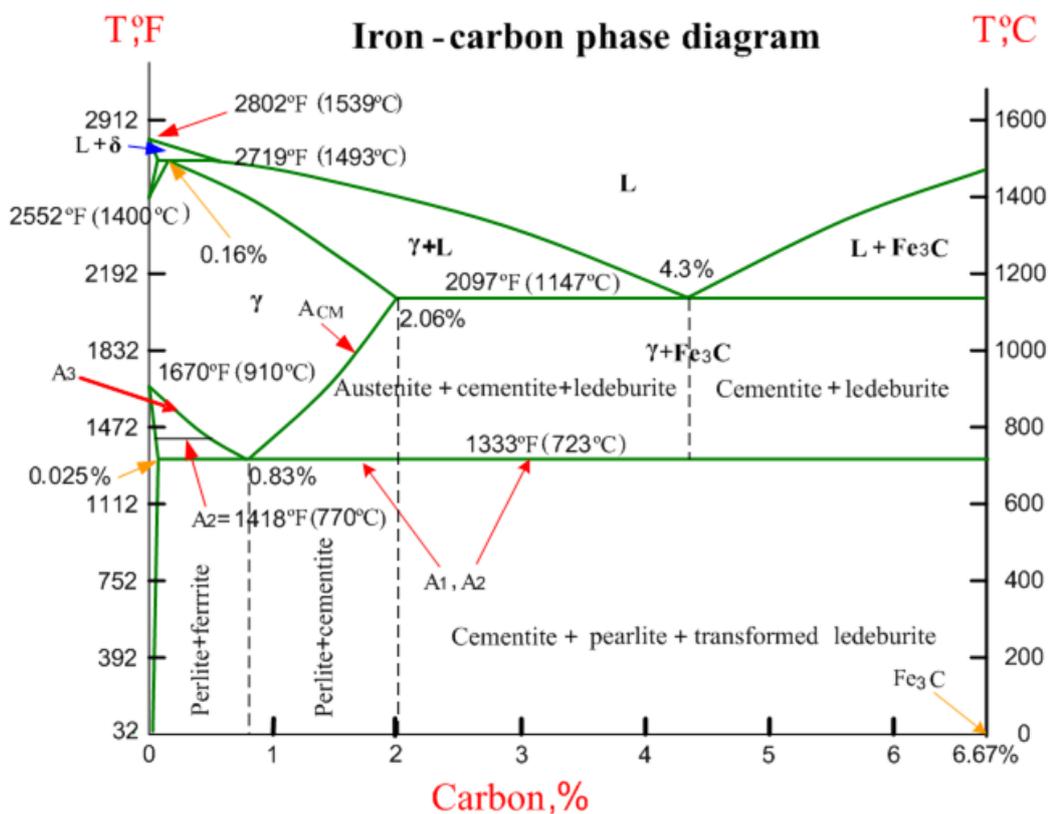


บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กหล่อ (Cast Irons)

เหล็กหล่อจัดเป็นเหล็กชนิดหนึ่งที่อยู่กันและใช้งานอย่างแพร่หลายมาเป็นระยะเวลานานแล้ว เหล็กหล่อกคล้ายกับเหล็กกล้า (Steels) ตรงที่เป็นเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่เช่นเดียวกัน และสามารถศึกษาโครงสร้างจากแผนภาพสมดุลระหว่างเหล็กกับคาร์บอน (Phase Equilibrium) ได้เหมือนกัน เพียงแต่ว่าปริมาณของคาร์บอนในเหล็กหล่อจะมีมากกว่าในเหล็กกล้า คือตั้งแต่ 2% คาร์บอนขึ้นไปจนถึง 6.67% แผนภาพสมดุลระหว่างเหล็กกับคาร์บอนแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุลระหว่างเหล็กกับคาร์บอน (Phase Equilibrium Diagram) [1]

ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กหล่อจะผลิตเหล็กหล่อมีคาร์บอนอยู่ระหว่าง 2.5 - 4% ถ้ามากกว่านี้เหล็กจะสูญเสียสมบัติทางด้านความเหนียว (Ductility) คือ จะเปราะและแตกหักได้ง่ายเมื่อถูกแรงกระแทก ปกติเหล็กหล่อส่วนมากจะขาดสมบัติทางด้านความเหนียวเมื่อเทียบกับเหล็กกล้า ไม่สามารถจะฟอร์มขึ้นรูปโดยการรีดหรือดึงขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง การฟอร์มขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงก็ทำได้ยาก วิธีที่ใช้กันในการฟอร์มรูปร่าง ถึงแม้รูปร่างจะซับซ้อนสามารถทำได้ด้วยการหลอม

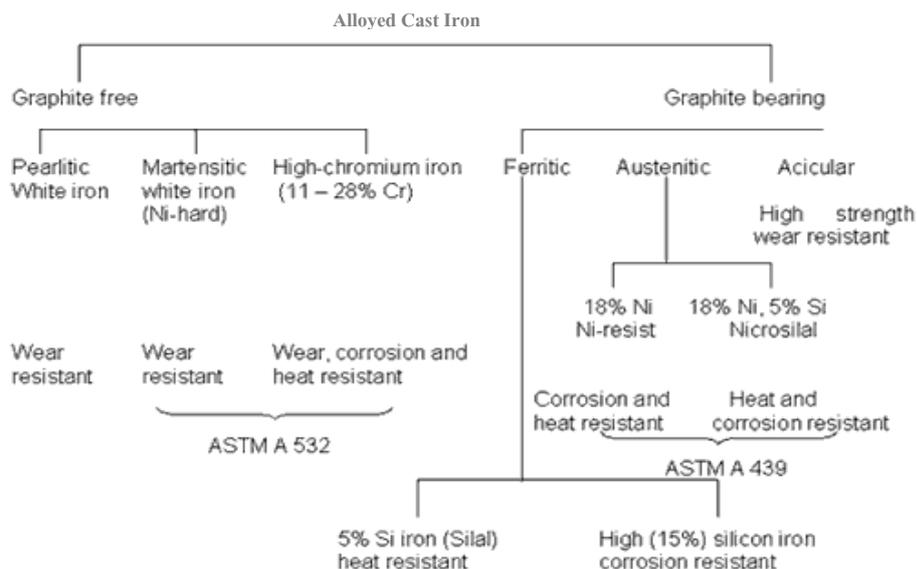
เหล็กให้ละลายแล้วเทลงแบบหล่อที่ทำด้วยทรายหรือวัสดุทนความร้อน จึงได้ชื่อตามกรรมวิธีการพอร์มรูปร่างว่า เหล็กหล่อ หลังจากหล่อรูปร่างให้ได้ใกล้เคียงแล้วจึงนำมาทำการกลึงไสตัด หรือจะให้ได้รูปร่างสุดท้ายตามความต้องการ [2]

แม้ว่าเหล็กหล่อส่วนใหญ่จะให้สมบัติความแข็งแรงดึงต่ำและขาดสมบัติทางด้านความเหนียว แต่เหล็กหล้อมีราคาถูกกว่า มีจุดหลอมตัวต่ำสามารถหล่อได้รูปร่างง่ายกว่าเหล็กกล้า และยังสามารปรับปรุงสมบัติต่างๆ โดยการเติมธาตุผสมที่เหมาะสมและการอบชุบที่ดีจะทำให้สมบัติของเหล็กหล่อเปลี่ยนแปลงได้อย่างกว้างขวางจนเหล็กหล่อบางชนิดมีสมบัติใกล้เคียงกับเหล็กกล้า ทำให้การพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กหล่อเป็นไปอย่างกว้างขวาง รวมทั้งปริมาณการผลิตเหล็กหลอก็เพิ่มปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็ว [2]

ชนิดของเหล็กหล่อ สามารถจำแนกประเภทได้หลายลักษณะ ซึ่งมีทั้งจำแนกโดยกำหนดส่วนผสม การอบชุบภายหลังการหล่อ อัตราการเย็นตัวของเหล็กภายในแบบหล่อ ธาตุที่ผสม ตลอดจนสิ่งเจือปนแต่ที่แพร่หลายเป็นที่ยอมรับกันนั้นอาศัยลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน และลักษณะการรวมตัวของคาร์บอนเป็นหลักในการจำแนกประเภท ซึ่งแบ่งออกเป็น 7 ประเภทหลักๆ คือ [3]

- เหล็กหล่อขาว (White Cast Iron)
- เหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable cast Iron)
- เหล็กหล่อเทา (Grey Cast Iron)
- เหล็กหล่อเหนียว (Nodular Cast Iron)
- เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน (Compacted Graphite Cast Iron)
- เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ (Austempered Ductile Iron)
- เหล็กหล่อผสมหรือเหล็กหล่อพิเศษ (Alloyed or Special Cast Iron)

เหล็กหล่อผสมหรือเหล็กหล่อพิเศษเป็นเหล็กหล่อที่ถูกสร้างขึ้นมา เพื่อให้มีสมบัติตามที่ต้องการ เหล็กหล่อชนิดนี้มีอยู่หลายประเภทขึ้นอยู่กับสารหรือโลหะที่ผสมในเนื้อเหล็กหลอด้งแผนผังแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนผังความสัมพันธ์ของเหล็กหล่อธาตุผสมสูงชนิดต่างๆ [3]

จากรูปที่ 2.2 สามารถแบ่งเหล็กหล่อออกตามการใช้งานได้ 3 ประเภทหลักๆ คือ

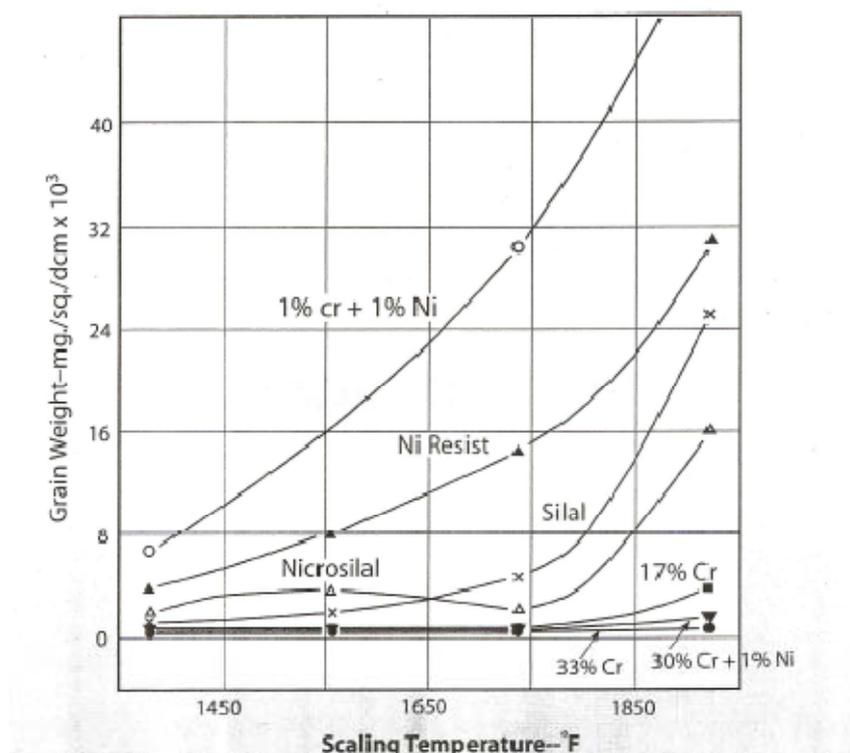
1. เหล็กหล่อผสมทนการเสียดสี (Wear Resistance Cast Iron)
เหล็กหล่อผสมทนการเสียดสีเป็นเหล็กหล่อที่มีความแข็งสูงโดยผสมโลหะ โครเมียม นิกเกิล และ โมลิบดีนัม ส่วนใหญ่จะมีลักษณะของรอยแตกเป็นสีขาว คล้ายกับเหล็กหล่อสีขาว
2. เหล็กหล่อผสมทนต่อความร้อน (Heat Resistance Cast Iron)
เหล็กหล่อผสมทนต่อความร้อนมีคุณสมบัติเด่น คือคงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง โดยไม่เกิดการแตกหักหรือเปลี่ยนแปลงรูปทรง มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน แม้จะอยู่ในสภาพที่สัมผัสกับแก๊สร้อน มีความต้านทานต่อการเกิดอาการพองตัว (Growth) และมีโครงสร้างที่คงสภาพไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงของอุณหภูมิที่ใช้งานซึ่งจะสูงกว่า 600 °C
3. เหล็กหล่อผสมทนต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistant Iron) เหล็กหล่อทนการกัดกร่อนเป็นเหล็กหล่อที่มีธาตุผสมในอัตราสูง เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ เหล็กหล่อผสมซิลิกอนสูงและเหล็กหล่อผสมนิกเกิลสูง (Ni-Resist)

2.2 เหล็กหล่อผสมนิกเกิลสูง (Ni-Resist)

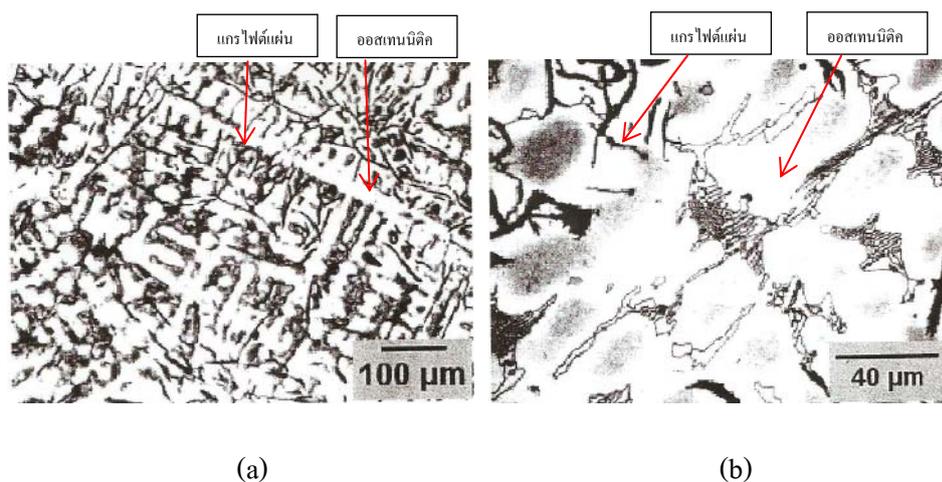
เหล็ก Ni-Resist เป็นเหล็กหล่อที่มีนิกเกิลเป็นธาตุผสมหลักจะมีอยู่ประมาณ 13.5-36% โดยมีโครเมียมและโมลิบดีนัมเป็นธาตุผสมร่วม โดยแต่ละธาตุจะมีบทบาทต่อเหล็กหล่อดังต่อไปนี้

- นิกเกิล มีบทบาท ทำให้โครงสร้างของเหล็กหล่อเป็นออสเทนไนต์ ซึ่งจะมีเสถียรภาพสูงในช่วงอุณหภูมิใช้งาน
- โครเมียม จะมีบทบาทร่วมกับนิกเกิล สร้างผิวบางๆ ที่เป็นออกไซด์ และสามารถต้านทานการแทรกซึมของแก๊สออกซิเจน
- โมลิบดีนัม มีบทบาทด้านเสริมความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง เพิ่มความต้านทานการยึดตัวที่อุณหภูมิสูง

อย่างไรก็ตามหากมีการผสมเพียงธาตุนิกเกิล ต้องมีปริมาณอย่างน้อย 18% ในกรณีเหล็กหล่อที่มีปริมาณซิลิกอนสูง (4-6%) มีชื่อเรียกว่า Nicrosilals การต้านทานการเกิดออกซิเดชันของเหล็ก Ni-Resist แสดงดังรูปที่ 2.3 และลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปของเหล็ก Ni-Resist แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดออกซิเดชันกับอุณหภูมิที่เกิดสเกลของเหล็กชนิดต่างๆ ภายใต้สภาวะอากาศระยะเวลา 200 ชม. Walton [4]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อ (a) เหล็ก Ni-Resist ซึ่งโครงสร้างประกอบไปด้วย เคนไดรท์ของออสเทนนิติกแกรไฟต์ชนิดแผ่น รวมทั้งแกรไฟต์ชนิดอันเดอร์คูล และอินเตอร์เดนดริติกบางส่วน กัดขึ้นรอยด้วยไนตอล (b) เหล็ก Ni-Resist ที่มี โครงสร้างออสเทนนิติก กัดขึ้นรอยด้วยฟิคอล [4]

2.2.1 ประเภทของเหล็กหล่อ Ni-Resist

เหล็กหล่อผสมนิกเกิลสูงหรือ Ni-Resist แบ่งออกตามลักษณะของแกรไฟต์ฟอร์มออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

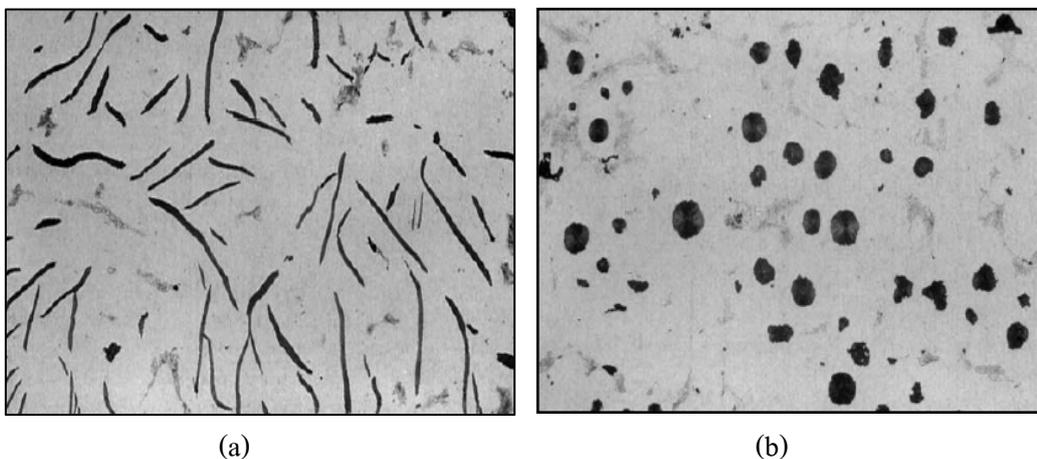
2.2.1.1 เหล็กหล่อ Ni-Resist ชนิดสีเทา

แม้ว่าลักษณะแกรไฟต์จะเป็นแผ่น (Flake) ก็ตาม แต่ผลของนิกเกิลจะทำให้ลักษณะของแกรไฟต์สั้นกว่าเหล็กหล่อสีเทาธรรมดา โครงสร้างพื้นฐานจะเป็นออสเทนไนต์ ทั้งที่อุณหภูมิปกติและอุณหภูมิสูง เหล็ก Ni-Resist บางชนิดจะผสมโครเมียมสูงถึง 6% แต่ด้วยอิทธิพลของนิกเกิลจะยังมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเทนไนต์และแกรไฟต์กระจายอยู่ทั่วไป เหล็กชนิดนี้จะมีความต้านทานแรงดึงสูงประมาณ 170-240 MPa และความแข็งอยู่ระหว่าง 100-200 H_B ซึ่งสามารถกลึงไสหรือตัดเจาะได้สะดวก เหล็ก Ni-resist ชนิดสีเทาไม่สามารถชุบแข็งได้ แต่ในทางปฏิบัติมักจะต้องทำการอบด้วยความร้อนก่อนการใช้งาน เพื่อลดความเครียดที่เกิดจากเหล็กเย็นตัวในแบบทราย ทั้งนี้เพื่อให้ขนาดของงานหล่อไม่เปลี่ยนแปลงขณะใช้งาน บางครั้งเรียกการอบความร้อนในลักษณะนี้ว่า Stabilizing Heat Treatment ซึ่งไม่ทำให้โครงสร้างพื้นฐานเปลี่ยนแปลง [2]

2.2.1.2 เหล็กหล่อ Ni-Resist ชนิดแกรไฟต์กลม

ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กชนิดนี้มีได้สูงกว่าประเภทแรก เพราะสมบัติต้านทานการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับปริมาณของนิกเกิล ไม่ขึ้นอยู่กับแกรไฟต์ฟอร์มแต่เหล็กชนิดนี้จะมีค่าความต้านทานแรงดึงและอัตราการยืดตัวสูงกว่า คือ มีความต้านทานแรงดึงประมาณ 300 – 400 MPa อัตรายืดตัว 10 -20% และมีความแข็งอยู่ระหว่าง 120- 250 H_B [2]

ตัวอย่างภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อ Ni-Resist ชนิดแกรไฟต์แผ่นและแกรไฟต์กลมแสดงดังรูปที่ 2.5 และตัวอย่างส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อ Ni-resist แสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างโครงสร้างเหล็กหล่อ (a) Ni-Resist type 1 และ (b) Ni-Resist type D-2W [5]

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก Ni-Resist บางเกรดตามมาตรฐาน ASTM [4]

			Content %	C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr	S		
ASTM	A436	1	Min	-	1.00	0.05	13.50	5.50	1.50	-		
			Max	3.00	2.80	1.50	17.50	7.50	2.50	0.12		
		1b	Min	-	1.00	0.50	13.50	5.50	2.50	-		
			Max	3.00	2.80	1.50	17.50	7.50	3.50	0.12		
		2	Min	-	1.00	0.50	18.00	-	1.50	-		
			Max	3.00	2.80	1.50	22.00	0.50	2.50	0.12		
		2b	Min	-	1.00	0.50	18.00	-	3.00	-		
			Max	3.00	2.80	1.50	22.00	0.50	6.00	0.12		
		3	Min	-	1.00	0.50	28.00	-	2.50	-		
			Max	2.60	2.00	1.50	32.00	0.50	3.50	0.12		
		4	Min	-	5.00	0.50	29.00	-	4.50	-		
			Max	2.60	6.00	1.50	32.00	0.50	5.50	0.12		
		5	Min	-	1.00	0.50	34.00	-	-	-		
			Max	2.40	2.00	1.50	36.00	0.50	0.10	0.12		
		ASTM	A439	D-2	Min	-	1.50	0.70	18.00	-	1.75	-
					Max	3.00	3.00	1.25	22.00	-	2.75	0.08
D-2B	Min			-	1.50	0.70	18.00	-	2.75	-		
	Max			3.00	3.00	1.25	22.00	-	4.00	0.08		
D-2C	Min			-	1.00	1.80	21.00	-	-	-		
	Max			2.90	3.00	2.40	24.00	-	0.50	0.08		
D-3	Min			-	1.00	-	28.00	-	2.50	-		
	Max			2.60	2.80	1.00	32.00	-	3.50	0.08		
D-3A	Min			-	1.00	-	28.00	-	1.00	-		
	Max			2.60	2.80	1.00	32.00	-	1.50	0.08		
D-4	Min			-	5.00	-	28.00	-	4.50	-		
	Max			2.60	6.00	1.00	32.00	-	5.50	0.08		
D-5	Min			-	1.00	-	34.00	-	-	-		
	Max			2.40	2.80	1.00	36.00	-	0.10	0.08		

2.2.2 การควบคุมปริมาณคาร์บอนสมมูล

การผลิตเหล็ก Ni-Resist จะต้องควบคุมปริมาณคาร์บอนสมมูล (Carbon Equivalent, CE) เช่นเดียวกับการผลิตเหล็กหล่อแกรไฟต์ทั่วไป ซึ่งเหล็กหล่อที่มีปริมาณนิกเกิลสูงเช่นนี้สามารถคำนวณปริมาณคาร์บอนสมมูลได้จาก

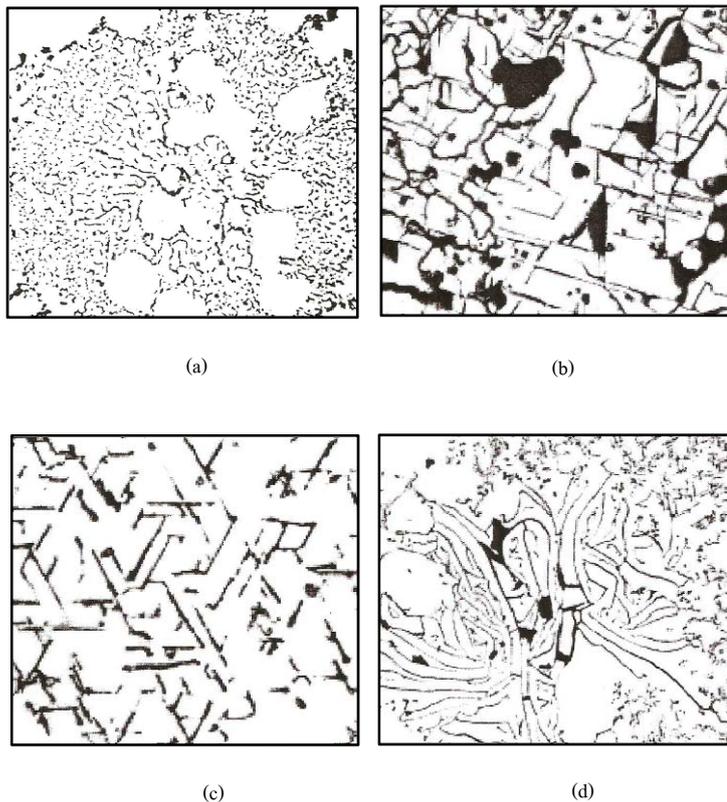
$$CE = TC\% + 0.33\%Si + 0.047\%Ni - (0.0055\%Ni \times \%Si) \quad \text{—————} \quad (2.1)$$

เหล็ก Ni-Resist ที่มีค่า CE สูงมีลักษณะเฉพาะด้านการหล่อที่ดีกว่า เช่น จุดหลอมเหลวต่ำกว่า และสภาพการไหลดีกว่า เป็นต้น อย่างไรก็ตาม อาจเกิดปัญหาสำหรับเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม

คุณภาพของเหล็กหล่อ Ni-resist ทั้งชนิดสีเทาและแกรไฟต์กลมขึ้นอยู่กับปริมาณนิกเกิล โครเมียม ทองแดง และคาร์บอน ซึ่งการใช้งานของเหล็กก็จะแตกต่างกันไป ในรูปที่ 2.6 แสดงแกรไฟต์ที่มีรูปร่างลักษณะแตกต่างจากปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากสาเหตุหลายประการ เช่น งานหล่อถูกปนเปื้อนจากตะกั่ว มีไฮโดรเจนถูกเก็บภายในเนื้อโลหะมีอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะช้า ฯลฯ ยกตัวอย่างเหล็กที่มีปริมาณนิกเกิลสูงที่ได้รับการปรับด้วยแมกนีเซียมอาจพบว่ามีรูปร่างของแกรไฟต์ที่นอกเหนือไปจากรูปร่างกลม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะช้า เช่นส่วนที่หนาของชิ้นงาน ลักษณะแกรไฟต์ดังกล่าวถูกเรียกว่า แกรไฟต์ก้อน (Chunky) (รูปที่ 2.6 ภาพ (a)) ซึ่งงานหล่อที่มีแกรไฟต์รูปร่างนี้มีค่าความต้านทานแรงดึงลดลง 25% และความต้านทานต่อการยืดตัวลดลง 50% หากเราต้องการหลีกเลี่ยงการเกิดแกรไฟต์ที่ไม่พึงประสงค์นี้ในเฟสออสเทนไนต์ ควรเลือกเหล็กหล่อที่มีค่าคาร์บอนสมมูลสูงสุดเท่าที่เป็นไปได้ แต่หากชิ้นงานหนา ส่วนผสมควรเป็นไปตามสูตร

$$TC\% + 0.2\%Si + 0.06\%Ni < 4.4 \quad \text{—————} \quad (2.2)$$

รวมทั้งต้องปรับปรุงเหล็กหลอมเหลวด้วยแมกนีเซียมและอินนอคลูเลนซ์ให้ถูกต้องเพื่อหลีกเลี่ยงผลการเฟดดิ้ง เช่นเดียวกับกรณีเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม แกรไฟต์ที่มีรูปร่างแตกต่างจากปกติอีกชนิดหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 2.6 ภาพ (b) (c) และ (d) ได้แก่ Widmanstatten ซึ่งปรากฏในเหล็กหล่อออสเทนนิติกผสมตะกั่ว 0.03% และในเหล็กหล่อซิลิกอนที่ผสมตะกั่ว 0.008% ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุของการเกิดแกรไฟต์ดังกล่าวเนื่องมาจากมีไฮโดรเจนถูกกักอยู่ภายในเหล็ก [5]



รูปที่ 2.6 แกรไฟต์ที่มีรูปร่างลักษณะแตกต่างจากปกติ (a) แกรไฟต์ชนิด Chunky (b) & (c) แกรไฟต์ชนิด Widmanstatten (d) ภาพขยายแกรไฟต์ชนิด Widmanstatten จากภาพล่างซ้าย Hughes [5]

ในที่นี้ การเฟดดิ้งมีสองลักษณะ ได้แก่ การเฟดดิ้งของแมกนีเซียมในระหว่างกระบวนการหล่อขึ้นรูปจึงทำให้แกรไฟต์มีรูปร่างผิดปกติ และปรากฏการณ์เฟดดิ้งของอินนอคูลูแลนท์หรือ Heterogeneous Nucleating Particles จึงทำให้โนดูล (Nodule) มีขนาดใหญ่และเกิดการไบริต์แบบอินเตอร์เซลล์ลาร์ แบบหล่อต้องแข็งแรงเพียงพอสำหรับต้านทานต่อการเสีรูปร่าง ปริมาณการหดตัวของงานหล่อเทียบกับขนาดของกระสวน (Pattern) ที่ยอมรับได้เท่ากับ 1.56% (เทียบกับเหล็กหล่อเทาปกติ 0.83%) ดังนั้น กระสวนและวิธีออกแบบสำหรับเหล็กหล่อดังกล่าวจึงคล้ายคลึงกับการหล่อเหล็กกล้าและบรอนซ์อะลูมิเนียม (Aluminum Bronze)

รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะรูปร่างต่างๆ ของแกรไฟต์ที่อาจเกิดขึ้นได้ในเหล็กหล่อที่มีแกรไฟต์เป็นแผ่น และในเหล็กที่มีซิลิกอนสูง (ตารางที่ 2.2) แกรไฟต์รูปร่างต่างๆ นี้เป็นผลมาจากการปนเปื้อนของตะกั่วและการกักเก็บไฮโดรเจนในเนื้อโลหะ แกรไฟต์ที่มีลักษณะแบบวิดแมนสแตตเทน (Widmanstatten) ทำให้สมบัติเชิงกลด้อยลงอย่างมาก จากข้อเท็จจริงพบว่า ชาติ

ตกค้างในปริมาณเล็กน้อยและแก๊สที่ละลายในน้ำโลหะมีผลต่อลักษณะรูปร่างของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อที่มีธาตุผสมมากกว่าเหล็กหล่อปกติ ดังนั้นควรเอาใจใส่และระมัดระวังต่อการเลือกวัตถุดิบที่ถูกต้องก่อนนำเข้าเตา หลีกเลี่ยงสิ่งปนเปื้อน และหาวิธีป้องกันแก๊สละลายลงสู่โลหะเหลว [5]

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อผสมซิลิกอนปริมาณสูง (BS 1591:1975) [5]

Grade	Chemical Composition (% by wt.)					
	C (Max)	Si	Mn (Max)	P (Max)	S (Max)	Cr
Si 10	1.2	10.00-12.00	0.5	0.25	0.1	-
Si 14	1.0	14.25-15.25	0.5	0.25	0.1	-
Si Cr 14 4	1.4	14.25-15.25	0.5	0.25	0.1	0.4-0.5
Si 16	0.8	16.00-18.00	0.5	0.25	0.1	-

2.2.3 ความต้านทานการกัดกร่อน

ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของเหล็กหล่อออสเทนนิติกเมื่อเทียบกับเหล็กหล่อซิลิกอนสูงและเหล็กหล่อโครเมียมเฟอร์ริติก แสดงในตารางที่ 2-3 สำหรับเหล็กหล่อ Ni-Resist การเพิ่มปริมาณนิกเกิลสามารถเพิ่มความต้านทานต่อความร้อน ความต้านทานต่อการกัดกร่อน และความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน การเพิ่มปริมาณโครเมียมช่วยเพิ่มความต้านทานต่อออกซิเดชันและต้านทานต่อการกัดเซาะ แต่อาจทำให้เกิดโครเมียมคาร์ไบด์บริเวณระหว่างเซลล์เทคติก ซึ่งสามารถทำให้ความเหนียวและความสามารถในการกัดกลึงลดลง [5]

ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนที่สภาวะต่างๆ ของเหล็กหล่อแต่ละประเภท Brown [5]

	เหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อเหนียว และเหล็กหล่ออบเหนียว	Ni-Resist	เหล็กหล่อผสม ซิลิกอนปริมาณสูง (10 - 16%Si)	เหล็กหล่อผสมโครเมียม ปริมาณสูง (30%Cr, 1 -2%C)
บรรยากาศทั่วไป และบริเวณชายฝั่ง	B	A	A	A
น้ำ Soft	B	A	A	A
น้ำกระด้าง	A	A	A	A
น้ำทะเล	C	A	A	A
กรดเจือจาง	C	B	A	A ¹
กรดเข้มข้น	C ²	C	A ³	C
อัลคาไลน์เจือจาง	A	A	C	A
อัลคาไลน์เข้มข้น	B	A	C	C

A: ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี B: ต้านทานการกัดกร่อนได้ปานกลาง C: ไม่ต้านทานการกัดกร่อน

1. เหล็กหล่อที่ไม่มีธาตุผสมสามารถต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกได้ดี
2. เหล็กหล่อผสมซิลิกอนสูงไม่ต้านทานกรดไฮโดรฟลูออริก
3. เหล็กหล่อผสมโครเมียมปริมาณสูงต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดไฮโดรครอิกได้ไม่ด้นัก

เหล็กหล่อที่มีนิกเกิล 35% ถูกการออกแบบมาเพื่อใช้ในงานที่ต้องการสมบัติการขยายตัวทางความร้อนต่ำที่สุด และความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันสูงสุด (Type 5 & D 5) เหล็กหล่อ Type D2M ซึ่งมีแมงกานีส 2% ได้รับการออกแบบสำหรับงานอุณหภูมิต่ำมาก อิทธิพลโดยรวมของธาตุนี้เกิดและแมงกานีสในปริมาณมากทำให้เฟสออสเทนไนต์มีเสถียรภาพสูง เช่น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิต่ำลงถึง -196°C เฟสออสเทนไนต์ยังคงสภาพเดิมโดยไม่เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ ชิ้นงานที่ทำจากเหล็กหล่อ Ni-Resist สามารถอบชุบโดยมีวัตถุประสงค์ต่อไปนี้อบชุบที่อุณหภูมิ $600^{\circ}\text{C} - 650^{\circ}\text{C}$ เพื่อลดความเค้นตกค้างหรืออบอ่อนทำให้ความแข็งแรงลดลงที่อุณหภูมิ $950^{\circ}\text{C} - 1,000^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้เฟสยูเทคติกคาร์ไบด์สลายตัวและ/หรือเฟสดังกล่าวมีรูปทรงกลมมนขึ้น หรืออบเพื่อสร้างเสถียรภาพให้กับขนาดชิ้นงานเพื่อลดการโตของเหล็กหล่อเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงซึ่งทำได้โดยการอบที่ 900°C นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้เย็นภายในเตาลงมาถึง 550°C และปล่อยให้เย็นในอากาศ การอบชุบเช่นนี้ทำให้อะตอมคาร์บอนส่วนเกินแพร่ออกมาจากโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ [5]

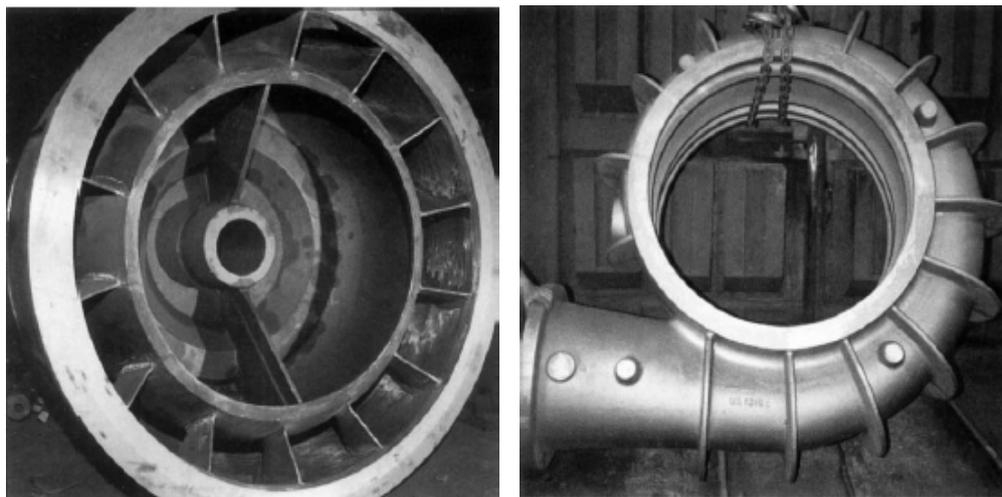
ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อผสมซิลิกอนปริมาณสูงตามมาตรฐานของสหราชอาณาจักร (BS Specification) สำหรับเหล็กหล่อผสมซิลิกอน 10-16% แสดงในตารางที่ 2.2 สำหรับการใช้เหล็กหล่อซิลิกอนสูงในงานที่ต้องทนต่อการกัดกร่อน เนื่องจากมีปริมาณซิลิกอนมากทำให้ปริมาณคาร์บอนถูกจำกัดในช่วง 0.8-1.2% โดยโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อชนิดนี้มีโครงสร้างพื้นเป็นเฟอร์ริติกที่มีซิลิกอนอิ่มตัว ซึ่งมีเกล็ดแกรไฟต์ทั้งแบบหยาบและแบบละเอียดปะปนกัน เหล็กหล่อชนิดนี้สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนออกซิไดซิง (Oxidizing Mineral Acids) ได้ดี แต่ทนต่อการไฮโดรคลอริกได้ไม่ดี ยกเว้นในกรณีที่มีปริมาณซิลิกอนสูงถึง 18% หรือมีโครเมียม 4-5% และมีความแข็งสูง (450 HB - 500 HB) แต่ค่อนข้างเปราะ และมีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ (150 MPa) ทำให้สามารถแตกร้าวได้ง่ายในระหว่างการเย็นตัวในแบบ จึงควรแกะชิ้นงานออกจากแบบหลังจากการแข็งตัวสิ้นสุดลงให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ แล้วนำชิ้นงานหล่อที่ยังร้อนอยู่เข้าเตาที่มีอุณหภูมิ 600°C จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปยัง 750°C - 850°C ทิ้งไว้ 8 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C เหล็กหล่อแบบนี้ อาจเกิดการเก็บกักไฮโดรเจนในน้ำโลหะได้ง่าย ซึ่งทำให้ชิ้นงานหล่อมักมีคุณภาพไม่ดี ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังเกี่ยวกับวิธีปฏิบัติในการหล่อเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว รวมทั้งต้องทำให้ปริมาณอะลูมิเนียมต่ำกว่า 0.01% เหล็กพิก (Pig Iron) ที่มีปริมาณซิลิกอนสูงถึง 10-14% เหมาะสำหรับเป็นวัตถุดิบและเฟอร์โรอัลลอยที่มีซิลิกอนมาก (Si-rich ferroalloy) ต้องมีอะลูมิเนียมปริมาณต่ำ ส่วนใหญ่โลหะเหลวถูกผลิตเป็นเหล็กพิกแล้วหลอมซ้ำก่อนหล่อขึ้นอีกเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ค่าซูเปอร์ฮีท (Superheat) ที่สูงมากเกินไป (ลดการสิ้นเปลืองพลังงาน) และเพื่อให้สามารถเทน้ำโลหะเข้าแบบได้ที่อุณหภูมิต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงข้อบกพร่องที่เกิดจากน้ำโลหะวิ่งเข้าไม่เต็มแบบ แบบหล่อที่ยึดด้วยพันธะเคมี (Chemically Bonded Mould) หรือทรายแห้ง (Dry Sand) ถูกใช้งานแทนทรายชื้น (Green Sand) รวมทั้งสารเคลือบของแบบควรแห้งเพื่อป้องกันไฮโดรเจนจากความชื้น [5]

สำหรับเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติก (Ferritic High-Cr Irons) มีปริมาณโครเมียม 30-35% และคาร์บอน 1-2% เมื่อสิ้นสุดการแข็งตัวพบว่าปรากฏเดนไดรต์ของเฟอร์ไรต์ โดยเฟสนี้ยังคงเสถียรในระหว่างการเย็นตัว ทำให้เกิดโครงสร้างงานหล่อของเฟอร์ไรต์และยูเทคติกคาร์ไบด์ บริเวณระหว่างแขนเดนไดรต์ เหล็กหล่อกลุ่มนี้ทนต่อการสึกหรอได้ไม่มากนัก แต่มีความต้านทานต่อการออกซิเดชันที่ดี แม้อุณหภูมิสูงถึง 1,100°C และทนต่อการกัดกร่อนได้ดีในกรดออกซิไดซิง (Oxidizing Acids) เหล็กหล่อกลุ่มนี้ถูกใช้งานในกระบวนการซินเทอร์เพื่อทำหน้าที่ชิ้นส่วนของเตา และหัวฉีดของเบิร์นเนอร์ (Burner Nozzle) เป็นต้น เนื่องจากสามารถทนต่อการเกิดสเกลที่ผิวและต้านทานการพองตัวของงานหล่อ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น เหล็กหล่อกลุ่มนี้เกิดการกัดกร่อนด้วยสารอัลคาไลน์ภายใต้สภาวะการรีดิวซ์ (Reducing) และ

หากมีการจัดจุ่มด้วย ส่งผลให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อนด้อยลงอย่างมาก ยกตัวอย่าง การใช้งานปั้มน้ำจากเหมืองแร่ อนุภาคที่ทำให้เกิดการกัดจุ่มทำให้ต้องเลือกใช้เหล็กเกรดที่มีคาร์บอนสูงกว่า ที่สามารถเพิ่มความแข็งได้โดยการอบชุบ เหล็กหล่อกลุ่มนี้มีความต้านทานต่อแรงดึงในช่วง 400 MPa - 500 MPa และมีความแข็งในช่วง 250 HB - 350 HB [5]

2.2.4 ตัวอย่างการใช้งานเหล็กหล่อ Ni-Resist

เหล็กหล่อ Ni-Resist เป็นเกรดที่ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี มีการใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับปั้มที่ใช้กับน้ำทะเล และน้ำดิบที่สามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนและกัดเซาะ นอกจากนั้นยังคงสมบัติที่ดีในด้านความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงต่ำถึง -150°C ยกตัวอย่างเช่น ใช้ผลิตปั้มคอมเพรสเซอร์และชิ้นส่วนวาล์วในที่อุณหภูมิต่ำ และในการผลิตกักเก็บขนส่งแก๊สอัดเหลวเนื่องจากแม่เหล็กดูดไม่ติด นอกจากนั้นยังใช้ผลิตชิ้นส่วนสำหรับเตาไฟฟ้าและชิ้นส่วนในโรงไฟฟ้า ตัวอย่างการใช้งานได้แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงการใช้เหล็ก Ni-Resist ผลิตปั้มสูบน้ำทะเล ซึ่งมีสภาวะการใช้งานภายใต้ความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี [5]



(a)

(b)

รูปที่ 2.7 ตัวอย่างเครื่องมือที่ผลิตจากเหล็กหล่อ Ni-resist (a) ปั้มสูบน้ำทะเลผลิตจาก Ni-resist type D-2W (b) ชิ้นส่วนปั้มกั้นหอยผลิตจาก Ni-resist type 1 [5]

2.3 อิทธิพลของธาตุผสมในเหล็กหล่อ

ผู้ผลิตเหล็กมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรู้ถึงอิทธิพลของธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในเหล็กนั้นๆ เป็นอย่างดี เพื่อที่จะได้ควบคุมส่วนผสมทางเคมีของธาตุต่างๆ ให้อยู่ในขอบเขตที่พอเหมาะ (Optimum) สามารถผลิตเหล็กให้ได้มาตรฐานที่มีคุณภาพดีทั้งทางด้านโลหะวิทยา (Metallurgical) และทางกล (Mechanical) สามารถแนะนำผู้ใช้ให้เลือกใช้เหล็กชนิดต่างๆ ได้อย่างถูกต้องกับสภาพการใช้งานจริงๆ เป็นแนวทางช่วยพัฒนามาตรฐานเหล็กในประเทศไทยให้ได้มาตรฐานสากลสืบไป ในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะธาตุที่มีผสมอยู่ในเหล็กหล่อเท่านั้น

อิทธิพลของธาตุต่างๆ ที่มีต่อเหล็กหล่อ : ธาตุสามัญธรรมดาทั่วไปที่ต้องมีในเหล็กหล่อทั่วไป จะมีทั้งหมด 5 ตัวด้วยกัน คือคาร์บอน ซิลิกอน แมงกานีส ฟอสฟอรัส และกำมะถัน (Sulfur) ซึ่งแต่ละธาตุจะมีอิทธิพลดังต่อไปนี้

2.3.1 อิทธิพลของคาร์บอน (C):

คาร์บอนมีจุดหลอมตัวที่ $3,500^{\circ}\text{C}$ เหล็กหล่อเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนสูง เพราะฉะนั้นคาร์บอนจึงมีอิทธิพล ต่อสมบัติของเหล็กหล่อมากที่สุด คาร์บอนไม่เพียงแต่จะแยกตัวออกมาในรูปของคาร์บอนอิสระ (Free Carbon) หรือ แกรไฟต์ (Graphite) อย่างเดียวส่วนหนึ่งยังรวมตัวอยู่ในรูปเหล็กคาร์ไบด์ (Fe_3C) ด้วยแกรไฟต์ยิ่งแยกออกจากเหล็กมากเท่าใดก็จะทำให้เหล็กหล่ออ่อนมากขึ้นเท่านั้น และจะตัดแต่งด้วยเครื่องกล โรงงานง่ายสำหรับเหล็กคาร์ไบด์หรือซีเมนต์ไทต์ (Cementite) นั้นจะทำให้เหล็กหล่อมีความแข็งแรงสูง แต่ถ้ามี Fe_3C มากเกิน 35% ของคาร์บอนทั้งหมด จะทำให้เหล็กหล่อที่ได้อ่อนหรือตัดแต่งยาก เพราะฉะนั้นในการทำเหล็กหล่อจึงพยายามไม่ให้มีคาร์ไบด์เกินกว่า 35% ของคาร์บอนทั้งหมดที่มีอยู่ในเหล็กหล่อนั้น (ยกเว้นเหล็กหล่อขาว White Cast Iron หรือเหล็กหล่อพิเศษ) [6]

เหล็กหล่อธรรมดามีคาร์ไบด์ต่ำกว่า 35% ของคาร์บอนทั้งหมด แต่จะต้องพยายามไม่ให้แกรไฟต์แยกตัวออกมาเกิน 90% ของคาร์บอนทั้งหมด เพราะแกรไฟต์ ไม่มีคุณค่าทางความแข็งแรง (Strength) ถ้าแกรไฟต์มีมากจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กลดลง ทำให้ความแข็งแรงลดลงด้วย ทั้งนี้เพราะเกิดรอยบากขึ้นในเนื้อเหล็ก (Notch effect) เหล็กหล่อธรรมดาทั่วไป ภายในเนื้อเหล็กทั้งหมดจะเป็นแกรไฟต์เสียประมาณ 1/10 ของปริมาตร (Volume) ทั้งหมด ฉะนั้นสมบัติทั่วไปของเหล็กหล่อจึงขึ้นอยู่กับปริมาณและลักษณะรูปร่างการกระจายตัวของแกรไฟต์มากกว่าสมบัติทางเคมี และทางโครงสร้าง (Microstructure) ของเหล็กหล่อนั้น [6]

เหล็กหล่อที่มีคาร์บอนต่ำๆ เช่น 1.5-2.5% ทำขึ้นใช้เฉพาะงานและจำเป็นจะต้องทำการชุบด้วย (Heat treatment) เหล็กพวกนี้มีความสามารถเติมให้เต็มแบบหล่อ (Form Filling) ไม่ได้ มีการหดตัวมาก ทำให้เกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Cavity) ง่าย เหล็กหล่อที่มีสมบัติทางกลสูง จะต้องพยายามทำให้มีคาร์บอนต่ำ และแกรไฟต์แยกตัวน้อย แกรไฟต์จะต้องมีรูปร่างที่เหมาะสมคือสั้นและเล็ก กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ [6]

สำหรับข้อที่ว่าให้มีคาร์บอนต่ำนั้นจะต้องให้อยู่ในพิสัย (Limit) ไม่ใช่ต่ำจนเกินไป เพราะเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนต่ำมากๆจะเทยากทั้งไว้นานจะเหนียวไม่แข็ง หล่อเหล็กขึ้นบางไม่ได้ แกรไฟต์ง่าย เป็นโพรงง่ายหล่องานที่มีรูปซับซ้อนไม่ได้ หล่องานที่มีความหนาบางต่างกันมากก็ไม่ได้หดตัวมาก เหล็กหล่อที่มีคุณภาพดีจะต้องควบคุมให้มีคาร์บอนต่ำพอเหมาะ (Optimum) มีรูปร่างแกรไฟต์ ที่เหมาะสม สิ่งเหล่านี้จะกระทำได้ที่โดยกรรมวิธีการหล่อหลอม (Melting Treatment) เช่นการผลิตเหล็กให้ได้แกรไฟต์ type A หรือการผลิตเหล็กให้ได้แกรไฟต์รูปกลมอย่างในการทำเหล็กหล่อเหนียว (Nodular Cast Iron) เป็นต้น ซึ่งการผลิตดังกล่าวจะทำให้เหล็กหล่อที่ได้มีความแข็งแรงสูงแต่ความแข็งแรง (Hardness) ไม่มากนัก สามารถกลึงหรือตัดแต่งได้สะดวก [6]

2.3.2 อิทธิพลของ ซิลิกอน (Si):

ซิลิกอนจุดหลอมตัวที่ $1,415^{\circ}\text{C}$ ทำให้จุดยูเทกติก (Eutectic) ในแผนภูมิการรวมตัวของเหล็กคาร์บอน (Fe-C Phase diagram) เลื่อนไปทางที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนต่ำ (เลื่อนไปทางซ้ายมือ) หมายความว่าซิลิกอนจะทำให้คาร์บอนในเหล็กละลายรวมกับเหล็กยากขึ้น การที่คาร์บอนละลายยากก็ทำให้มันแยกตัวได้ง่าย อีกนัยหนึ่งก็คือซิลิกอนช่วยให้แกรไฟต์แตกตัวได้ง่าย มีแกรไฟต์ในเนื้อเหล็กหล่อมามาก แต่มีคาร์ไบด์น้อย [6]

การเติมซิลิกอนยังขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานหล่อ งานหล่อที่มีพื้นที่หน้าตัดบางจำเป็นต้องใส่ซิลิกอน ถ้าชิ้นงานหนาจะใส่ซิลิกอนน้อย แต่ทั้งนี้จะต้องใส่ซิลิกอนไม่ให้เกิน 3.5% ถ้าเกินขนาดนี้จะทำให้เหล็กหล่อที่ได้เปราะ เพราะมักเกิดเป็นสารประกอบ (Compound) ใหม่เป็นเฟอโรซิลิกอน (FeSi) ในเนื้อเหล็กหล่อซึ่งจะเปราะมาก ยิ่งซิลิกอนมีในเหล็กมากจะทำให้แกรไฟต์แตกตัวออกมามีลักษณะหยาบแผ่นหนา [6]

ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ของเหล็กหล่อมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับคาร์บอนและซิลิกอน เหล็กหล่อเทาที่มีขนาดบางจะมีคาร์บอนรวมกับซิลิกอนมากกว่า 3.8% และไม่เกิน 6%

แกรไฟต์ที่ได้จะเป็นแผ่น (Flake) สำหรับชิ้นงานจะมีคาร์บอนรวมกับซิลิกอนไม่เกิน 5% และต้องมีซิลิกอนล้วนๆ ไม่เกิน 3.5% ด้วย จึงจะทำให้เหล็กหล่อมีความแข็งแรงดี [6]

2.3.3 อิทธิพลของแมงกานีส (Mn):

แมงกานีสมีจุดหลอมตัวที่ $1,242^{\circ}\text{C}$ มีหน้าที่ดึงออกซิเจนออกจากเหล็ก (Deoxidizing agent) และเป็นตัวดึงกำมะถัน (Desulfurizing agent) นอกจากนี้แมงกานีสยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งให้กับเหล็ก เพราะถ้ามีมากจะทำให้เหล็กหล่อเป็นคาร์ไบด์ได้มาก ทั้งนี้เพราะแมงกานีสทำให้คาร์บอนละลายในเหล็กหล่อได้มากขึ้น แมงกานีส ในเหล็กหล่อถ้ามีน้อยกว่า 0.5% ยังไม่ทำให้เหล็กเป็นคาร์ไบด์ได้ ถ้าจะให้คาร์ไบด์จะต้องเติมให้มากกว่านี้ แต่ต้องไม่มากเกินไปจนทำให้เกิดคาร์ไบด์เกิน 35% ของคาร์บอนทั้งหมดดังกล่าวแล้ว [6]

แมงกานีสถ้ามีมากจะรวมกับกำมะถันเป็นแมงกานีสซัลไฟด์และคาร์ไบด์เป็นเหตุให้เกิดผิวแข็ง (Chill) ได้ลึกขึ้น ตามหลักกำมะถันมีผลทำให้เหล็กแข็งมากกว่าแมงกานีส ดังนั้นผลอันหนึ่งที่เติมแมงกานีสเข้าไปก็เพื่อลดความแข็งที่เกิดจากกำมะถันลงทำให้กำมะถันเป็นกลาง และแมงกานีสยังช่วยให้น้ำเหล็กไหลดีขึ้นด้วย และเนื่องจากแมงกานีสซัลไฟด์ (MnS) เบากว่าเหล็กซัลไฟด์ (FeS) จึงลอยตัวขึ้นไปอยู่ในน้ำเหล็กช่วยลดกำมะถันในเหล็กลง แล้วอนุภาคเล็กๆของแมงกานีสซัลไฟด์จะช่วยทำหน้าที่เป็นสารเติมพิเศษ (Inoculation Material) คือช่วยให้แกรไฟต์กระจายตัวเป็นระเบียบดีขึ้นเป็นเหตุให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แมงกานีสถ้ามากถึง 1% เพิ่มความหนาแน่นให้กับเหล็กหล่อเทา [6]

เพื่อที่จะให้แมงกานีสเป็นตัวทำให้กำมะถันในเหล็กมีสมดุลกันจึงนิยมใส่แมงกานีสตามสัดส่วนดังนี้คือ $\% \text{Mn} = 0.3 + 1.7 \% \text{S}$ [6]

2.3.4 อิทธิพลของฟอสฟอรัส (P):

ฟอสฟอรัสมีจุดหลอมตัวที่ 44.1°C เวลาพร้อมกับเหล็กเป็น Fe_2P หรือ Fe_3P ถ้าเติมมากจะทำให้เหล็กหล่อมีจุดหลอมตัวต่ำลง ซึ่งจะมีจุดยูเทคติกอยู่ในราว $1,050^{\circ}\text{C}$ ถ้าฟอสฟอรัสมีมากจะกลายเป็นฟอสไฟต์ไปอยู่ตามขอบเกรน (Grain Boundary) ของเหล็ก เวลาเราไปรีดใช้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้ฟอสไฟต์แตกออกมาเป็นสะเก็ด (Scaling) ฟอสฟอรัสทำให้แกรไฟต์แตกตัวง่ายทำให้โครงสร้างเพิร์ลไลท์คงตัว (Pearlite Stable) ดีขึ้น ทำให้แกรไฟต์แตกตัวเป็นระเบียบ ถ้าต้องการหล่อเหล็กหล่อที่มีฟอสฟอรัสสูงขณะเดียวกันก็ต้องการเหล็กหล่อที่มีคาร์ไบด์มากด้วย จำเป็นจะต้องลดปริมาณซิลิกอนลง ถ้าฟอสฟอรัสมากเกินไปจะทำให้เหล็กหล่อแข็งขึ้นแต่ความแข็งแรงจะต่ำ แต่ถ้าเติม 0.35-0.65% จะยังคงรักษาความแข็งแรงให้

สูงอยู่ได้ ฟอสฟอรัสช่วยให้เหล็กหล่อมีการไหลตัวดี (Fluidity) สามารถไหลซอกแซกตามแบบหล่อได้ดี (เต็มแบบทุกส่วน) ฟอสฟอรัสมีผลต่อคาร์บอนเทียบเท่า (Carbon Equivalent) ของเหล็กหล่อด้วย [6]

2.3.5 อิทธิพลของกำมะถันหรือซัลเฟอร์ (S):

ซัลเฟอร์มีจุดหลอมตัวที่ 155°C ถ้ามีอยู่ในเหล็กหล่อมักจะรวมตัวกับเหล็กเป็นเหล็กซัลไฟด์ (FeS) ทำให้เหล็กขยายตัวและยุบตัวมาก ดังนั้นจึงทำให้เหล็กหล่อเป็นโพรงง่าย ทำให้เหล็กหนืดเทไม่ค่อยเต็มแบบ ความแข็งแรงทางดึงต่ำ นอกจากนั้นยังทำให้เหล็กแข็ง เพราะซัลเฟอร์ช่วยให้เกิดคาร์ไบด์ได้มากขึ้น ปกติใส่ซัลเฟอร์ได้ไม่เกิน 0.1% ซัลเฟอร์ในเหล็กส่วนมากได้มาจากถ่านโค้ก (Coke) เศษเหล็กหล่อต่างๆ และอาจมาจากเหล็กปิก (Pig iron) ถ่านโค้กชนิดเร็วทำให้เหล็กหล่อมียซัลเฟอร์มากขึ้นได้ ซัลเฟอร์จากถ่านโค้กจะรวมตัวกับออกซิเจนได้ประมาณ 70% ที่เหลือจะลงไปรวมกับเหล็กได้อีกประมาณ 50-30% ตามสมการที่ 2.3



ถ่านโค้กที่ใช้หล่อเหล็กโดยทั่วไปมีซัลเฟอร์น้อยกว่า 1% ถ้าหากถ่านโค้กมีซัลเฟอร์มากจำเป็นต้องเพิ่มแมงกานีส และซิลิกอนลงไปเพื่อดึงออกเสียบ้างก็ได้ โค้กที่ใช้หล่อเหล็กควรมีคาร์บอน (Fixed Carbon) ไม่ต่ำกว่า 90% ซัลเฟอร์ไม่เกิน 10% ซัลเฟอร์ไม่เกิน 1% สารระเหยง่าย (Volatile matter) อีกไม่เกิน 1.0% [3]

ปัจจุบันนี้เหล็กหล่อเทาสำหรับทำชิ้นส่วนเครื่องยนต์นิยมเติมธาตุทองแดงเข้าไปด้วยเพื่อผลด้านบวกหลายอย่าง จึงขอกล่าวถึงอิทธิพลของทองแดงด้วย

2.3.6 อิทธิพลของทองแดง (Cu):

ทองแดงมีจุดหลอมตัว $1,083^{\circ}\text{C}$ ตามทฤษฎีแล้วการเติมทองแดงเข้าไปในเหล็กหล่อกระทำได้ทั้งการเติมลงในเบ้าหรือในเตาหลอม แต่ที่ได้ผลจริงๆ ตามทางปฏิบัติแล้ว นิยมเติมลงในเตาหลอมพร้อมๆกับการใส่เหล็ก เพราะเมื่อเติมทองแดงลงในเบ้าก่อนเทน้ำเหล็กอุณหภูมิจะลดลงมากความร้อนจะถูกดึงไปหลอมทองแดงอย่างรวดเร็ว ซึ่งทองแดงมีจุดหลอมตัวสูงถึง $1,083^{\circ}\text{C}$ ทองแดงจะละลายในเหล็กหล่อได้สูงสุดประมาณ 3.0% ปกติจะเติมไม่เกินนี้หรือต่ำกว่านี้ ทองแดงมีอิทธิพลที่จะควบคุม หรือจำกัดขอบเขตของความลึกของผิว (Chill) ในเหล็กหล่อได้เท่ากับ 1/3 เท่าของธาตุซิลิกอน อิทธิพลของทองแดงที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อได้ถูกศึกษาค้นโดยนาย Dilewijns, De Sy [6] ทดลองโดยการเติมทองแดง 0.1-2.0% ลงในท่อเหล็กที่มีซิลิกอน 1.5% และ 2.0% และเหล็กหล่อนี้มีคาร์บอนอิ่มตัวที่

จุดยูเทกติกอยู่ระหว่าง 0.75 % และ 0.95% ตามลำดับ ค่าคาร์บอน อิมัตว์ที่จุดยูเทกติกหาได้จากสมการต่อไปนี้ [6]

$$Se = \frac{C \text{ analysis}}{4.23 - \frac{1}{3}(Si + P)} \quad (2.4)$$

Se Saturated Carbon = คาร์บอนอิมัตว์ที่จุดยูเทกติก
C analysis = คาร์บอนที่มีในเหล็กหล่อนั้น

$$\frac{1}{3}(Si + P) = \frac{\%ซิลิคอน + \%ฟอสฟอรัส}{3} \quad (2.5)$$

Se ที่ใช้งานจริงๆ จะเกิน 1.0% ไม่ได้

ในการทดลองเขาใช้แท่งทดสอบสมบัติทางกลและความแข็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{2}$ นิ้ว ถึง 6 นิ้ว ผลการทดลองพบว่าอิทธิพลของทองแดงที่มีต่อเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนอิมัตว์ที่จุดยูเทกติกคงที่ จะแปรเปลี่ยนตามส่วนผสมของทองแดงและขนาดของความหนาของชิ้นทดลอง ผลทดลองปรากฏดังนี้

- ถ้าเติมทองแดง 1.0% ความแข็งจะเพิ่มขึ้น 15-35 HB และทนแรงดึงเพิ่มขึ้น 2-4 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร
- ถ้าเติมทองแดง 2.0% ความแข็งจะเพิ่มขึ้น 30- 45 HB และทนแรงดึงเพิ่มขึ้น 4.5-7 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร

นอกจากนั้นการเติมทองแดงลงในเหล็กหล่อจะทำให้เหล็กหล่อมีโครงสร้างอัลฟา (α) หรือเฟอไรต์ (Ferrite) อีตระน้อยลง ทำให้แกรไฟต์แตกตัวละเอียดขึ้น เพิ่มความแข็งเหนียวให้โครงสร้างเฟอไรต์ได้ด้วย นอกจากนี้ยังช่วยให้การเทน้ำเหล็กไหลได้เต็มแบบได้ดีขึ้นด้วย (Fluidity ของน้ำเหล็กดีขึ้น) ในทางปฏิบัติถ้าต้องการปรับปรุงสมบัติทางกลของเหล็กอย่างเดียวน่าจะใช้ทองแดงเติมได้ไม่เกิน 2.0-2.5% การเติมทองแดงลงในเตา (เตาไฟฟ้าชนิดเหนียวน้ำ) จะไม่มีการสูญเสียโดยการเกิดออกไซด์เลย ทองแดงที่เหมาะสมสำหรับใส่เป็นตัวเติมในเหล็กหล่อได้แก่ ทองแดงบริสุทธิ์หรือทองแดงที่แยกด้วยไฟฟ้า อย่าใช้ทองแดงที่ไม่รู้ส่วนผสมเป็นอันตรายเพราะอาจมีธาตุที่เป็นอันตรายต่อเหล็กหล่อเล็กน้อยปนอยู่ เช่น ตะกั่ว พลวง และเทลลูรัม (Tellurium) ซึ่งธาตุเหล่านี้จะทำให้เหล็กหล่อสีเทาที่ได้มีคุณภาพด้อยลง [6] อิทธิพลของธาตุต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้น สามารถสรุปอิทธิพลของธาตุต่างๆกับสมบัติทางฟิสิกส์ได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สรุปอิทธิพลของธาตุผสมในเหล็กหล่อที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ

ธาตุ Element	การไหลตัว Fluidity	ความอ่อน Softness	การหดตัว Shrinkage	ความแข็งแรง Strength	ความหนาแน่น Density	ผิวแข็ง Chill	กำมะถัน Sulphur	คาร์ไบด์ Combined Carbon	คาร์บอนอิสระ Graphite
คาร์ไบด์ Combined Carbon	ลดลง Decreases	ลดลง Decreases	เพิ่มขึ้น Increases	เพิ่มขึ้น Increases	เพิ่มขึ้น Increases	เพิ่มขึ้น Increases	เป็นกลาง Neutral	- -	ลดลง Decreases
คาร์บอนอิสระ Graphite	เพิ่มขึ้น Increases	เพิ่มขึ้น Increases	ลดลง Decreases	ลดลง Decreases	ลดลง Decreases	ลดลง Decreases	เป็นกลาง Neutral	ลดลง Decreases	- -
ซิลิกอน Silicon	เพิ่มขึ้น Increases	เพิ่มขึ้น Increases	ลดลง Decreases	ลดลง Decreases	ลดลง Decreases	ลดลง Decreases	ลดลง Decreases	ลดลง Decreases	เพิ่มขึ้น Increases
แมงกานีส Manganese	เพิ่มขึ้น Increases	มีถึง 1% เพิ่มขึ้น up to 1% Increases	มีผลนิดหน่อย Little effect	เพิ่มขึ้น Increases	เพิ่มขึ้น Increases	มีเกิน 1% เพิ่มขึ้น above 1% Increases	ลดลง Decreases	เพิ่มขึ้น Increases	ลดลง Decreases
กำมะถัน Sulphur	ลดลง Decreases	ลดลง Decreases	เพิ่มขึ้น Increases	ลดลง Decreases	เพิ่มขึ้น Increases	สนับสนุน (Promote)	- -	เพิ่มขึ้น Increases	ลดลง Decreases
ฟอสฟอรัส Phosphorus	เพิ่มขึ้น Increases	ลดลง Decreases	ซ้ำเติมร้ายแรง ขึ้น Aggravates	ลดลง Decreases	เป็นกลาง Neutral	มีผลนิดหน่อย Little effect	เป็นกลาง Neutral	แนวโน้มเพิ่มขึ้น Tends to increases	เป็นกลาง Neutral

2.4 ข้อบกพร่องที่สำคัญในชิ้นงานหล่อ

ข้อบกพร่องที่สำคัญในชิ้นงานหล่อคือ ความไม่สมบูรณ์หรือไม่สม่ำเสมอของชิ้นงานหล่อซึ่งมีอยู่หลายชนิด บางชนิดไม่มีผลเสียต่อการใช้งานและสามารถแก้ไขได้ด้วยการขัดผิวหรือแก้ไขด้วยการเชื่อม แต่ข้อบกพร่องบางชนิดมีผลเสียต่อการใช้งานมากจนต้องทิ้งชิ้นงาน วิศวกรจำเป็นต้องเข้าใจลักษณะของข้อบกพร่องต่างๆ สาเหตุของการเกิดและวิธีการแก้ไขข้อบกพร่องเหล่านี้

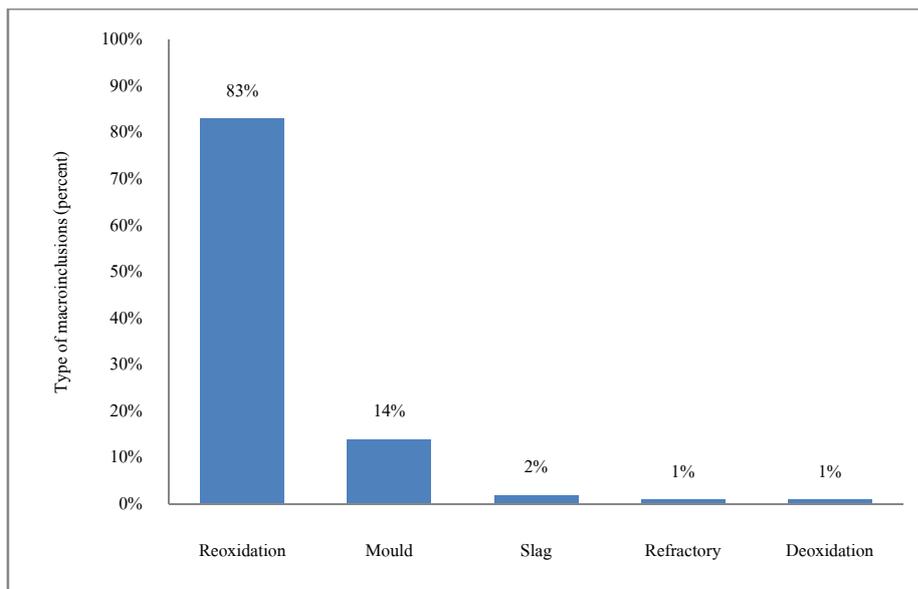
ข้อบกพร่องที่สำคัญที่พบมากในงานหล่อมักรายละเอียดดังนี้

2.4.1 สิ่งปลอมปน (Inclusions)

นอกจากสิ่งปลอมปนจากแผ่นฟิล์มออกไซด์ที่แตกเป็นชิ้นๆ แล้วยังมีโอกาสเกิดสิ่งปลอมปนจากฟลัก (Flux) ที่ใช้ทำความสะอาดน้ำโลหะซึ่งยังหลงเหลือในน้ำโลหะ อนุภาคของฟลักจะอยู่ที่ผิวของชิ้นงานที่ถูกตัดแต่งและจะดูดความชื้นจากอากาศทำให้เกิดการกัดกร่อนเฉพาะจุดที่ผิวชิ้นงานได้ ทั้งนี้สิ่งปลอมปนยังรวมถึงทรายที่เกิดจากการกัดเซาะน้ำโลหะกับแบบทรายด้วย [7]

พฤติกรรมของโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงจะแตกต่างจากโลหะเบา โดยจะมีชนิดของสิ่งปลอมปนที่หลากหลายมากกว่า ตัวอย่างเช่น ในเหล็กกล้าคาร์บอนจะพบสิ่งปลอมปนเกือบทุกชนิดที่พบได้ในโลหะกลุ่มเหล็ก สัดส่วนของสิ่งปลอมปนชนิดต่างๆที่พบในเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าเจือดำ แสดงดังรูปที่ 2.8 พบว่ามีเพียง 14% ของสิ่งปลอมปนขนาดใหญ่ (Macro inclusion) เป็นวัสดุจากเตาหลอม และประมาณ 4% จะเป็นพวกวัสดุทนไฟ ชีโลโลหะ และสารประกอบที่เกิดจากกระบวนการลดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ถูกพามาด้วยน้ำโลหะ อีกประมาณ 83% ของสิ่งปลอมปนขนาดใหญ่ จะเป็นอนุภาคที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นใหม่อีกครั้งระหว่างน้ำโลหะและสิ่งแวคดูมหลังจากน้ำโลหะถูกตัดออกจากเตาหรือถูกเทออกมา ผลที่แสดงทำให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมการไหลของน้ำโลหะขณะที่มีการไหลเข้าไปในแบบหล่อให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันน้อยที่สุด [7]

แม้การออกแบบทางวิ่งและระบบทางเข้าจะมีประสิทธิภาพเพียงใด แต่ก็ยังมีสิ่งปลอมปนขนาดละเอียดมากเกิดขึ้นในระหว่างการแข็งตัวของโลหะ เช่น MnS ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องว่างระหว่างเดนไดรต์ นอกจากนี้ยังมีสิ่งปลอมปนอื่นๆ ได้แก่ สารประกอบไนไตรด์ เช่น TiN สารประกอบคาร์ไบด์ เช่น TiC สารประกอบซิลไฟด์และสารประกอบออกซิซิลไฟด์ เป็นต้น [7]



รูปที่ 2.8 สัดส่วนของสิ่งปลอมปนชนิดต่างๆที่พบในงานหล่อเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าเจือต่ำ [7]

2.4.2 รูพรุนจากแก๊ส (Gas Porosity)

รูพรุนจากแก๊สในชิ้นงานหล่อมีหลายชนิด จึงจำเป็นต้องมีการวินิจฉัยถึงชนิดที่เกิดขึ้นให้ถูกต้อง เพราะหากวินิจฉัยชนิดของรูพรุนผิดก็จะทำให้การแก้ไขไม่มีประสิทธิภาพและทำให้เสียเวลาและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ชนิดหลักของรูพรุนจากแก๊สสามารถแบ่งออกเป็นประเภทหลักๆได้ดังนี้

2.4.2.1 รูพรุนจากแก๊สจริง (True Gas Porosity)

ชื่อของข้อบกพร่องชนิดนี้บ่งบอกว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นจากแก๊สมาจากแก๊สที่ละลายในน้ำโลหะแล้ว ตกตะกอนออกมาเป็นฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว ในโลหะที่แข็งตัวแบบเดนไดรต์ ฟองแก๊สที่ตกตะกอนออกมาจะอยู่บริเวณระหว่างเดนไดรต์ซึ่งจะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและมีขนาดที่ละเอียด ขนาดของรูพรุนจะอยู่ในช่วงประมาณ 0.01-0.5 มิลลิเมตร และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในชิ้นงานหล่อ รูพรุนเหล่านี้จะมีขนาดเล็กมากจนมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า เมื่อชิ้นงานถูกตัดแต่งด้วยใบมีดที่เป็นหัวคาร์ไบด์เพราะเนื้อโลหะจะถูกตัดเหมือนจนรูพรุนถูกกลบ ในทางตรงกันข้าม ถ้าใช้ใบมีดที่เป็นหัวเพชรจะทำให้การตัดแต่งสะอาดมากขึ้นส่งผลให้สามารถมองเห็นรูพรุนได้ [7]

ในโลหะที่แข็งตัวในแนวระนาบ ฟองแก๊สอาจจะเกิดขึ้นทันการเติบโตของแนวของการแข็งตัว (Solidification front) ทำให้เกิดข้อบกพร่องที่เป็นเหมือนท่อยาวเรียกว่ารูหนอน (Wormhole) ซึ่งมักจะพบเห็นเสมอในก้อนน้ำแข็งเพราะน้ำจะแข็งตัวในลักษณะที่ค่อนข้างจะเป็นแนวระนาบ

รูพรุนที่เกิดขึ้นอาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ถึง 1 มิลลิเมตร และมีความยาวที่หลากหลาย โดยอาจยาวถึง 100 มิลลิเมตร รูพรุนที่เกิดจากแก๊สจริงนี้สามารถถูกบ่งชี้ได้ง่ายและชัดเจน [7]

2.4.2.2 แก๊สที่ถูกดักไว้จากการไหลปั่นป่วนที่ผิว

เมื่อน้ำโลหะไหลเข้าสู่แบบหล่อในลักษณะที่ปั่นป่วน น้ำโลหะจะดักเอาอากาศหรือแก๊สต่างๆ แล้วพาให้ไหลไปด้วย ฟองอากาศเหล่านี้จะพยายามที่จะลอยตัวและแยกตัวออกไปจากโลหะ อย่างไรก็ตาม ฟิล์มออกไซด์ที่ติดอยู่กับฟองอากาศและที่ผิวชิ้นงานหล่อจะกักฟองอากาศให้อยู่ในชิ้นงานหล่อ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทำไมฟองอากาศจึงพบได้ทั่วไปในโลหะที่เกิดฟิล์มออกไซด์ได้ง่าย [7]

การแข็งตัวก่อนที่ผิวของงานหล่อจะทำให้การหลุดลอยออกของฟองอากาศจากชิ้นงานหล่อทำได้ยากขึ้น แต่เนื่องจากอัตราการลอยตัวหนีออกไปของฟองแก๊สจะเร็วมากทำให้เกิดขึ้นก่อนการแข็งตัว ดังนั้นการแข็งตัวก่อนที่ผิวของงานหล่อจึงไม่ค่อยก่อให้เกิดปัญหามากนัก แต่มีข้อยกเว้นในกรณีของชิ้นส่วนงานหล่อที่มีบางส่วนบางมากจนมีการแข็งตัวระหว่างการผลิตในน้ำโลหะ กรณีการหล่อแม่พิมพ์ด้วยแรงดันสูงเป็นตัวอย่างที่เห็นได้ชัดที่สุดดังนั้นในงานหล่อเท ฟองแก๊สจะรวมตัวอยู่บริเวณด้านล่างของไส้แบบ (Core) หรือจุดสูงสุดของชิ้นงานหล่อที่ซึ่งฟองแก๊สจะลอยขึ้นไปอยู่รวมกัน การรวมตัวกันของฟองแก๊สจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนหลังจากการขัดผิวหรือการตัดแต่งผิว [7]

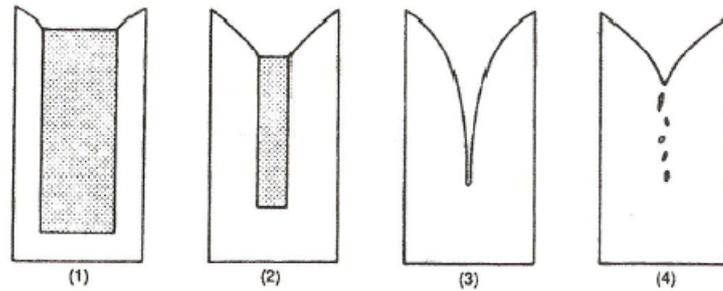
2.4.2.3 โพรงแก๊สจากไส้แบบ (Core blows)

ข้อบกพร่องนี้เกิดจากแก๊สที่พ่นออกจากไส้แบบหรือบางครั้งจากแบบหล่อ โดยทั่วไปโพรงแก๊สจากไส้แบบจะมีขนาดใหญ่มาก ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุดจะมีค่าประมาณ 10-20 มิลลิเมตรและอาจจะมีขนาดใหญ่ถึง 100 มิลลิเมตร โดยส่วนใหญ่มักจะพบว่าโพรงแก๊สจากไส้แบบจะอยู่ใต้ผิวชิ้นงานระดับหนึ่ง เหตุผลก็เพราะไส้แบบจะต้องใช้เวลาในการสะสมความดันก่อนที่จะสามารถพ่นแก๊สออกมาได้และส่วนบนของชิ้นงานหล่อมักจะแข็งตัวไปแล้ว เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ ไส้แบบทั้งหมดควรมีรูระบายแก๊สเพื่อลดปัญหาการสะสมของความดันซึ่งจะทำให้เกิดการพ่นแก๊สออกไป [7]

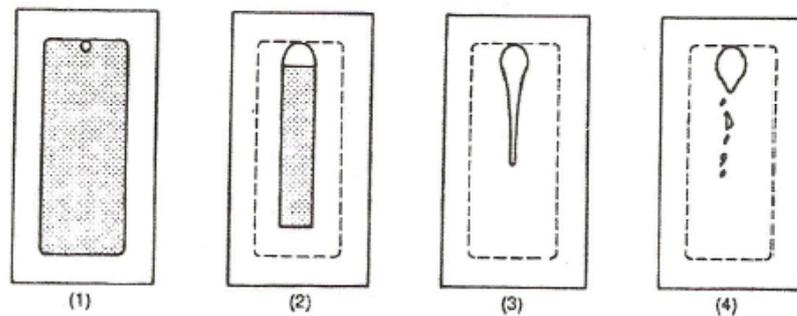
2.4.3 โพรงหดตัว (Shrinkage cavity)

ในระหว่างการป้อนน้ำโลหะจะมีการเติบโตของแนวของการแข็งตัวไปตรงกลางของชิ้นงานหล่อและระดับน้ำโลหะในรูล้นก็จะลดลงด้วย ผลลัพธ์ที่ได้คือการเกิดโพรงที่เป็นกรวยที่เรียก

ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โพรงหดตัวแบบนี้บางครั้งจะเรียกว่า ท่อหดตัวปฐมภูมิ (Primary Shrinkage Pipe) เพื่อที่จะแยกได้ชัดเจนจากโพรงหดตัวทุติยภูมิ (Secondary Shrinkage) ซึ่งจะเห็นได้จากภาพตัดผ่านของชิ้นงานหล่อโดยในลักษณะที่ประกอบไปด้วยรูพรุนที่แยกตัวเป็นกลุ่มและอยู่บริเวณด้านล่างท่อปฐมภูมิ ในความเป็นจริงแล้วโพรงหดตัวทุติยภูมิเป็นเพียงส่วนต่อท่อปฐมภูมิ ซึ่งเจาะต่อเข้าไปในชิ้นงานหล่อมามากกว่าที่คาดได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ขั้นที่ 4) [7]



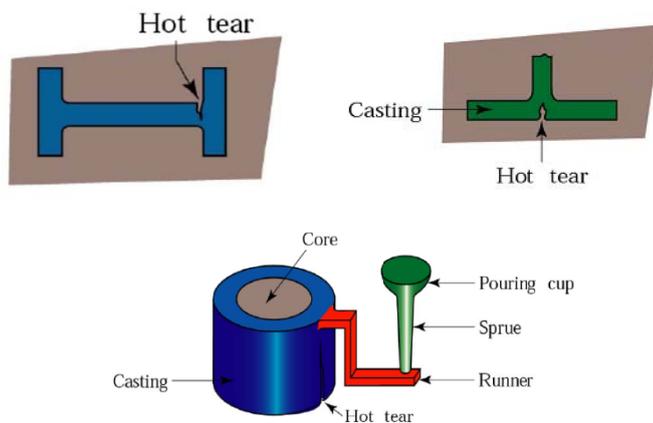
รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการเกิดโพรงหดตัวปฐมภูมิแบบท่อ [7]



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการเกิดโพรงหดตัวปฐมภูมิแบบภายใน [7]

2.4.4 การแตกร้าวร้อนและการแตกร้าวเย็น (Hot tear & Cold Crack)

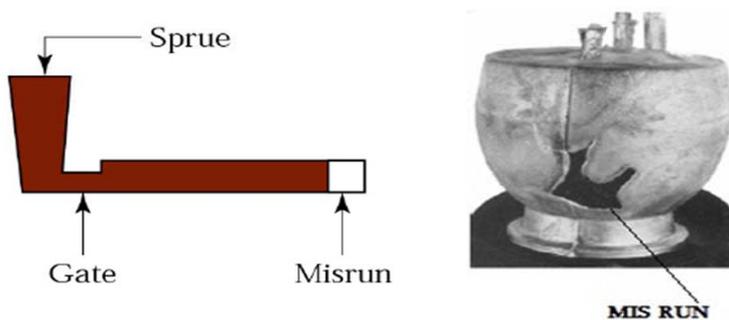
การแตกร้าวร้อน (Hot tear) และการแตกร้าวเย็น (Cold crack) เกิดจากความเค้นแรงดึงที่เกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัว การเกิดรอยร้าวที่ผิวของชิ้นงานหล่อซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงอาจจะถูกปิดอีกครั้งเมื่อชิ้นงานหล่อเย็นลงและมีความเค้นแรงกดกระทำต่อผิวของชิ้นงานหล่อ รอยร้าวลักษณะนี้ยากต่อการตรวจพบโดยวิธีทั่วไป ข้อบกพร่องนี้เป็นปัญหาที่สำคัญมากในชิ้นงานที่ใช้รับแรงที่ต้องการความปลอดภัยสูง การตรวจสอบอาจจะทำได้ด้วยการดึงชิ้นงานเพื่อเปิดรอยร้าวขณะที่ทำการเอกซเรย์ [7] ลักษณะการเกิดปัญหาการแตกร้อนที่ชิ้นงานหล่อ (Hot tear) แสดงดังรูปที่



รูปที่ 2.11 ลักษณะการเกิดปัญหาการแตกร้าวร้อนที่ชิ้นงานหล่อ (Hot tear) [1]

2.4.5 น้ำโลหะไหลไม่เต็มแบบ (Misrun)

การไหลของน้ำโลหะไม่เต็มแบบ หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า Misrun ลักษณะทั่วไปของข้อบกพร่องคือชิ้นงานจะไหลไม่สมบูรณ์ ไม่เต็มตามแบบหล่อ โดยเฉพาะส่วนที่ไกลจากรูเท ลักษณะขอบของชิ้นงานจะเป็นขอบโค้งมน เรียบ อาจเกิดได้จากหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น อุณหภูมิการเทน้ำโลหะต่ำเกินไปหรือเทช้าเกินไป การออกแบบระบบทางเดินน้ำไม่ดี [6] ตัวอย่างชิ้นงานเสียประเภทนี้แสดงดังรูปที่ 2.12

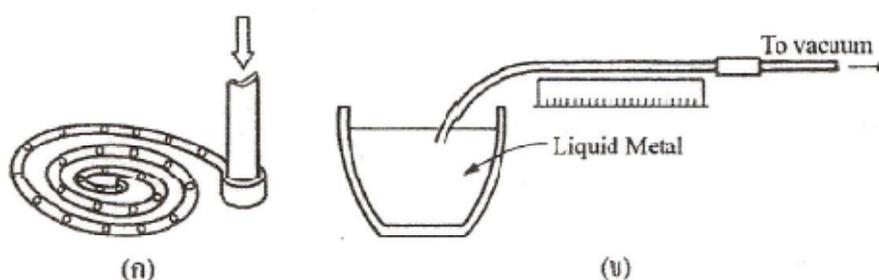


รูปที่ 2.12 ลักษณะของปัญหาและตัวอย่างชิ้นงานที่เกิดปัญหา Misrun [1]

2.5 การไหลตัวของน้ำโลหะ (Fluidity of Molten Metals)

การไหลตัวในงานหล่อโลหะหมายถึง การวัดปริมาณน้ำโลหะในอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งที่น้ำโลหะจะสามารถไหลเต็มโพรงแบบหล่อตามรูปร่างที่ต้องการ การลดอุณหภูมิของน้ำโลหะในขณะที่กำลังไหลในช่องทางไหลไปยังโพรงแบบหล่อจะทำให้เกิดผลึกก้อน โลหะที่มีขนาดเล็กๆ เป็นจำนวนมากพร้อมกับเกิดขวางการไหลตัวของน้ำโลหะ ก้อนผลึกดังกล่าวจะมีผลทำให้โลหะไหลไม่เต็มแบบหล่อที่ต้องการ [10]

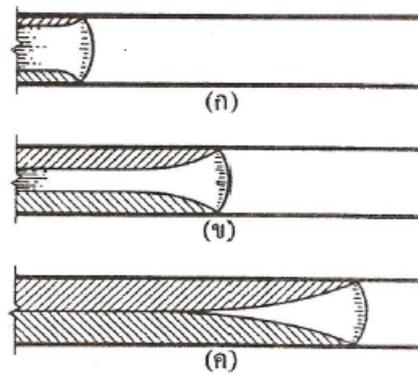
ในการหล่อชิ้นงานที่มีรูปทรงต่างๆ โลหะจะเคลื่อนที่เข้าสู่แบบหล่อผ่านทางประตูทางเข้าถ้า น้ำโลหะไม่สามารถเต็มชิ้นงานหล่อให้เต็มได้ก่อนที่จะมีการแข็งตัว น้ำโลหะนี้ถือว่ามี ความสามารถในการไหลไม่พอ ในทางงานหล่อ การวัดความสามารถในการไหลทำได้หลายวิธี โดยในวิธีเหล่านี้ น้ำโลหะจะไหลในช่องที่มีหน้าตัดเล็กและยาว ระยะทางที่โลหะสามารถไหลไปได้ก่อนที่จะหยุดด้วยการแข็งตัว คือค่าความสามารถในการไหล วิธีการทดสอบการไหลที่ใช้กันทั่วไปมี 2 วิธี คือ การทดสอบโดยใช้แบบหล่อแบบก้นหอยและการทดสอบโดยใช้สุญญากาศ วิธีการทดสอบการไหลแสดงดังรูป 2.13 [7]



รูปที่ 2.13 วิธีทดสอบการไหล (ก) การทดสอบโดยใช้แบบหล่อแบบก้นหอย

(ข) การทดสอบโดยใช้สุญญากาศ [7]

การวิเคราะห์เชิงปริมาณของความสามารถในการไหลทำได้โดยการพิจารณาการไหลและการแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์ที่เทที่อุณหภูมิจุดหลอมเหลว ในขณะที่น้ำโลหะเข้าไปในช่องทางวิ่ง (Runner) การแข็งตัวก็เริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณทางเข้าของช่องทางวิ่ง และเมื่อน้ำโลหะไหลต่อไปในช่องทางวิ่ง การแข็งตัวก็เกิดขึ้นที่บริเวณนั้นด้วย กระบวนการดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.14 [7]



รูปที่ 2.14 การไหลและการแข็งตัวของน้ำโลหะบริสุทธิ์ที่เทที่อุณหภูมิจุดหลอมเหลว [7]

ความสามารถในการไหลขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ 3 กลุ่มดังนี้ [7]

1. ตัวแปรของโลหะ เช่น อุณหภูมิ ความหนืด และค่าความร้อนแฝง
2. ตัวแปรของแบบหล่อและแบบหล่อกับโลหะ เช่น ความต้านทานการเคลื่อนที่ของความร้อนที่รอยต่อระหว่างแบบหล่อกับโลหะ การนำความร้อนของแบบหล่อ ความหนาแน่น และความจุความร้อนจำเพาะ
3. ตัวแปรของการทดลอง เช่น ความสูงของการเทน้ำโลหะ และขนาดของช่องทางวิ่ง

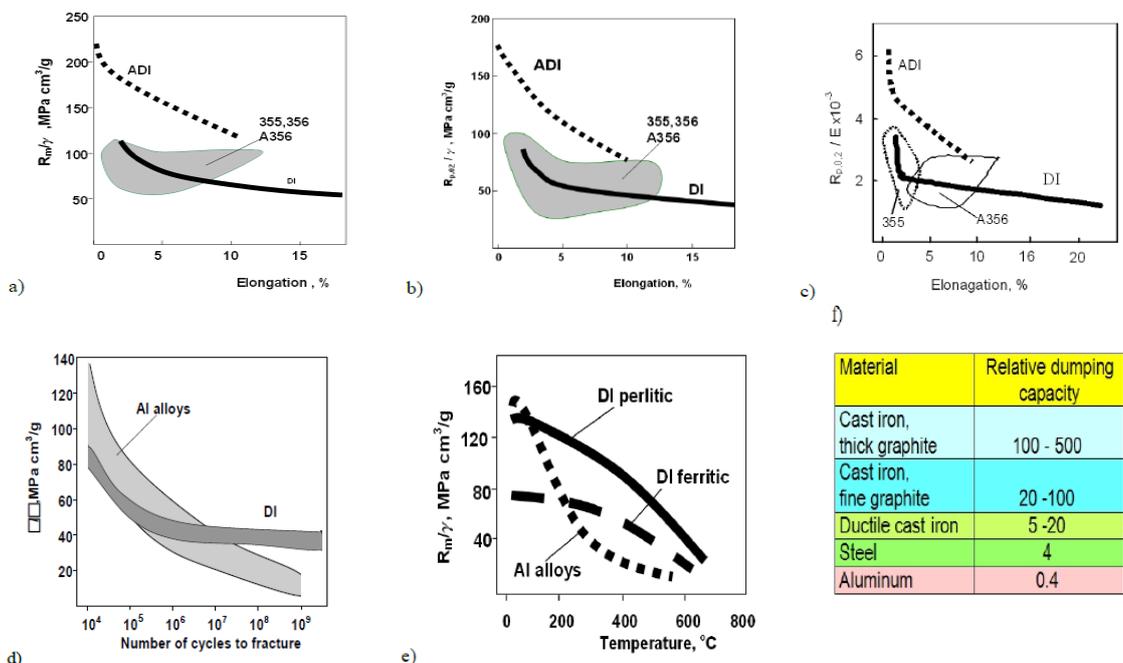
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การหล่อเหล็กหล่อเหนียวผนังบาง

(Thin Wall Ductile Iron Casting)

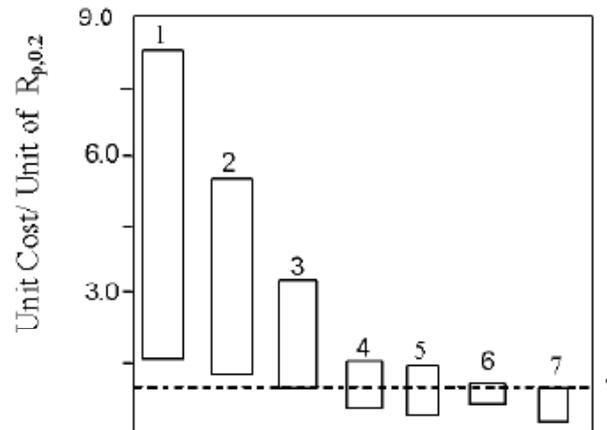
Fras และคณะ [8] กล่าวถึงเหตุผลที่ในปัจจุบันมีแนวโน้มจะแทนที่การหล่อเหล็กหล่อเหนียวด้วยการหล่ออะลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloy) แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงแสดงให้เห็นว่าเหล็กหล่อเหนียวยังคงเหนือกว่าอะลูมิเนียมผสม ในหลากหลายการใช้งาน ซึ่งในรายละเอียดจะกล่าวถึงความเป็นไปได้ที่จะผลิตล้อยอบบางที่ทำจากเหล็กหล่อเหนียวโดยปราศจากการเกิด Chills, Cold laps หรือ Misrun นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าล้อยอบบางที่ทำจากเหล็กหล่อเหนียวนั้นสามารถทำให้มีน้ำหนักเท่ากันและให้สมบัติทางกลที่ดีกว่าการแทนที่ด้วยอะลูมิเนียมผสม

การใช้งานอะลูมิเนียมผสมใน 15 ปีที่ผ่านมา มีปริมาณการใช้สูงขึ้นมากทั้งในอเมริกาและยุโรป ซึ่งส่งผลให้ปริมาณการหล่อเหล็กหล่อเหนียวลดลง งานหล่ออะลูมิเนียมที่มีน้ำหนักเบาเป็นพื้นฐานในการเข้ามาแข่งขันในตลาด ประโยชน์ของการแทนที่งานหล่อเหล็กหล่อเหนียวด้วยอะลูมิเนียมผสมที่มีความหนาแน่นเพียง 0.38 ของเหล็กหล่อเหนียว จะส่งผลให้รถที่ใช้อะลูมิเนียมผสมมีน้ำหนักน้อยกว่าและปริมาณการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่น้อยกว่าด้วย อย่างไรก็ตามการแทนที่เหล็กหล่อเหนียวด้วยอะลูมิเนียมผสมนั้นก็อาจจะส่งผลต่อสมบัติอื่นๆด้วยเช่นกัน การเปรียบเทียบสมบัติต่างๆแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของสมบัติต่างๆเปรียบเทียบระหว่างเหล็กหล่อเหนียวและอะลูมิเนียมผสม [8]

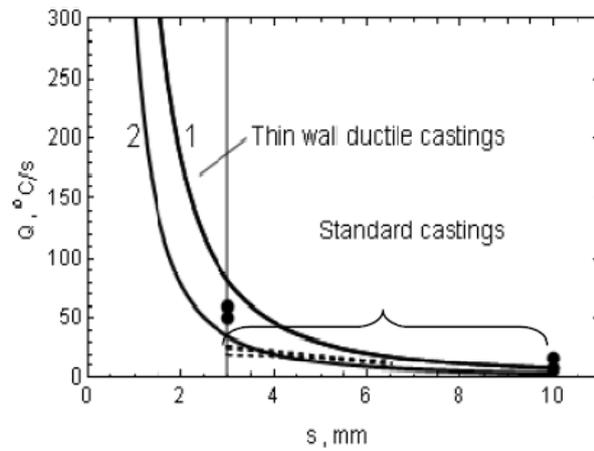
อีกประการหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงก็คือค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการผลิตพบว่า เหล็กหล่อเหนียวมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตต่ำกว่าอะลูมิเนียมผสม ซึ่งแสดงดังกราฟในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานจากวัสดุประเภทต่างๆ (1) Aluminium Alloys casting, (2) Forged aluminium, (3) Cast steel, (4) Forged steel, (5) Heat treated steel, (6) Ductile iron, (7) ADI [8]

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ไม่เสมอไปที่จะแทนที่งานหล่อเหล็กหล่อเหนียวด้วยอะลูมิเนียมผสมด้วยหลากหลายเหตุผล ยกตัวอย่างเช่น ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต สมบัติทางกลที่อุณหภูมิปกติและอุณหภูมิสูง การป้องกันการล้า การใช้พลังงานและอื่นๆ รวมทั้งการป้องกันการกัดกร่อนด้วย

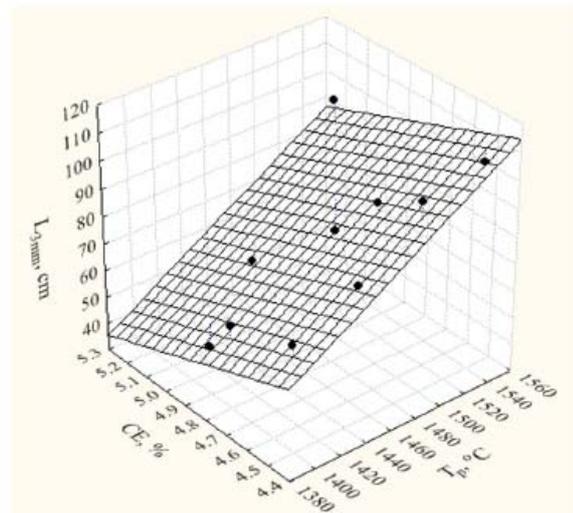
จากการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมานั้นทำให้พบว่า มีความเป็นไปได้ที่จะผลิตเหล็กหล่อเหนียวที่มีน้ำหนักเบาและราคาถูกลง ซึ่งในทางปฏิบัติของการหล่อนั้นมักจะเลือกใช้วิธีการเย็นตัวอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันปัญหาทางานเสียต่างๆ (เช่น Chills, Misrun Casting and Cold Shuts) ด้วยเหตุผลนี้เอง ทำให้มีการกำหนดขนาดความบางน้อยที่สุดของงานผนังอยู่ที่ 3 มิลลิเมตร กราฟแสดงอัตราการเย็นตัวที่สัมพันธ์กับความหนาของงานหล่อแสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 กราฟอัตราการเย็นตัวที่สัมพันธ์กับความหนาของงานหล่อ [8]

พิจารณาที่ความสามารถในการไหล (Fluidity Distance)

อัตราการเย็นตัวสูง (ชิ้นงานบาง) เป็นปัจจัยสำคัญของการไหลเข้าไปในแบบหล่อได้สั้นลง จะส่งผลให้เกิดปัญหา Misrun และ Cold Shuts ในกรณีที่งานหล่อมีความหนาของแบบคงที่ ความสามารถในการไหลตัวจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเทน้ำโลหะและค่า CE (Carbon Equivalent) แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า อุณหภูมิการเท (TP) และค่า CE กับความสามารถในการไหลใน Spiral ที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร

ในส่วนองงานหล่อผนังบาง ทางเข้าน้ำโลหะทางเดียว (Single inlet) พบว่า อุณหภูมิจะลดลงมากในระหว่างเท ซึ่งจะเป็สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและปัญหา Misrun ด้วยเหตุผลนี้จึงนิยมให้เพิ่มทางเข้าน้ำโลหะ (Inlet)

จากงานวิจัยข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า การหลีกเลี่ยงปัญหา Misrun และ Chills ในงานหล่อผนังบาง ทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิเทน้ำโลหะ (Pouring Temperature) และ CE รวมทั้งการเพิ่มจำนวนทางเข้าน้ำโลหะ (Multiple Inlet)

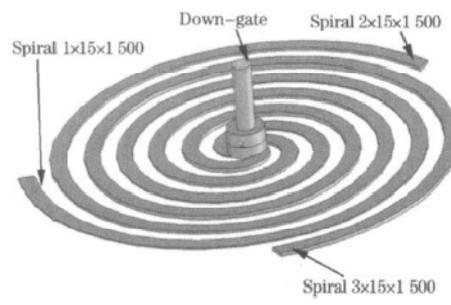
2.6.2 ความสามารถในการไหลตัวและอุณหภูมิของเหล็กหล่อเหนียวในส่วนบาง (Fluidity and Temperature Profile of ductile Iron in Thin Section)

Gorny M. [9] ศึกษาถึงความสามารถในการไหลและอุณหภูมิของเหล็กหล่อเหนียวส่วนบาง และผลกระทบต่อกรแข็งตัวและโครงสร้างจุลภาค ซึ่งจะพิจารณาจากการไหลในวงก้นหอยอาร์คิมิดีส (Archimedes spiral) แสดงดังรูปที่ 2.19 โดยการทดลองจะใช้ Sorelmetal ซึ่งประกอบด้วยซิลิกอนและเศษเหล็ก (Steel Scrap) นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆดังนี้ 1,400°C, 1,450°C, 1,500°C และ 1,550°C แล้วเทลงในแบบหล่อที่ทำจากวัสดุที่แตกต่างกัน 3 แบบ เพื่อทดสอบการถ่ายเทความร้อนของแบบหล่อดังนี้

1. แบบหล่อดั้งเดิม – ทำจากทรายซิลิกา เบนโทไนต์ 7% และน้ำในอัตราส่วน น้ำต่อเบนโทไนต์ ประมาณ 0.4
2. SMS – ทำจากทรายซิลิกา เรซิน 1.3% และตัวกระตุ้น 0.5%
3. LDASC (Low-density alumina-silicate ceramic sand) – ทำจากทราย LDASC เรซิน 5.2% และตัวกระตุ้น 2%

โดยในการทดลองจะมีการลองเปลี่ยนแปลงค่าคาร์บอนสมมูล (CE) และค่าความหนาของผนังงานหล่อที่ 1 มม. 2 มม. และ 3 มม.

จากการทดลองเมื่อพิจารณาที่ความสามารถในการไหล (Fluidity distance) พบว่าอุณหภูมิเทน้ำโลหะมีอิทธิพลต่อความสามารถในการไหลมากกว่าผลจากค่าคาร์บอนสมมูล ซึ่งความสามารถในการไหลของเหล็กหล่อเหนียวนี้ จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเทน้ำโลหะและค่าคาร์บอนสมมูลที่สูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิของน้ำโลหะที่อุณหภูมิเทแตกต่างกัน พบว่าอุณหภูมิของน้ำโลหะจะลดลงเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตามระยะทางที่น้ำโลหะวิ่งเข้าสู่แบบหล่อ ซึ่งอุณหภูมิของน้ำโลหะจะลดลงอย่างมากในระหว่างการป้อนน้ำโลหะสู่แบบหล่อทั้งนี้ขึ้นกับอุณหภูมิเทน้ำโลหะด้วย



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างวงก้นหอยอาร์คิมิดีส (Archimedes spiral) [9]