าแปลนนูนและเอารูล้นไว้ข้างบน ดังนั้นโลหะเริ่มแข็งจากข้างล่างและรูล้นจะทำหน้าที่ได้อย่างดี เนื่องจากอาจเกิดรูโหว่ตรงที่ผนังตัดกันเพราะป้อนโลหะเข้ายาก จึงจัดให้แข็งก่อนโดยใช้ทุ่นเย็น

(c) เขตใช้ได้ผลของรูล้น เขตใช้ได้ของรูล้นขึ้นกับวัสดุที่ใช้หล่อ วิธีการเท และความหนา มักจะกะกันโดยประมาณว่าเขตใช้ได้ของการป้อนน้ำโลหะจากรูล้นควรเท่ากับ 8 เท่าของความหนาของงาน มีตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.65



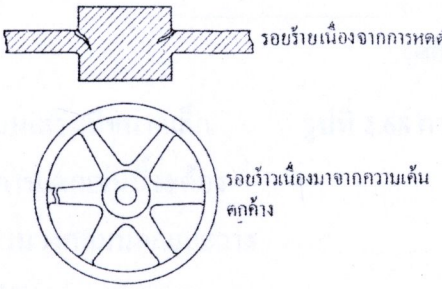
รูปที่ 2.65 เขตใช้ได้ผลของรูล้นสำหรับการหล่อเหล็กหล่อ [5]

2.8.6 ร้อยร้าวหรือรอยแตก

1. ลักษณะ

รอยร้าว (หรือรอยแตก) แบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือรอยร้าวที่เกิดจากการหดตัวและรอยร้าวที่เกิดจากความเค้นตกค้าง รอยร้าวที่เกิดจากการหดตัวมักเกิดที่มุมชิ้นงานตรงที่มีมุมมนรัศมีน้อยๆ ความกว้างอาจจะมากหรือน้อยแต่ขอบรอยร้าวมักจะมน รอยร้าวจำพวกหนึ่งในประเภทที่เกิดจากความเค้นค้างคือการฉีกเนื่องจากความร้อน (Hot tear) เกิดที่อุณหภูมิสูง และอีกจำพวกคือร้อยร้าวที่เกิดที่

อุณหภูมิต่ำ ทั้งสองจำพวกเกิดจากการดึงเพราะการหดขณะแข็งตัว รอยการฉีกเนื่องจากความร้อนจะเป็นรอยมนและอาจไม่ต่อเนื่องกัน แต่รอยร้าวที่เกิดอุณหภูมิต่ำจะเป็นรอยที่ไม่กว้าง ขอบรอยร้าวจะเป็นสันแหลมและจะมีแนวตรง



รูปที่ 2.66 ลักษณะรอยร้าวหรือรอยแตก [5]

2. สาเหตุ

ส่วนที่แข็งตัวก่อนหดตัวและดึงโลหะส่วนที่ยังไม่แข็งตัวพอจึงทำให้เกิดรอยร้าว รอยร้าวอาจขยายใหญ่ขึ้นเมื่อมีการหดตัวหลังจากแข็งตัวแล้ว รอยร้าวประเภทนี้มักเกิดตรงที่ผนังหนาๆ ตัดกันหรือที่มุมแหลมๆ

สาเหตุการเกิดรอยร้าวเนื่องจากความเค้นตกค้างมีดังนี้

- การออกแบบการหล่อมีส่วนสำคัญในการเกิดหรือไม่เกิดจุดเสียชนิดนี้ ความเค้นเกิดขึ้นเพราะการแข็งตัวและหดตัวหลังจากแข็งตัวแล้วรอยร้าวประเภทนี้มักเกิดตรงที่ผนังไม่เท่ากัน

- แบบหล่อ ไส้แบบหรือเหล็กเสริมไส้แบบฝืนการหดตัวของโลหะ

- การวางรูเทและรูล้นไม่เหมาะสม ทำให้ลำดับการแข็งตัวของส่วนต่างๆ ไม่ถูกต้อง

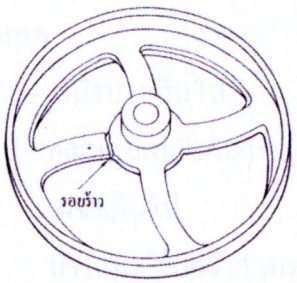
3. วิธีแก้ไข

วิธีป้องกันมิให้เกิดรอยร้าวเนื่องจากการหดตัวมีดังนี้

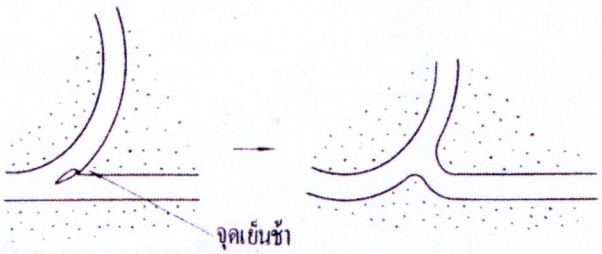
- ทำให้แข็งตัวพร้อมๆ กันโดยใช้ทุ่นเย็นตรงข้อต่อ
- ป้อนน้ำโลหะเข้าแบบหล่อจากหลายๆ จุดเพื่อให้เข้าถึงส่วนต่างๆ พร้อมๆ กัน
- เวลาเทต้องสั้น
- จะต้องไม่ให้มีมุมแหลมในชิ้นงาน แต่ละมุมต้องมนและมีรัศมีการมนตามที่กำหนด
- หลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงความหนาโดยกะทันหัน ถ้าต้องมีการเปลี่ยนแปลงในความหนาต้องค่อยๆ เปลี่ยนจะต้องไม่ให้มีจุดเย็นช้า (Hot spot) ดังรูปที่ 2.68

วิธีป้องกันมิให้เกิดรอยร้าวเนื่องจากความเค้นค้างมีดังนี้

- ในการออกแบบงานหล่อต้องพยายามให้ความหนาของผนังของแต่ละส่วนเท่ากัน



รูปที่ 2.67 รอยร้าวเกิดเพราะแขนเสริมมีขนาดเล็ก ถ้าจะเลี่ยงไม่ให้เกิดการแตกเช่นนี้จะต้องเทน้ำโลหะเข้าตรงส่วนวงกลมนอกและวางทุ่นเย็นไว้ติดกับดุม [5]



รูปที่ 2.68 การหลีกเลี่ยงจุดเย็นช้า [5]

- เมื่อจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงในความหนาของผนังในชิ้นงานหล่อที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้าง ผนังส่วนที่หนาจะต้องได้รับการทำให้เย็นเร็วเช่นโดยใช้ทุ่นเย็น และจะต้องเปลี่ยนระบบรูเข้า รูวิ่ง

- ตรงที่เป็นมุมในชิ้นงานจะต้องมน

- จะต้องใช้สันเสริมความแข็งแรง

- เมื่อเทเสร็จแล้วจะต้องตัดเหล็กเสริมไส้แบบเพื่อให้หดตัวได้ง่าย

- ทรายที่หุ้มเหล็กเสริมไส้แบบของงานหล่อขนาดใหญ่ต้องหนาไม่ต่ำกว่า 50 mm

- ต้องทำให้ไส้แบบกลวง หรือผสมเถ้าถ่านโคกหรือวัสดุประเภทนั้นเข้ากับทรายทำไส้แบบเพื่อให้ไส้แบบยืดหยุ่นได้

- หลังจากเทแล้วจะต้องปล่อยให้เย็นช้าๆ ในแบบหล่อแขนต่างๆ มีขนาดเล็กและอยู่ในตำแหน่งตรงข้ามกันจึงเกิดรอยแตกตัวอย่างนี้แสดงการออกแบบที่ไม่ดี ในกรณีเช่นนี้จะต้องป้อนน้ำโลหะเข้าจากวงนอกและใช้ทุ่นเย็นติดกับหน้าล่างของดุมตรงที่แขนแต่ละอันต่อกับวงในจะต้องมีการมนมีมุมแหลมไม่ได้

2.8.7 น้ำโลหะเข้าไม่ถึง (Misrun) และน้ำโลหะแข็งปิดทาง (Cold shut)

1. ลักษณะ

Misrun หมายถึงกรณีที่น้ำโลหะเข้าไม่เต็มแบบ Cold shut หมายถึงการเกิดรอยแหว่งที่ผิวงานหรือที่ผนังของงานเนื่องจากน้ำโลหะสองสายที่มาบรรจบกันไม่ประสานกัน

2. สาเหตุ

- ผนังบางเกินไป
- อุณหภูมิเทต่ำเกินไป
- เทช้าเกินไป
- น้ำโลหะไหลเข้าส่วนต่างๆ เร็วช้าต่างกันเพราะระบบรูเข้าไม่ดี
- ทางปล่อยแก๊สออกจากแบบหล่อไม่เพียงพอ
- ระบบรูล้นไม่ดี

3 วิธีแก้ไข

- อุณหภูมิเทต้องสูง
- เทให้เร็ว
- เพิ่มจำนวนรูเข้าและน้ำโลหะต้องเข้าจากหลายๆ ตำแหน่งเพื่อจะได้เข้าสู่ส่วนต่างๆ ในอัตราไล่เลี่ยกัน
- เพิ่มทางปล่อยแก๊สออกจากแบบหล่อ
- การปล่อยแก๊สออกจากไส้แบบต้องเพียงพอ

2.8.8 ขี้ตะกรันแทรกอยู่ในเนื้องาน

1. ลักษณะ

ขี้ตะกรันเป็นวัสดุที่ไม่ใช่โลหะเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีในขณะหลอมละลาย ขณะแข็งตัวหรือในขณะเท ขี้ตะกรันอาจแทรกอยู่ในน้ำโลหะและมักลอยอยู่แถบผิวของแบบหล่อส่วนบน

2. สาเหตุ

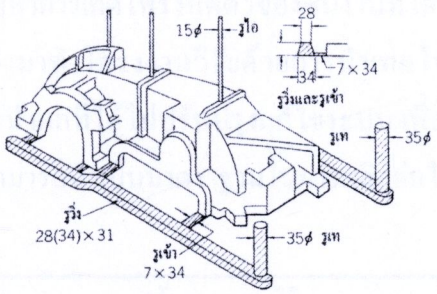
- น้ำโลหะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน
- ใส่สารพิเศษมากเกินไป
- แยกขี้ตะกรันออกจากผิวน้ำโลหะในเบ้าน้อยเกินไป
- วัสดุกรุเบ้าไม่มีความทนต่อความร้อนพอ
- เทนานเกินไป
- ไม่มีแอ่งเท
- ไม่กระทุ้งผิวแบบหล่อไม่ดี
- การแต่งผิวแบบหล่อไม่ดี
- ทรายทำแบบหล่อไม่มีความทนต่อความร้อนพอ
- มีฟองแก๊สเนื่องจากแบบหล่อไม่แห้งพอ
- โพรงของแบบหล่อไม่สะอาดพอ

- แบบหล่อไม่ปล่อยซึมมากพอ
- ระบบรูเทไม่ดี

รูปที่ 2.69 แสดงระบบแบบหล่อของเปลือกกล่องเฟืองทดของเทอร์ไบท์ สังเกตระบบรูเข้าว่ารูวิ่งอยู่ในส่วนแบบบน แต่รูเข้าต่อจากส่วนล่างของรูวิ่งและอยู่ในส่วนบนล่าง ดังนั้นขี้ตะกรันหรือทรายที่ติดมากับน้ำโลหะจะลอยอยู่ข้างบนในรูวิ่ง และดังนั้นจะไม่เข้าสู่แบบหล่อ ในกรณีนี้อัตราส่วนระหว่างรูเทและรูเข้าเท่ากับ 1 : 0.8

3. วิธีแก้ไข

แก้โดยป้องกันมิให้เกิดสาเหตุต่างๆ ดังที่ระบุไว้ในข้อ (2)



รูปที่ 2.69 รูวิ่งต่างๆ ทำไว้ในหีบส่วนบน และรูเข้าต่างๆ อยู่ในหีบส่วนล่าง [5]