

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เหล็กหล่อเป็นวัสดุที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ และอุตสาหกรรมเครื่องจักรกล เนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตต่ำ คุณสมบัติทางกลดี และเหล็กหล่อสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้เพิ่มสูงขึ้นได้ เหล็กหล่อประกอบด้วยเหล็กหล่อเทา (กราไฟท์แผ่น) เหล็กหล่อกราไฟท์กลม เหล็กหล่อผสมหรือเหล็กหล่อพิเศษ เหล็กหล่ออบเหนียว (เหล็กหล่อมัลลิเบิล) และเหล็กหล่อขาว เหล็กหล่อเทาเป็นเหล็กชนิดที่นำมาใช้งานเป็นส่วนใหญ่และเหล็กหล่อชนิดอื่นก็ดัดแปลงมาจากเหล็กหล่อเทา

2.1 เหล็กหล่อเทา (Grey Cast Iron)

เหล็กหล่อเทานั้นมีชื่อเรียกมาจากผิวหน้าแตกหักของเนื้อเหล็กที่มีสีเทาและกราไฟท์มีลักษณะเป็นแผ่นกระจายปนอยู่ในเนื้อเหล็ก ส่วนผสมทางเคมีที่ประกอบอยู่ในเหล็กหล่อเทามีผลต่อคุณสมบัติและโครงสร้าง บทบาทของส่วนผสมทางเคมีอธิบายได้ดังนี้

คาร์บอน (C) จากแผนภูมิเหล็ก-คาร์บอน เหล็กหล่อเทาประกอบด้วยคาร์บอนประมาณ 2.5-4% โดยน้ำหนัก คาร์บอนอยู่ในเนื้อเหล็กจะอยู่ในรูปของกราไฟท์และซีเมนไตท์ อธิบายได้ดังนี้



อิทธิพลของคาร์บอนมีผลต่อการไหลตัวของน้ำโลหะ ตลอดจนคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางกายภาพ โดยกราไฟท์จะขยายตัวเป็นสามเท่าเมื่อโลหะแข็งตัว

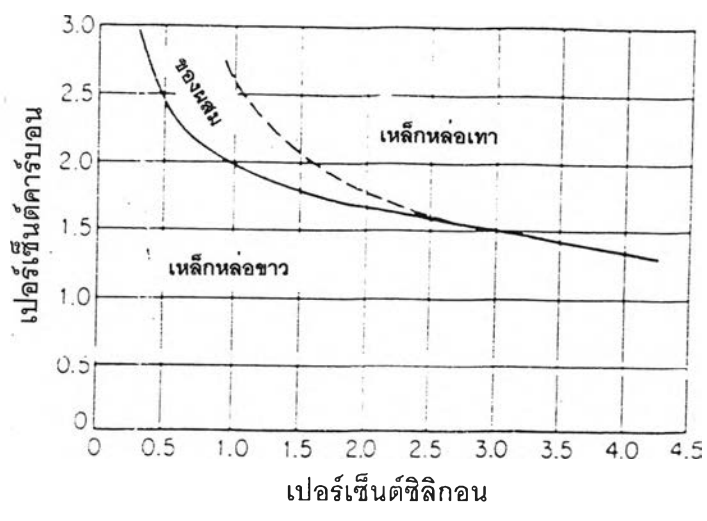
ซิลิกอน (Si) เหล็กหล่อเทามีซิลิกอนอยู่ประมาณ 1-3% ซิลิกอนเป็นตัวช่วยให้เกิดกราไฟท์ ปริมาณของซิลิกอนและคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นมีต่อการเกิดเหล็กหล่อเทาดังรูปที่ 2.1 จากแผนภูมิเหล็ก-คาร์บอน อธิบายได้ว่าปริมาณซิลิกอนที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อจุดยูเทคติก โดยปริมาณซิลิกอนที่เพิ่มขึ้น 1% จะทำให้ปริมาณคาร์บอนละลายในน้ำโลหะลดลง 0.33% ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์กราไฟท์ที่จุดยูเทคติก (Fe-C-Si)} = 4.3 - (1/3\% \text{Si})$$

คาร์บอนเทียบเท่า (Carbon Equivalent (CE)) ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กและจุดยูเทคติก

$$\text{CE} = \% \text{C} + 1/3 \% \text{Si}$$

ถ้า CE ของเหล็กหล่อเท่ากับ 4.3 แสดงว่าเหล็กหล่อจะแข็งตัวที่จุดยูเทคติก ถ้าค่า CE ต่ำกว่า 4.3 เรียกว่าไฮโปยูเทคติก และค่า CE มากกว่า 4.3 เรียกว่าไฮเปอร์ยูเทคติก



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของคาร์บอนและซิลิกอนในเหล็กหล่อ⁽¹⁾

แมงกานีส (Mn) โดยทั่วไปเหล็กหล่อมีแมงกานีสอยู่ 0.5-0.8% แมงกานีสในเหล็กหล่อช่วยลดความเสี่ยงการเกิดกราฟไฟท์ แต่สนับสนุนการเกิดเฟอร์ไรท์ แมงกานีสมีประโยชน์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งในเนื้อเหล็ก

2.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทา

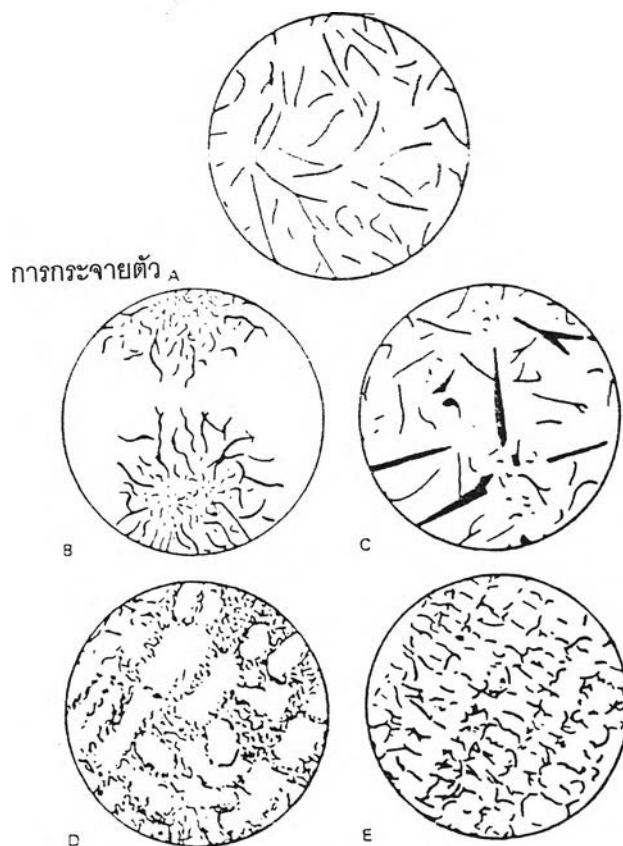
โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทาประกอบด้วยโครงสร้างกราฟไฟท์และโครงสร้างพื้นคุณสมบัติของเหล็กหล่อเทาขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างกราฟไฟท์และโครงสร้างพื้น ส่วนใหญ่เกี่ยวกับส่วนผสมทางเคมีในเนื้อเหล็ก อัตราการเย็นตัว และอื่น ๆ

โครงสร้างกราฟไฟท์

คุณสมบัติของเหล็กหล่อเทาเปลี่ยนแปลงตามโครงสร้างของกราฟไฟท์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางกล ดังนั้นการกระจายตัวของกราฟไฟท์แบ่งออกได้ตามรูปที่ 2.2 ตามมาตรฐาน ASTM A 247-47 และ ASTM A 247-67 ได้อธิบายรูปร่างและการกระจายตัวของ กราฟไฟท์ ผ่านดังนี้⁽²⁾

- ประเภท A เป็นโครงสร้างที่พบในเหล็กหล่อเทาช่วงส่วนผสมไฮโปยูเทคติก กราฟไฟท์แผ่นกระจายตัวอยู่ในเนื้อเหล็กอย่างไม่เป็นระเบียบ เป็นโครงสร้างที่เหมาะสมกับการใช้งานของเหล็กหล่อเทา

- ประเภท B โครงสร้างกราฟไฟท์แผ่นชนิดนี้มีรูปร่างคล้ายดอกกุหลาบ จึงถูกเรียกว่า กราไฟท์รูปกุหลาบ โครงสร้างพื้นเป็นเฟอไรท์จึงทำให้เหล็กหล่อเทาที่มีโครงสร้างประเภทนี้มีแนวโน้มความแข็งแรงต่ำ
- ประเภท C เป็นลักษณะของโครงสร้างเหล็กหล่อเทา มีส่วนผสมอยู่ในช่วงไฮเปอร์ยูเทคติก กราไฟท์ที่ได้หยาบจึงทำให้ความแข็งแรงต่ำ
- ประเภท D โครงสร้างกราฟไฟท์ประเภทนี้เกิดขึ้นในช่วงการเย็นตัวยิ่งยวด (Supercool) ทำให้กราฟไฟท์มีขนาดละเอียดแทรกตัวอยู่ระหว่างเดนไดรท์ ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานต่อการเสียดสีจะต่ำ เนื่องจากโครงสร้างพื้นเป็นเฟอไรท์
- ประเภท E กราไฟท์ที่ได้มีขนาดเล็กกระจายอยู่ในเดนไดรท์ การเรียงตัวของกราฟไฟท์เป็นแบบมีทิศทาง ดังนั้นโครงสร้างกราฟไฟท์ประเภทนี้จึงมีความแข็งแรงสูงกว่าประเภท D แต่น้อยกว่าประเภท A



รูปที่ 2.2 การกระจายตัวของกราฟไฟท์⁽²⁾

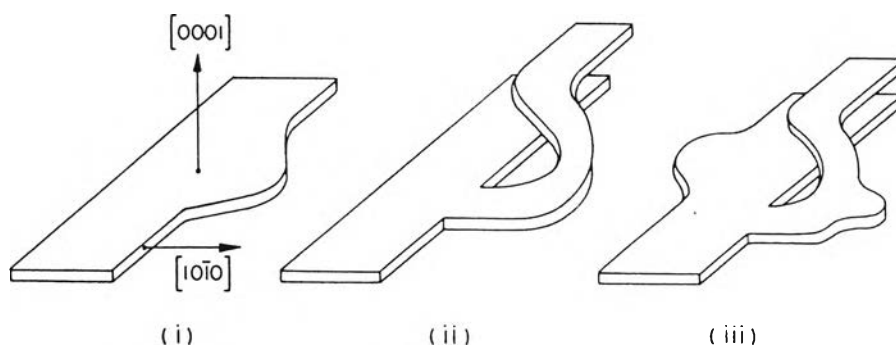
การเกิดกราไฟท์แผ่น

เดนไดรต์ของอสเตนไนท์เป็นเฟสแรกที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำโลหะเย็นตัวลง ความยาวและรูปร่างของเดนไดรต์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ลดลง เดนไดรต์ของอสเตนไนท์จะขยายตัวเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งของเหลวส่วนที่เหลือเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิยูเทคติก เกิดผลึกคาร์บอนยูเทคติกขึ้นและขยายตัวออกเป็นແຂກๆ ในของเหลวที่เหลืออยู่ซึ่งเรียกว่ากราไฟท์แผ่น การขยายตัวของกราไฟท์จะสิ้นสุดลงเมื่อไปชนกับกราไฟท์อื่นๆ ที่มีการขยายตัวในลักษณะเดียวกัน ขณะที่กราไฟท์ขยายตัว ออสเตนไนท์ก็ขยายตัวไปพร้อมกันและจะสิ้นสุดเมื่อของเหลวที่เหลือแข็งตัวหมด

การขยายตัวของกราไฟท์ในยูเทคติกเซลล์ตามภาพจินตนาการของ Morrogh และ Oldfield⁽³⁾ ว่าแขนของกราไฟท์ที่ขยายตัวอย่างสม่ำเสมอขึ้นอยู่กับอัตราการขยายตัวตามแนวรัศมีของยูเทคติกเซลล์ดังรูปที่ 2.3 Minkoff และ Lux⁽³⁾ ได้อธิบายลำดับทิศทางการขยายตัวของกราไฟท์ในยูเทคติกว่าผลึกกราไฟท์ขยายตัวเป็นแผ่นบางๆ ในทิศทาง (0001) แขนของกราไฟท์พุ่งออกด้านข้างโครงบิดตัวเข้ารวมตัวเป็นกลุ่มๆ ทั้งสามทิศทาง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างยูเทคติกกราไฟท์ของเหล็กหล่อของ Morrogh และ Oldfield⁽³⁾



รูปที่ 2.4 รูปแบบรายละเอียดการขยายตัวของกราฟไฟท์ของ Minkoff และ Lux⁽³⁾

2.3 เหล็กหล่อกราฟไฟท์กลม (Spheroidal Graphite Cast Iron)

เหล็กหล่อกราฟไฟท์กลมเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเหล็กหล่อเหนียว (Ductile Cast Iron) กราฟไฟท์กลมจะมีขนาดเล็กและมีปริมาตร 10-15% ของปริมาตรทั้งหมดของโลหะ คุณสมบัติของเหล็กหล่อประเภทนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างพื้น เช่น เฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรท์ เฟอร์ไรท์/เฟอร์ไรท์ ซึ่งได้จากการหล่อหรือการอบชุบ การทำเหล็กหล่อกราฟไฟท์กลมให้มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการกับการใช้งานควรคำนึงถึง

- โครงสร้างเนื้อพื้นที่ถูกต้อง
- รูปร่างและการกระจายตัวของกราฟไฟท์

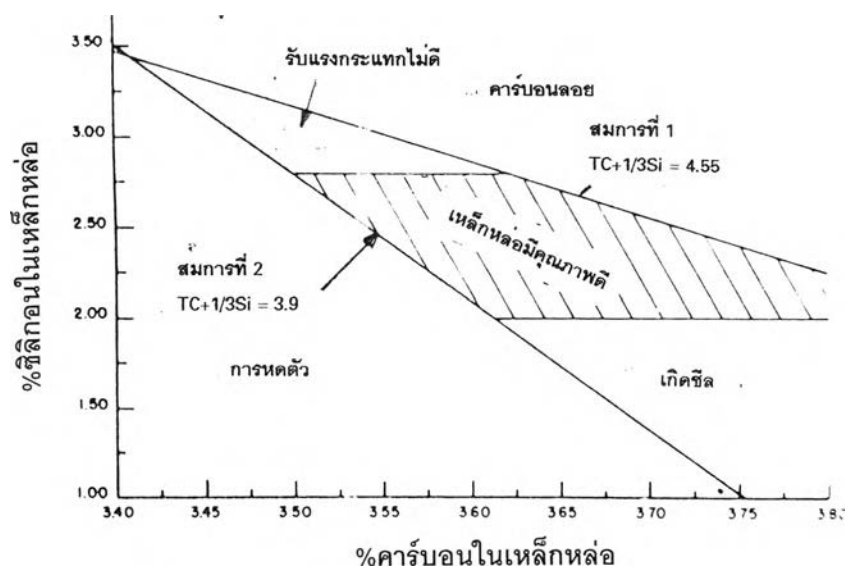
กราฟไฟท์กลมเกิดขึ้นจากการเติมแมกนีเซียมลงไปผสมในน้ำโลหะ ปริมาณการเติมแมกนีเซียมมีผลต่อกราฟไฟท์กลม ปกติปริมาณของแมกนีเซียมที่เหลือในเนื้อโลหะจะอยู่ระหว่าง 0.03-0.06% แมกนีเซียมที่เติมลงไปในน้ำโลหะส่วนหนึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ แมกนีเซียมที่เหลือจึงไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนเกิดเป็นกราฟไฟท์กลม จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนึงถึงคุณภาพและปริมาณของการเติมแมกนีเซียม การคำนวณหาปริมาณแมกนีเซียมทำได้ ดังนี้⁽⁴⁾

$$\text{ปริมาณการเติมแมกนีเซียม} = \frac{3/4 \times S\% \text{ ก่อนเติม} - \text{Mg}\% \text{ ที่ต้องการ}}{\% \text{ ผลที่ได้รับ}} \times 100$$

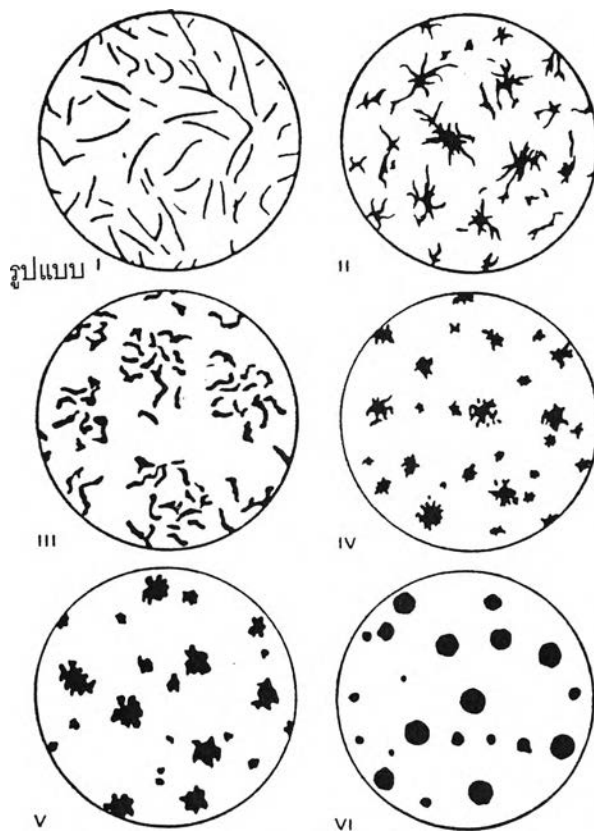
แมกนีเซียมที่ต้องการในเหล็กหล่อกราไฟท์กลมอยู่ระหว่าง 0.03-0.06% ค่าของผลที่ได้รับ (Recovery) เปลี่ยนแปลงไปตามประเภทของแมกนีเซียม วิธี และอุณหภูมิตอนปฏิบัติ

$$\% \text{ แมกนีเซียมที่ได้รับ} = \frac{3/4 \times (S\% \text{ ก่อนเติม} - S\% \text{ หลังเติม}) + \text{Mg}\% \text{ ที่ต้องการ}}{\% \text{ Mg ที่ต้องเติม}} \times 100$$

ถ้าปริมาณของซิลเฟอร์ที่มีอยู่ในน้ำโลหะสูง ปริมาณของแมกนีเซียมก็ต้องสูงขึ้นตามทำให้ต้นทุนเพิ่มและการเกิดสแลกแมกนีเซียมซิลไฟต์ทำให้เกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานหล่อ ดังนั้นปริมาณของซิลเฟอร์ที่สามารถมีได้ในน้ำโลหะควรต่ำกว่า 0.02% ปริมาณคาร์บอนและซิลิกอนที่อยู่ในเหล็กหล่อกราไฟท์กลมมีผลต่อคุณสมบัติทางกล ปริมาณของคาร์บอนและซิลิกอนมีผลต่อการเกิดกราไฟท์กลมโดยทั่วไปเหล็กหล่อกราไฟท์กลมควรมีคาร์บอนประมาณ 3.6-3.9% และปริมาณซิลิกอนประมาณ 2.2-2.7%⁽⁵⁾ จึงเหมาะแก่การใช้งานดังแสดงในรูปที่ 2.5 รูปร่างและการกระจายตัวของกราไฟท์ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงและการยึดตัวของชิ้นงานแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



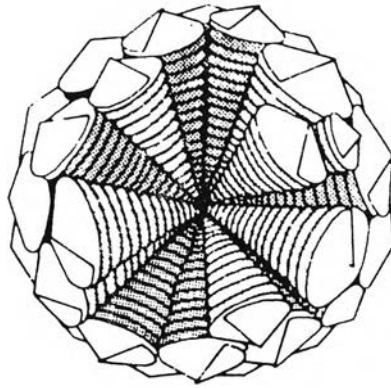
รูปที่ 2.5 ปริมาณคาร์บอนและซิลิกอนในเหล็กหล่อกราไฟท์กลม⁽⁵⁾



รูปที่ 2.6 ประเภทของรูปร่างกราไฟท์⁽²⁾

การเกิดกราไฟท์กลม

กราไฟท์กลมเกิดขึ้นจากนิวเคลียสคาร์บอนในผลึกออสเทนไนท์โดยมีน้ำโลหะอยู่รอบๆ ผลึกออสเทนไนท์ กราไฟท์จะขยายตัวได้โดยคาร์บอนที่อยู่ในน้ำโลหะแพร่เข้าไปในผลึกของออสเทนไนท์รวมตัวกับนิวเคลียสและขยายตัวเป็นลักษณะกลม กลไกการแข็งตัวของกราไฟท์กลมสามารถอธิบายได้เริ่มขึ้นจากการเกิดนิวเคลียสของกราไฟท์ขึ้นมาและเติบโตอย่างสม่ำเสมอ ความหนาของชั้นออสเทนไนท์ที่ล้อมรอบกราไฟท์ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว ถ้าเย็นตัวช้าคาร์บอนสามารถแพร่จากน้ำโลหะที่อยู่ไกลๆ ได้จึงทำให้เกิดกราไฟท์กลมขนาดใหญ่ Double และ Hallawell⁽³⁾ อธิบายรูปแบบการเกิดกราไฟท์กลมว่าการขยายตัวของกราไฟท์มีลักษณะคล้ายฟันเลื่อยที่ติดอยู่กับใจกลางของระนาบคาร์บอน (Basal Plane) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการขยายตัวของกราฟท์กลมของ Double และ Hallawell⁽³⁾

2.4 ฟุรานเรซิน⁽⁶⁾

ฟุรานเรซินที่ใช้ในอุตสาหกรรมหล่อโลหะได้รับพัฒนาขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกา และได้เข้าสู่ตลาดในปี พ.ศ.2501 ก่อนหน้านั้นฟุรานเรซินถูกใช้เป็นตัวประสานในงานเจียรนัย นอกจากนี้ยังใช้พันเคลือบสำหรับแบบทรายเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการทนอุณหภูมิสูง

ฟุรานเป็นชื่อพิเศษของโครงสร้างทางเคมี ซึ่งเรซินตัวนี้ได้มาจากเฟอฟูริลแอลกอฮอล์ โดยจะได้จากการกลั่นกรดเฟอฟูริล ซึ่งได้จากการแยกกรดเพนโทซาลเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัสดุธรรมชาติ เช่น ข้าวโพด ข้าวโอ๊ต ปอ

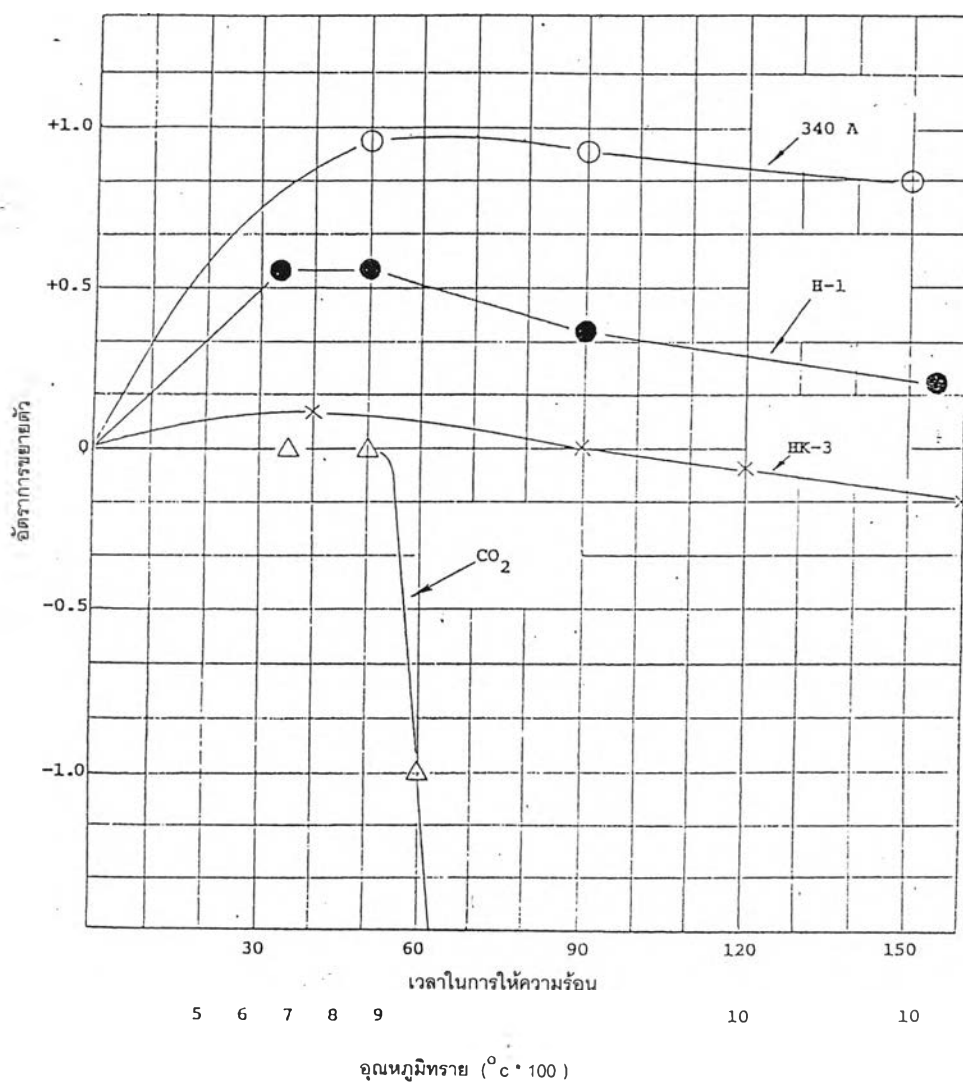
การเกิดปฏิกิริยาของฟุรานจะเป็นแบบคายความร้อน ซึ่งการแข็งตัวจะเกิดอย่างสมบูรณ์ภายนอกกล่อง ดังนั้น Strip time จะเร็วกว่า Cure time ฟุรานเรซินจะมีความหนืดต่ำทำให้เคลือบบนเม็ดทรายได้ง่ายเป็นผลให้ใช้เรซินน้อยโดยปกติจะใช้ 0.8-1.5% จะช่วยให้ก๊าซเกิดขึ้นน้อยลงงานหล่อที่ได้จากการใช้ฟุรานจะมีข้อบกพร่องลดลง และฟุรานก็จะหลุดออกจากทรายได้เกือบหมด ดังนั้นจึงมีการยู่บตัวที่ดี การถอดแบบอาจต้องกระทุ้งแบบบ้างเช่นเดียวกับ Green Sand กระสวนอาจทำจากโลหะ ไม้ หรือพลาสติก สารเคลือบที่ได้ อาจเป็นโพลีเอสเตอร์หรือโพลียูรีเทน

การผสมฟุรานและทรายเริ่มต้นด้วยการผสมส่วนที่เป็นตัวเร่งกับทรายและตามด้วยฟุรานเรซิน เวลาที่ใช้ (Worktime) ขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวเร่ง Strip time เป็นช่วงเวลาที่แบบทรายจะมีความเครียดพอที่จะอยู่เป็นแบบอยู่ได้ โดยปกติความเค้นกด (Compressive Strength) ประมาณ 20 psi ความแข็งแรงของแบบหล่อทรายฟุรานจะให้ความเค้นกดสูงสุดหลังจาก 24 ชั่วโมงโดยอัตราส่วนของตัวเร่งและเรซินก็มีผลต่อความแข็งแรงของแบบหล่อทรายด้วยเช่นกัน ดังนั้นในการผสมทรายหรือการนำแบบไปใช้เทหล่อควรคำนึงปัจจัยทั้งสองนี้จึงจะช่วยลดปัญหาจุดเสียในชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.9 ความแข็งแรงการยึดเกาะเกี่ยวข้องกับปริมาณตัวเร่ง ชนิดของตัวเร่ง

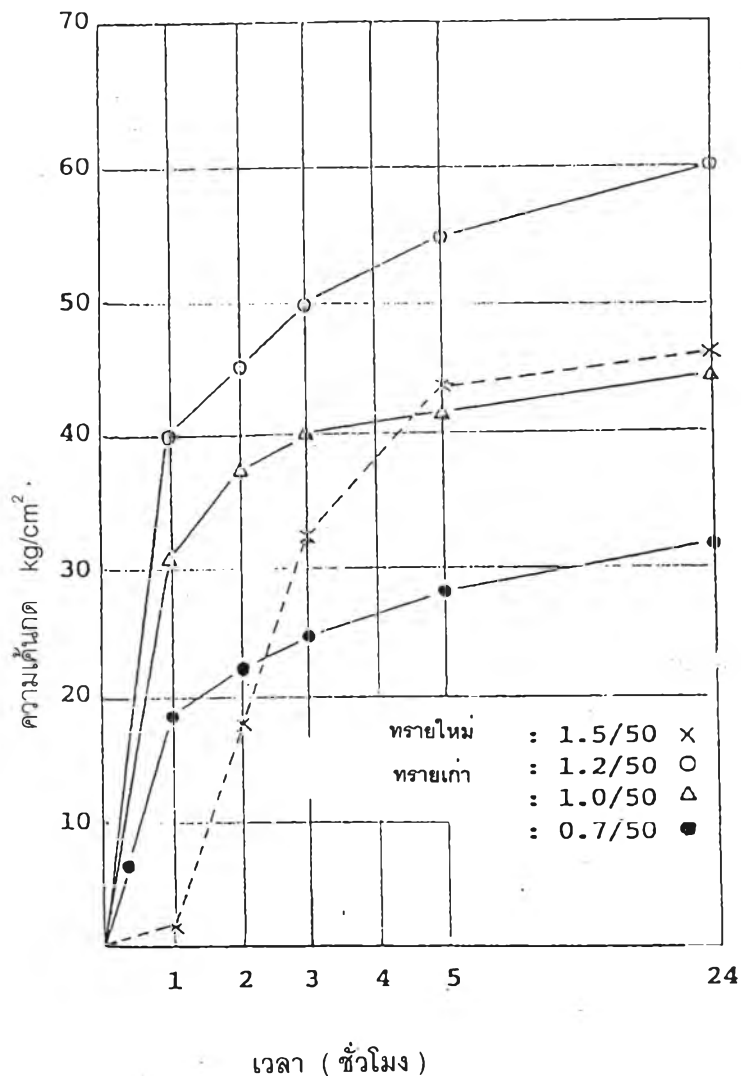
สูตรชนิดทราย อุณหภูมิ และความชื้น งานหล่อที่ได้จากฟุรานจะให้ผิวงานที่ดี ทนต่อการกัดเซาะดีกว่าแบบหล่อ CO₂ การเปรียบเทียบการใช้แบบหล่อฟุรานกับแบบหล่อ CO₂ แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1 และกราฟที่ 2.8

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบแบบหล่อทรายฟุรานกับแบบหล่อทราย CO₂⁽⁷⁾

หัวข้อเปรียบเทียบ	กระบวนการหล่อ	
	แบบหล่อทราย CO ₂	แบบหล่อทรายฟุราน
1. ปริมาณการเติมตัวประสานและตัวเร่ง	5-7% , 1.5 ความดันอากาศ*60 วินาที	0.7% , 30-40%
2. ความแข็งแรงแบบหล่อ (Kg/cm ²)	10-15	30-45
3. เวลาในการแข็งตัว	อิสระ	เวลาเหมาะสม 5-15 นาที
4. การดูดความชื้น	มาก (ใช้ได้ไม่เกิน 10 วัน)	ไม่มี (ประมาณ 3 เดือน)
5. ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง (Kg/cm ²)	มาก	มาก
6. ความแข็งแรงเหลือค้าง (สภาพการทำลาย)(Kg/cm ²)	สูง	ต่ำ (ง่ายต่อการทำลาย)
7. การเปลี่ยนรูปทรง (%)	มาก	น้อย
8. ความแน่นอนของสัดส่วนและการควบคุมคุณภาพ	สัดส่วนไม่คงที่	สัดส่วนแน่นอน ง่ายต่อการควบคุม
9. การถอดชิ้นงานออก	ลำบากมาก	ง่ายมาก
10. อัตราการนำทรายมาใช้ใหม่ (%)	52	92-95
11. อัตราส่วนของชิ้นงานเสีย (%)	5-8	ต่ำกว่า 2
12. การเพิ่มผลผลิต (ตัน/เดือน/คน)	3-4	8-12
13. ความยากง่ายในการใช้	ง่าย	ง่าย
14. ต้นทุนการผลิต	สูง	ต่ำ



รูปที่ 2.8 อัตราส่วนปริมาณตัวเร่งในแบบหล่อฟรานเทียบกับแบบหล่อ CO₂⁽⁷⁾



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบปริมาณเรซินต่อความแข็งแรงของแบบหล่อ⁽⁷⁾

2.5 ระบบทางเดินน้ำโลหะ

การออกแบบงานหล่อเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดการแข็งตัวของโลหะ โดยปกติแล้ว การออกแบบชิ้นงานหล่อที่ดีควรกำหนดให้มีความหนาของหน้าตัดชิ้นงานที่สม่ำเสมอและไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลงภายในชิ้นงานที่รุนแรง ดังนั้นควรพิจารณาเรื่องรูปร่างและขนาดอย่างละเอียด การปรับปรุงรูปร่างและมิติของงานหล่อสามารถกระทำได้หลายวิธี เพื่อไม่ให้เกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานนั้นได้ ผู้ออกแบบควรเข้าใจปัญหาที่เกิดขึ้นจากการผลิตชิ้นงานหล่อด้วย หลักปฏิบัติในการออกแบบงานหล่อโดยทั่วไปมีสิ่งที่จะต้องพิจารณา คือ ระบบทางเดินน้ำโลหะ (Gating System) ที่ติดอยู่กับชิ้นงานมีส่วนประกอบสำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ

1. รูเท (Sprue) มีหน้าที่เป็นทางเดินน้ำโลหะจากเบ้าเทลงไปที่ทางวิ่ง
2. ทางวิ่ง (Runner) เป็นทางเดินน้ำโลหะระหว่างรูเทและทางเข้า
3. ทางเข้า (Ingate) อยู่ระหว่างทางวิ่งกับชิ้นงาน

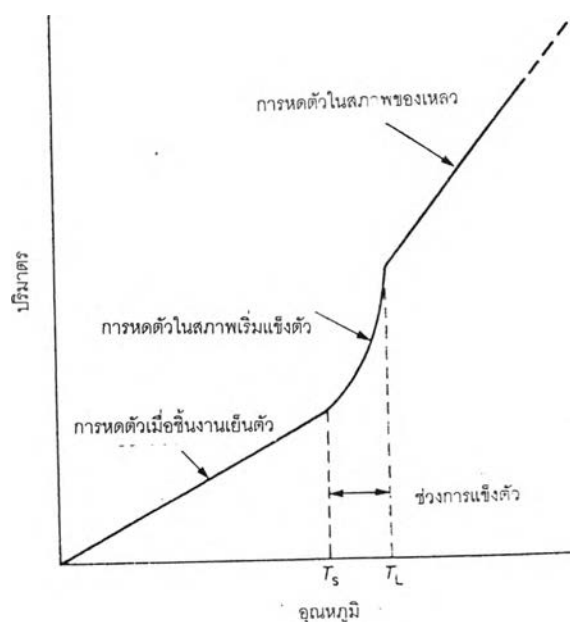
โลหะหลอมเหลวเมื่อเทลงไปในแบบหล่อ จะเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นของแข็งและเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิปกติ ช่วงระหว่างน้ำโลหะเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นของแข็งและจากของแข็งเย็นลงจะทำให้ปริมาตรของโลหะลดลง (Contraction) ปริมาตรการหดตัวของโลหะแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.2 ปริมาตรการหดตัวของโลหะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ตามรูปที่ 2.10

1. การหดตัวในสภาพที่เป็นของเหลว (Liquid-Liquid Contraction)
2. การหดตัวในสภาพของเหลวเป็นของแข็ง (Liquid-Solid Contraction)
3. การหดตัวในสภาพของแข็ง (Solid-Solid Contraction)

* การหดตัวในสภาพที่เป็นของเหลว เกิดขึ้นในช่วงที่อุณหภูมิเหนือน้ำโลหะเย็นตัวลงไปถึงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะ

* การหดตัวในสภาพของเหลวเป็นของแข็ง เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะที่จุดหลอมเหลวเย็นตัวลงถึงจุดแข็งตัว ในช่วงการหดตัวแบบนี้ผลต่อปริมาตรของชิ้นงานอาจทำให้เกิดการหดตัวขึ้น ในทางปฏิบัติผู้ออกแบบงานหล่อสามารถแก้ไขได้โดยการชดเชยปริมาตรของน้ำโลหะที่หดตัวด้วยรูปล้น (Riser)

* การหดตัวในสภาพของแข็ง เกิดขึ้นในช่วงที่ชิ้นงานแข็งตัวแล้ว แต่อุณหภูมิชิ้นงานยังสูงอยู่จึงปล่อยให้เย็นตัวลงถึงอุณหภูมิปกติ ทำให้ขนาดของชิ้นงานลดลง ในทางปฏิบัติควรเผื่อขนาดการหดตัวที่กระสวนก่อน



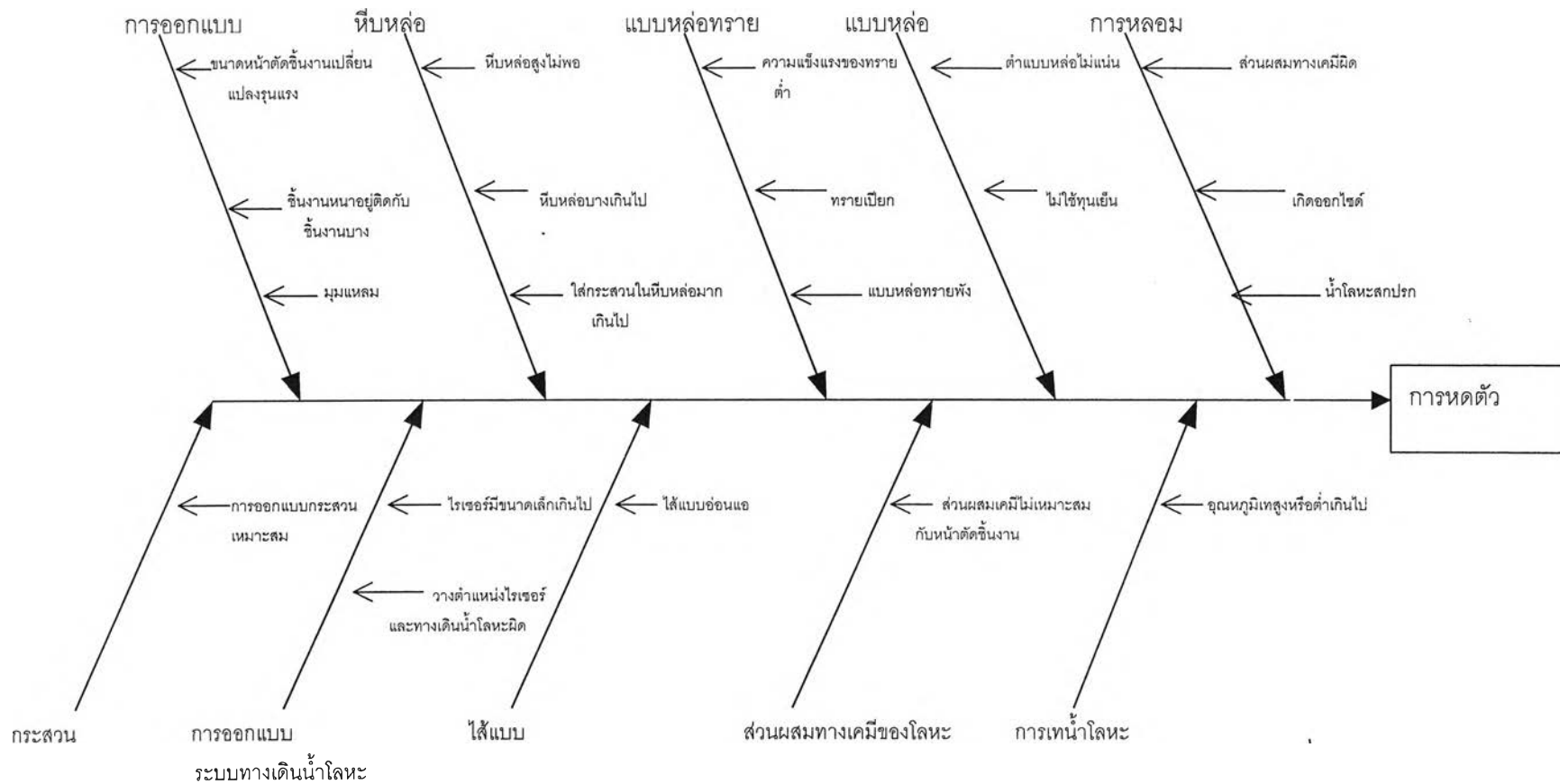
รูปที่ 2.10 สภาพการหดตัวของโลหะทั้ง 3 สถานะ⁽⁸⁾

ตารางที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของโลหะระหว่างการแข็งตัว⁽⁹⁾

	ปริมาณลดลง ระหว่างการแข็งตัว	ปริมาณทั้งหมด ที่ลดลง	การเผื่อการหดตัว ของกระสวย
ทองเหลืองผสมสังกะสี 70 Cu, 27 Zn	6.4%	12.4%	3/16
แมงกานีสบรอนซ์ 57 Cu, 40 Zn	4.6%	11.5%	1/4
อลูมิเนียม	6.5%	12.2%	3/16
เหล็กกล้าคาร์บอน: 0.25 C, 0.25 Si, 0.6 Mn	3.8%	11.4%	1/4
เหล็กหล่อเทา: 2.18 C, 1.24 Si, 0.35 Mn	4.85%	*	1/8
3.08 C, 1.68 Si, 0.44 Mn	1.94%	*	1/8
3.69 C, 2.87 Si, 0.59 Mn (ขยายตัว)	+1.65%	*	1/8

หมายเหตุ: * 3% เป็นการหดตัวระหว่างการแข็งตัว

อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานหล่อขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสของชิ้นงาน (โมดูลัสคืออัตราส่วนปริมาณของชิ้นงานต่อพื้นที่ผิวที่คายความร้อน) อัตราการเย็นตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อโมดูลัสลดลง การกำหนดรูปร่างของชิ้นงานมีผลต่อการเย็นตัว ซึ่งจะทำให้เกิดการหดตัวขึ้นได้ สาเหตุของปัญหาการหดตัวของชิ้นงานหล่อแสดงได้ดังแผนภูมิเหตุและผลในรูปที่ 2.11

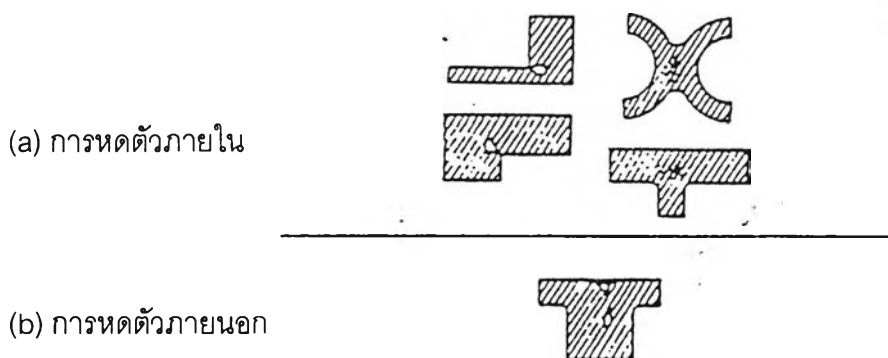


รูปที่ 2.11 แผนภูมิเหตุและผลแสดงสาเหตุการหดตัว (Mr. Taki, 1998)

การหดตัวในชิ้นงานหล่อแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

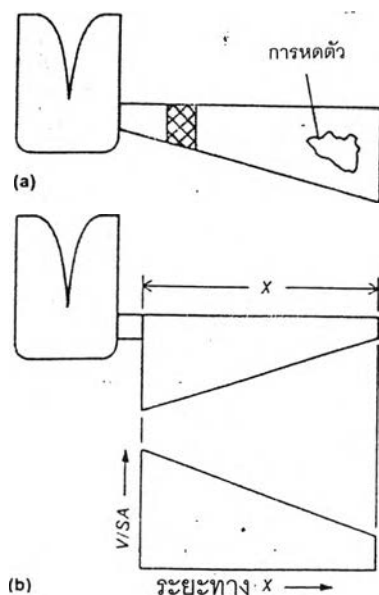
1. การหดตัวภายใน (Internal Shrinkage) เกิดขึ้นเมื่อโลหะหลอมเหลวแข็งตัวไม่พร้อมกัน ส่วนที่แข็งตัวหลังสุดจะเกิดการหดตัวขึ้นภายใน บริเวณโดยรอบผิวการหดตัวจะขรุขระมีลักษณะเป็นกิ่งไม้ (Dendritic Crystal) อยู่รอบๆ ดังรูปที่ 2.12 (a)

2. การหดตัวภายนอก (External Shrinkage) พบบริเวณผิวภายนอกของชิ้นงานหล่อ มีลักษณะเป็นโพรงหรือหลุมเกิดขึ้น เนื่องจากการหดตัวของช่องเหลวระหว่างการเย็นตัวดังรูปที่ 2.12 (b)



รูปที่ 2.12 (a) การหดตัวภายใน (b) การหดตัวภายนอก⁽¹¹⁾

บริษัท Foseco⁽¹²⁾ ได้ศึกษาวิจัยปริมาณคาร์บอนที่มีผลต่อการหดตัว โดยปริมาณคาร์บอนที่ต่ำกว่า 3% ในเหล็กหล่อเทาและในเหล็กหล่อกราไฟท์กลมที่คาร์บอนต่ำกว่า 3.3% จะมีปริมาณการหดตัวเพิ่มสูงขึ้น รูปร่างและทิศทางการวางตำแหน่งทางเข้าของน้ำโลหะมีผลต่ออัตราการเย็นตัว เช่น ชิ้นงานรูปลิ้มมีขนาดพื้นที่หน้าตัดไม่เท่ากันเมื่อทิศทางการวางรูล้นที่ปลายด้านแคบ⁽¹³⁾ ดังรูปที่ 2.13 เกิดการหดตัวที่ปลายด้านกว้างเนื่องจากน้ำโลหะที่ปลายด้านแคบแข็งตัวก่อนจึงทำให้น้ำโลหะไม่สามารถขดเซยส่วนที่ขาดได้ ในทางตรงข้ามการวางรูล้นที่ตำแหน่งด้านกว้างจะเกิดการแข็งตัวแบบทิศทางเดียว

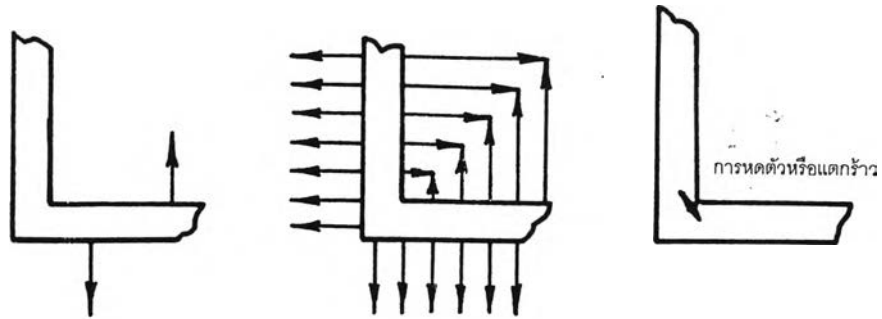


รูปที่ 2.13 การออกแบบงานหล่อและการแข็งตัวของลิม (a) รูปร่างตั้งอยู่ที่ปลายด้านแคบจะ ทำให้เกิดการหดตัวขึ้น (b) การแข็งตัวแบบทิศทางเดียว⁽¹³⁾

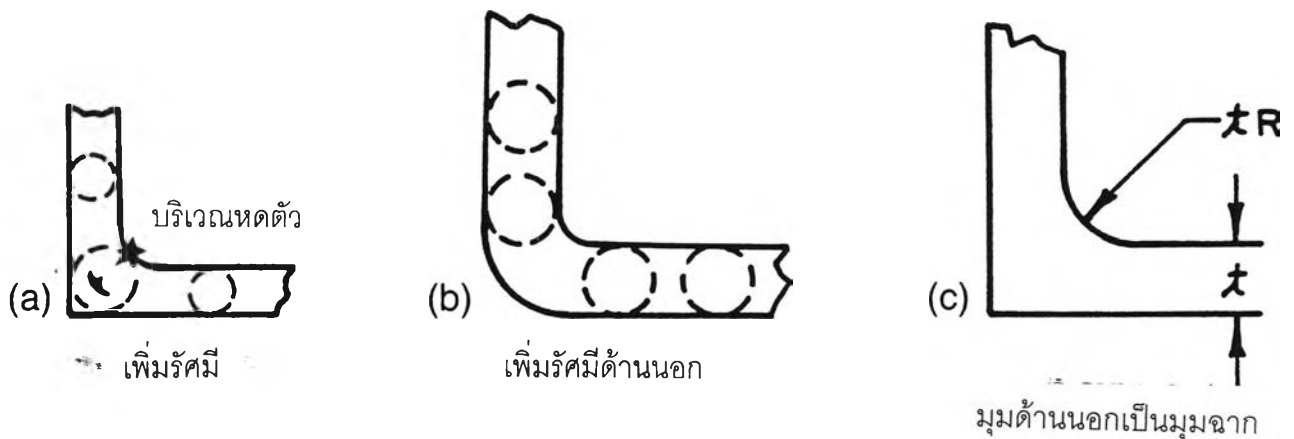
2.6 จุดต่อ (Junction)

โดยทั่วไปชิ้นงานหล่อแต่ละชิ้นประกอบขึ้นจากแขนแต่ละอันมาประกอบร่วมกันเป็นรูปร่าง ภายในรูปร่างของชิ้นงานจะเกิดรอยต่อขึ้นเรียกว่าจุดต่อ (Junction)⁽⁹⁾ จุดต่อเป็นบริเวณที่มีโมดูลัส การเย็นตัวสูงกว่าจึงทำให้การแข็งตัวช้าทำให้เกิดเป็นจุดร้อนขึ้นและอาจเกิดการหดตัวบริเวณนี้ได้ จุดต่อที่เกิดขึ้นอาจมีรูปร่างต่างๆกันเช่น X, L, T, V และ Y เป็นต้น

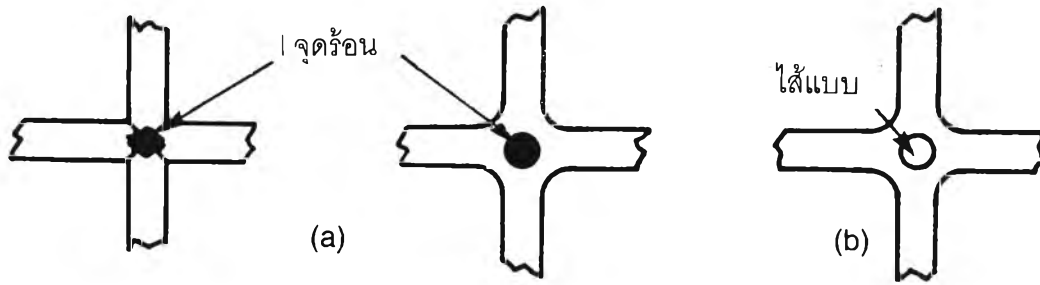
จุดต่อ L เกิดขึ้นจากการนำแกนสองอันมาต่อกันเป็นมุมฉาก ความร้อนของชิ้นงานถ่ายเท สู่มวลทรายในทิศทางตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน ทราบหล่อด้านในชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงเท่ากับอุณหภูมิของ ชิ้นงานจึงทำให้เกิดจุดร้อนขึ้น บริเวณนี้จะเกิดการเย็นตัวสุดท้ายหรือเกิดการหดตัวขึ้นได้ดังรูปที่

รูปที่ 2.14 ตัวอย่างชิ้นงาน L⁽⁹⁾

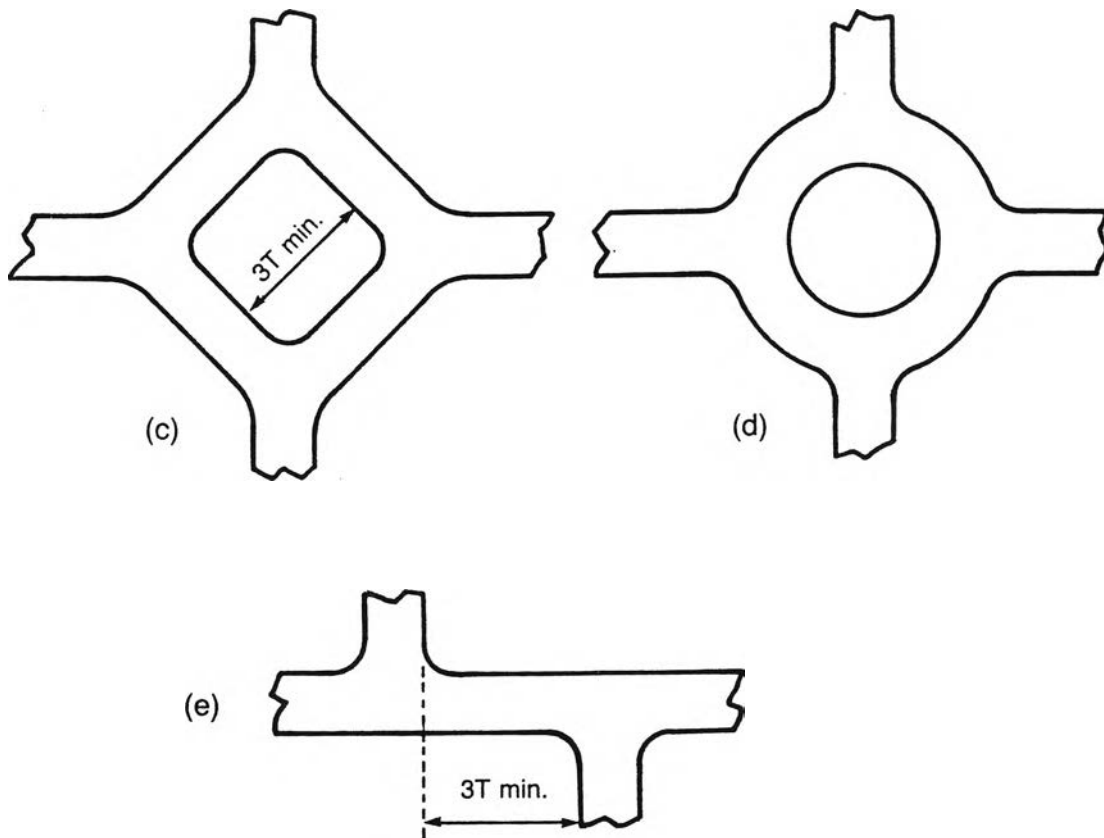
การแก้ไขปัญหาการเกิดการหดตัวของชิ้นงาน L สามารถทำได้โดย การเพิ่มรัศมีที่มุมด้านในจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานดีขึ้นแต่มวลของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.15^(a)) ทำให้การหดตัวเลื่อนไปมุมด้านนอก การเพิ่มรัศมีโค้งที่มุมด้านนอกสามารถช่วยให้โมดูลสภายในชิ้นงานมีขนาดสม่ำเสมอ สามารถลดการหดตัวในชิ้นงานได้ ดังรูปที่ 2.15^(b)

รูปที่ 2.15 การแก้ไขชิ้นงาน L⁽⁹⁾

จุดต่อ X การออกแบบชิ้นงานเป็นรูป X ควรหลีกเลี่ยงเพราะว่าจุดร้อนที่เกิดขึ้นรุนแรง มาก รูปที่ 2.16 ในบางครั้งอาจวางได้แบบช่วยได้แต่ไม่เป็นที่นิยมปฏิบัติกัน วิธีที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบชิ้นงานรูป X โดยการแก้ไขพื้นที่ให้มีความสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.17



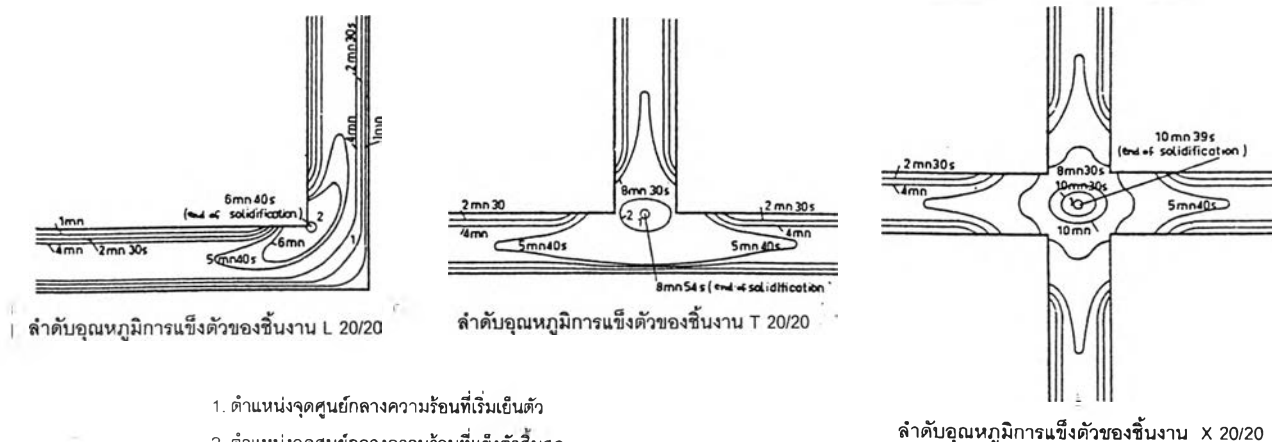
รูปที่ 2.16 การเกิดจุดร้อนในชิ้นงานรูป X ⁽⁹⁾



รูปที่ 2.17 การออกแบบแก้ไขชิ้นงาน X ⁽⁹⁾

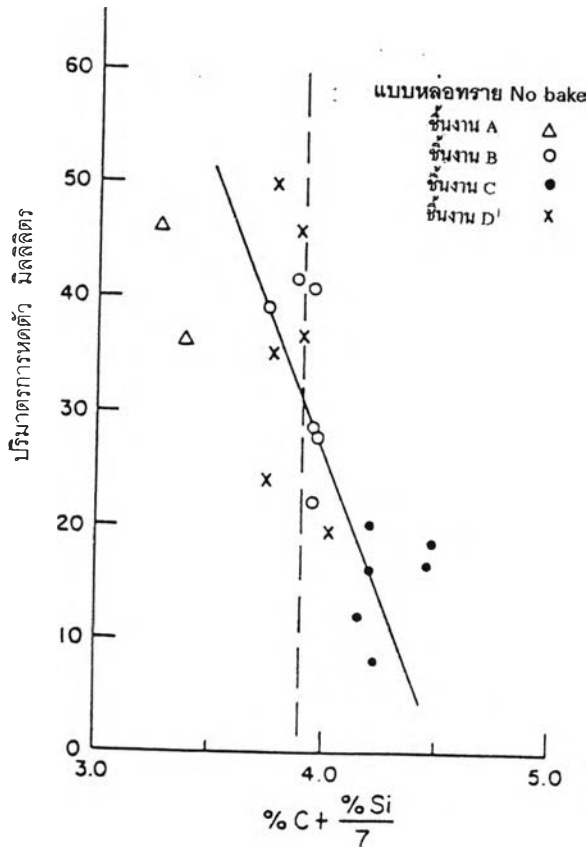
การศึกษาการหดตัวและปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวของจุดต่อรูปต่างๆ ได้ทำอย่างกว้างขวาง โดย Gil Scima ⁽¹⁴⁾ ทำการทดลองหาเส้นรอบรูปการแข็งตัวของชิ้นงาน X, L และ T ทำให้ทราบตำแหน่งจุดร้อนที่บริเวณการเย็นตัวสุดท้ายขึ้นอยู่กับรูปร่างของชิ้นงาน การเย็นตัวของจุด

ต่อทั้งสามมีความแตกต่างกันคือ ชิ้นงานรูป L จะใช้เวลาการแข็งตัวสั้นกว่าชิ้นงานรูปอื่นเนื่องจากขนาดของโมดูลัสในชิ้นงานน้อยกว่า ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.18

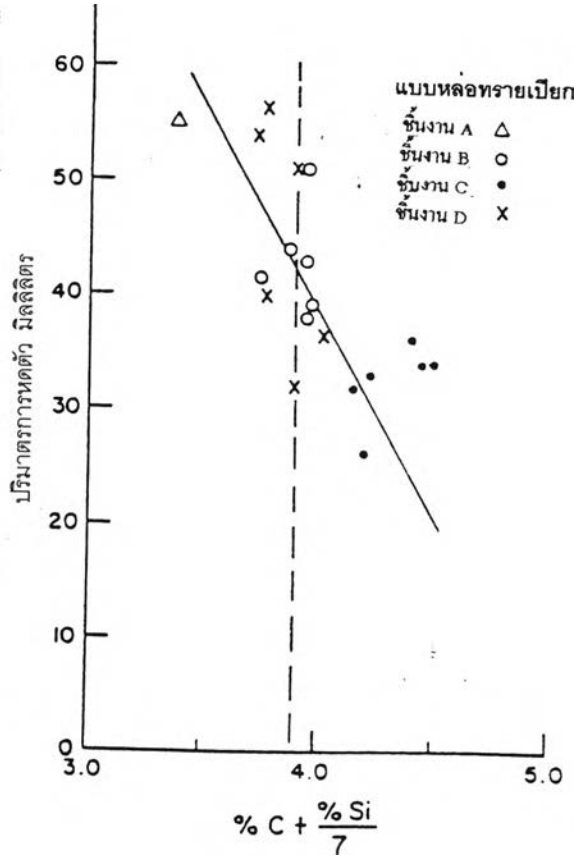


รูปที่ 2.18 ตำแหน่งจุดร้อนในชิ้นงาน L, T และ X ⁽¹⁴⁾

J.F.Wallace และคณะ⁽¹⁵⁾ ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวในเหล็กหล่อเหนียว พบว่าชิ้นงานที่ทำด้วยแบบหล่อทรายเปียกจะมีการหดตัวมากกว่าชิ้นงานที่ทำด้วยแบบหล่อทราย Alkyd Resin No-Bake ประมาณ 27% เนื่องจากความแตกต่างด้านความแข็งแรงของแบบหล่อ ทำให้แบบหล่อไม่เกิดการขยายตัวขณะเกิดกราฟที่ขึ้น ขนาดโมดูลัสเพิ่มขึ้นมีผลต่อการเย็นตัวของชิ้นงานทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณคาร์บอนเทียบเท่าให้น้อยจะทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้นตาม การเปรียบเทียบการหดตัวของแบบหล่อทรายทั้งสองดังรูปที่ 2.19



(a) แบบหล่อทราย No-Bake

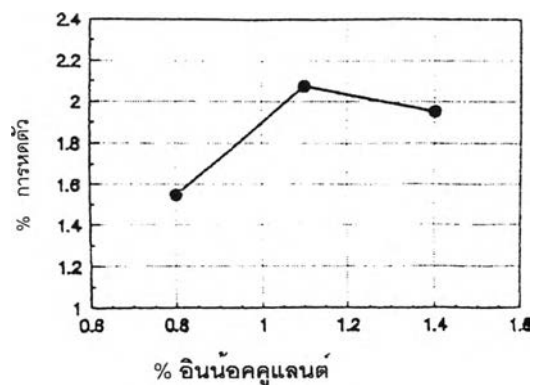
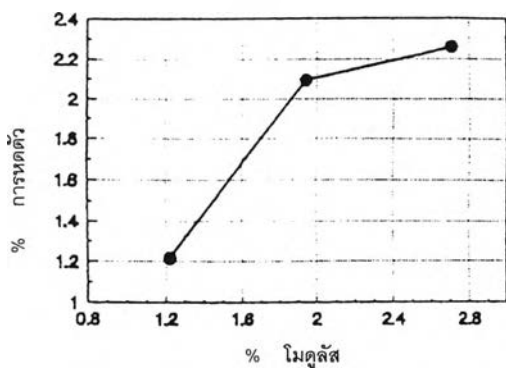


(b) แบบหล่อทรายเปียก

รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนเทียบเท่ากับปริมาณการหดตัว⁽¹⁵⁾

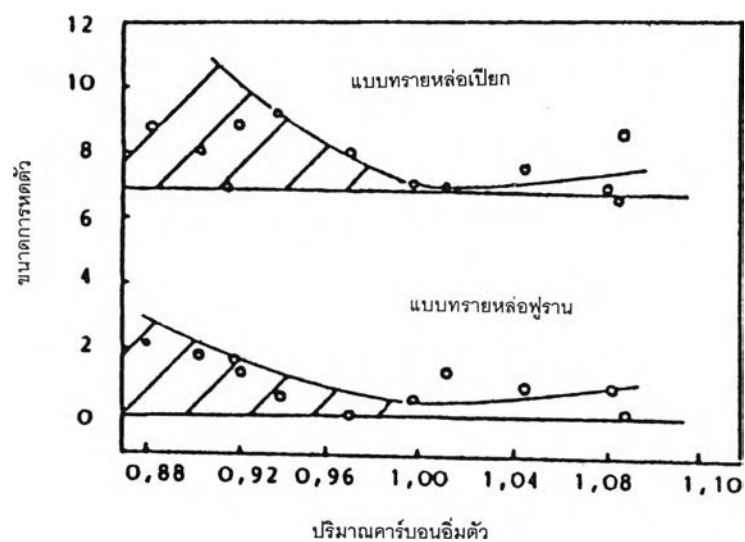
(a) แบบหล่อทราย No-Bake (b) แบบหล่อทรายเปียก

J.R.Ri และคณะ⁽¹⁶⁾ ศึกษาการหดตัวของเหล็กหล่อเหนียวในแบบหล่อทรายเปียก ปัจจัยในการทดลองคือปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า, อินทรีย์คลอไรด์, โมดูลัสขึ้นงานและความแข็งของแบบหล่อโดยการกำหนดขึ้นงานทดลองรูปตัว T ผลการทดลองสรุปได้เช่นเดียวกับการทดลองของ Wallace ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของปริมาณ อินทรีย์คลอไรด์, โมดูลัส ที่มีต่อปริมาณการหดตัว⁽¹⁶⁾

R.Hummer⁽¹⁷⁾ ศึกษาการหดตัวของชิ้นงานในแบบหล่อทรายฟูรานและแบบหล่อทรายเปียกที่ปริมาณคาร์บอนอิมิตัว (S_c) ต่างๆ ในช่วงไฮโปยูเทคติก, ยูเทคติกและไฮเปอร์ยูเทคติก ทำการวัดการขยายตัวของเหล็กหล่อเหนียวด้วยแบบหล่อทราย ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนอิมิตัวกับการหดตัว⁽¹⁷⁾