กระบวนการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมแน็อดีนแบไนต์

โดย

รศ. ดร. ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์
รศ. มนัส สถิรจินดา
รศ. ดร. กิตติ อินทรานนท์
นายเสริมพันธ์ แปลกสิริ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการวิจัย เลขที่ 33G – MT – 2531
ทุนส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์ งบประมาณแผ่นดิน

669.1413
ก217
ฉ.2

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพ ฯ
มีนาคม 2536

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ไม่รับผิดชอบต่อผลเสียใด ๆ อันอาจเกิดจากการนำความคิดเห็นในเอกสารฉบับนี้ไปใช้ ความคิดเห็นที่ปรากฏในเอกสารเป็นความคิดเห็นของผู้เขียนซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นความคิดเห็นของสถาบัน ฯ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระบวนการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์

โดย

รศ.ดร.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์

รศ.มนัส สถิรจินดา

รศ.ดร.กิตติ อินทรานนท์

นายเสริมพันธ์ แปลกสิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการวิจัยเลขที่ 33G-MT-2531

ทุนส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์ งบประมาณแผ่นดิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

มีนาคม 2536

T16343042

บทคัดย่อ

โลหะผสมนิเกิลและโลหะผสมโมลิบดินั่มได้ถูกนำมาเป็นส่วนผสมสำคัญ เพื่อผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ ส่วนผสมโลหะผสมนิเกิลใช้ 5 ส่วนผสม ตั้งแต่ 0.6-4% และโลหะผสมโมลิบดินั่มใช้ 3 ส่วน ตั้งแต่ 0.1-0.6% เหล็กหล่อกราไฟต์กลมที่ผลิตได้ก็จะถูกนำไปชุบแข็งโดยวิธี Austempering ที่อุณหภูมิ 250 °ซ, 300 °ซ และ 350 °ซ หลังจากนั้นจึงนำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกลเพื่อหาความต้านแรงดึง ความทนทานต่อแรงกระแทก และความแข็ง

การศึกษาวิจัยถูกออกแบบ (5 x 3 x 3) และจัดให้มีขึ้นเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ 2 ประการคือ

1. เพื่อวัดคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ที่ผลิตได้

2. เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกล ความเหมาะสมเชิงเทคนิคและต้นทุนการผลิตของเหล็กหล่อและเหล็กกล้าที่ใช้เป็นชิ้นส่วนรถยนต์กับเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ที่ผลิตได้

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการผสมโลหะผสมนิเกิล 1.5% และโลหะผสมโมลิบดินั่ม 0.3% จะให้ค่าความต้านแรงดึงสูงที่สุด และอุณหภูมิในการชุบแข็งโดยวิธี Austempering ที่ให้ค่าความต้านแรงดึงสูงที่สุด คือ 250 °ซ แต่ถ้าต้องการค่าความทนทานต่อแรงกระแทกสูงที่สุดจะต้องทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 350 °ซ

กล่าวโดยสรุปได้ว่าการเติมส่วนผสมของโลหะผสมนิเกิลมากกว่า 3% ขึ้นไป จะทำให้ได้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์โดยไม่ต้องทำการอบชุบ แต่การเติมโลหะผสมโมลิบดินั่มมากกว่า 0.3% จะทำให้ความต้านแรงดึงลดลงได้

จากการศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ พบว่าเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ที่ผลิตได้ สามารถนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนรถยนต์ที่ต้องการความทนทานต่อแรงกระแทกสูง การเสียดสีและการสึกหรอได้เป็นอย่างดี ควรที่จะมีการสนับสนุนการลงทุนและพัฒนาการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ในประเทศไทยเพื่อใช้ทดแทนเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเพิร์ไลท์ เฟอร์ไรท์และเหล็กกล้าชุบแข็ง

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ABSTRACT

Nodular cast iron with bainetic structure was produced by adding Nickel alloy and Molybdinum alloy. The adding process of Ni alloy was varied 5 levels from 0.6-4% while of Mo alloy varied 3 levels from 0.1-0.6%. Test materials were then heat-treated by austempering at 250 °C, 300 °C and 350 °C. Main mechanical properties were tested to determine tensile strength, impact strength and hardness test of the produced nodular cast iron.

The study was designed (5 x 3 x 3) and set up with two objectives : 1) to determine mechanical properties of nodular cast iron with bainetic structure and 2) to compare the mechanical properties, technical feasibility and production cost of cast iron and steel used as automobile parts with the nodular cast iron.

Results showed that the tensile strength was highest if 1.5% of Ni alloy, 0.3% of Mo alloy added and heat-treated at 250 °C. To obtain the highest impact strength, the tested nodular cast iron was heat-treated at 350 °C.

It was concluded that by adding 3% or more of Ni alloy, the bainetic structure could be obtained without the austempering treatment. If 0.3% or more of Mo alloy was added, however, the tensile strength could be reduced.

From the view point of technical and economic feasibility, it was founded that the nodular cast iron with bainetic structure could be used in making automobile parts which were designed to resist high impact, heavy wear and corrosion. It was recommended that investment and development for the production of nodular substitute for grey-cast iron, nodular cast iron with pearlitoferritic structure, and hardened steel.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะกรรมการโครงการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ที่ได้สนับสนุนเงินงบประมาณในการวิจัยครั้งนี้ และขอขอบพระคุณโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ภายในประเทศที่ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับชิ้นส่วนรถยนต์ และคุณสมบัติที่จำเป็นของชิ้นส่วนต่างๆ ทำให้สามารถศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่จำเป็นในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ เหล่านี้ ได้อย่างสมบูรณ์

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยยังขอขอบพระคุณ คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คุณวิชัย สายทอง ช่างหล่อ ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการ นายไชยรัตน์ งามจิตสุขศรี นิสิตภาควิชาวิศวกรรมโลหการ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนช่วยเหลือให้การวิจัยครั้งนี้บรรลุผลสำเร็จตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ ทุกประการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	จ
1. บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 การใช้เหล็กหล่อในอุตสาหกรรมรถยนต์	4
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	7
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
1.5 วิธีการวิจัย	7
1.6 ขอบเขตของการวิจัย	8
1.7 อุปกรณ์ในการวิจัย	8
1.8 คณะผู้วิจัย	8
2. กระบวนการหล่อเหล็กหล่อ	
2.1 วัตถุดิบ	9
2.2 เครื่องจักรอุปกรณ์ที่ใช้	10
2.3 กระบวนการหล่อและชิ้นงานหล่อ	10
2.4 ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานหล่อ	11
3. กระบวนการอบชุบปรับปรุงคุณสมบัติ	
3.1 แผนภูมิสมดุลย์เหล็กหล่อ	13
3.2 แผนภูมิ TTT/CCT	14
3.3 อุปกรณ์ในการอบชุบ	18
3.4 วิธีการอบชุบ	18

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

4. คุณสมบัติของเหล็กหล่อที่ได้จากการทดลอง

4.1 วิธีการทดสอบคุณสมบัติ 19

4.2 โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกล ในสภาพหลังการหล่อเสร็จ 19

4.3 โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 250 °ซ 20

4.4 โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 300 °ซ 21

4.5 โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 350 °ซ 22

4.6 บทวิเคราะห์ผลการทดลอง 23

5. วัสดุเหล็กในอุตสาหกรรมรถยนต์

5.1 ชิ้นส่วนและวัสดุที่ใช้ทำ 32

5.2 การแบ่งแยกหมวดของวัสดุเหล็กที่ทำชิ้นส่วนรถยนต์ 35

5.2.1 เหล็กหล่อ 35

5.2.1.1 เหล็กหล่อเทา 35

5.2.1.2 เหล็หล่อกราไฟต์กลม 36

5.2.2 เหล็กกล้าชุบแข็ง 38

5.2.3 เหล็กกล้าหล่อ 39

5.3 กระบวนการในการทำชิ้นส่วน 40

5.3.1 กระบวนการผลิตเหล็กหล่อ 40

5.3.1.1 กระบวนการผลิตเหล็กหล่อเทา 40

5.3.1.2 กระบวนการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลม 41

5.3.2 กระบวนการผลิตเหล็กกล้าต่างๆ 42

5.3.3 กระบวนการผลิตเหล็กกล้าชุบแข็ง 43

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

6. การวิเคราะห์เชิงเทคนิค

6.1 เปรียบเทียบเชิงคุณสมบัติทางกล 49

6.1.1 เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กหล่อเทา 49

6.1.2 เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กหล่อกราไฟต์กลม (พื้นเฟอร์ไรท์หรือเพิร์ไลท์) 50

6.1.3 เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กกล้าชุบแข็ง 51

6.1.4 เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กกล้าหล่อ 53

6.2 เปรียบเทียบความยากง่ายในการผลิต 54

6.2.1 เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กหล่อต่างๆ 54

6.2.2 เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กหล่อกราไฟต์กลม 55

6.2.3 เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กกล้าหล่อ 55

6.2.4 เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กกล้าชุบแข็ง 55

7. การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

7.1 อายุการใช้งาน 59

7.1.1 การเปรียบเทียบกับเหล็กหล่อเทา 61

7.1.2 การเปรียบเทียบกับเหล็กหล่อกราไฟต์กลม 61

7.1.3 การเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าหล่อ 61

7.1.4 การเปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กกล้าชุบแข็ง 62

7.2 ต้นทุนการผลิต 62

7.2.1 ต้นทุนการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์ 62

7.2.2 ต้นทุนการผลิตเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อกราไฟต์กลม 63

7.2.3 ต้นทุนการผลิตของเหล็กกล้าชุบแข็ง (เพลา, ข้อต่อ, เฟืองต่างๆ) 64

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

7.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบการเลือกใช้วัสดุระหว่างเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์กับเหล็กชนิดอื่นๆ 64

7.3.1 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับเหล็กหล่อเทา 64

7.3.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเพิร์ไลท์และเฟอร์ไรท์ 65

7.3.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กกล้าหล่อ 65

7.3.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กกล้าชุบแข็ง 66

7.4 การลงทุนเพิ่ม สำหรับการผลิตในประเทศ 66

7.5 สรุปผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ 67

8. บทสรุป 70

เอกสารอ้างอิง 73

ภาคผนวก

แบบสอบถาม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	ปริมาณการผลิตภัณฑ์หล่อโลหะ และการใช้งานในรถยนต์ในประเทศญี่ปุ่น (พ.ศ. 2527)	5
ตารางที่ 1.2	แนวโน้มอัตราการใช้วัสดุงานหล่อชนิดต่างๆ ในรถยนต์	6
ตารางที่ 2.1	Chemical composition and Microstructure of specimen (As cast)	12
ตารางที่ 4.1	คุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อ (As cast)	20
ตารางที่ 4.2	โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทำ Austempering อุณหภูมิที่ 250 °ซ	21
ตารางที่ 4.3	โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทำ Austempering อุณหภูมิที่ 300 °ซ	22
ตารางที่ 4.4	โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทำ Austempering อุณหภูมิที่ 350 °ซ	23
ตารางที่ 4.5	ส่วนผสมของ Ni และ Mo ที่ให้ค่าความต้านแรงดึงสูงที่สุด	28
ตารางที่ 4.6	ส่วนผสมของ Ni และ Mo ที่ให้ค่าความต้านแรงกระแทกสูงที่สุด	29
ตารางที่ 4.7	ส่วนผสมของ Ni และ Mo ที่ให้ค่าความแข็งสูงที่สุด	29
ตารางที่ 5.1	ข้อมูลที่ได้รับจากบริษัทประกอบรถยนต์ในประเทศไทย	32
ตารางที่ 5.2	ส่วนประกอบทางเคมีของ FC 25 และ GG 15 CrMoNi	36
ตารางที่ 5.3	ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กหล่อกราไฟต์กลม	38
ตารางที่ 5.4	ส่วนผสมทางเคมีของเกรดเหล็ก	39
ตารางที่ 6.1	คุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์	49
ตารางที่ 6.2	คุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมและเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์	50
ตารางที่ 6.3	คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าชุบแข็งและเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์	52

หน้า

ตารางที่ 6.4 คุณสมบัติของเหล็กกล้าหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ 53

ตารางที่ 6.5 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าหล่อผสมต่ำและเหล็กหล่อกราไฟต์กลม เนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์ 54

ตารางที่ 6.6 การเปรียบเทียบความแตกต่างในการผลิตระหว่างเหล็กกล้าชุบแข็ง และเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ 56

ตารางที่ 7.1 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบอายุการใช้งาน 60

ตารางที่ 7.2 สรุปผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ 68

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 3.1 แผนภูมิสมดุลย์ Fe-C-Si ที่มีซิลิกอน 0-4% 13

รูปที่ 3.2 แผนภูมิ TTT ของเหล็กหล่อกราไฟต์กลม 14

รูปที่ 3.3 แผนภูมิ TTT หรือ I-T ของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมที่มี โมลิบดินั่มผสม 15

รูปที่ 3.4 แผนภูมิ CCT ของเหล็กหล่อเหนียว 3.3% C, 2.3% Si, 0.32% Mn, 2.37% Ni และ 0.50% Mo 16

รูปที่ 3.5 แผนภูมิ CCT สำหรับเหล็กหล่อเหนียว 3.32% C, 2.58% Si 0.35% Mn และ 0.49% Mo 17

รูปที่ 3.6 วิธีการอบชุบ 18

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำ Austempering และความต้านทานแรงดึง 24

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำ Austempering และอัตราส่วนยืด 25

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำ Austempering และความทนทานต่อแรงกระแทก 26

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำ Austempering และความแข็ง 27

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของโลหะผสม Ni และ Mo กับค่าความต้านแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ 31

รูปที่ 5.1 ชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็กหล่อเทา 45

รูปที่ 5.2 ชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็กหล่อกราไฟต์กลม 46

รูปที่ 5.3 ก. ชิ้นส่วนทำจากเหล็กกล้าชุบผิว 47

รูปที่ 5.3 ข. ชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็กกล้าชุบแข็ง 48

รูปที่ 8.1 แนวโน้มการใช้วัสดุประเภทต่างๆ ในอุตสาหกรรมรถยนต์ 72

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อุตสาหกรรมเหล็กหล่อในประเทศไทย เป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสูง เป็นฐานของอุตสาหกรรมหลายประเภท และเป็นอุตสาหกรรมที่เก่าแก่ประเภทหนึ่งของประเทศ เพราะมีอุตสาหกรรมหล่อเหล็กหล่อเกิดขึ้นในประเทศไทยประมาณ 50 ปีมาแล้ว ตั้งแต่เริ่มการหล่อกระทะพูลเลย์และอุปกรณ์โรงสีข้าว จนปัจจุบันมีการหล่อเหล็กหล่อที่เป็นอุปกรณ์โรงงานผลิตน้ำตาลขนาดใหญ่ ตลอดจนชิ้นส่วนจักรกลที่สำคัญมากมาย

จากสถิติมูลค่าการนำเข้าและส่งออกผลิตภัณฑ์เหล็กหล่อในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา (2530-2532) มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปจากอดีตค่อนข้างมาก สถิติการนำเข้าแสดงให้เห็นถึงความต้องการผลิตภัณฑ์บางชนิดที่เพิ่มมากขึ้น และผลิตภัณฑ์บางชนิดมีการส่งออกไปในปริมาณที่มีมูลค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จากสถิติปริมาณการผลิตผลิตภัณฑ์หล่อที่รวบรวมไว้โดยรายงานประจำปีของ Office of Industrial Materials ของญี่ปุ่นสรุปว่า ปริมาณการผลิตผลิตภัณฑ์หล่อเพิ่มขึ้นจาก 120,000 ตันในปี 2530 เป็น 135,000 ตันในปี 2531 และ 540,000 ตันในปี 2532 ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ประมาณ 80-90% เป็นผลิตภัณฑ์เหล็กหล่อ

เหล็กหล่อเป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอน 2.5-4% ซิลิกอน 1.5-2% แมงกานิส 0.5-0.8% ฟอสฟอรัสและกำมะถันประมาณไม่เกิน 0.1% เป็นเหล็กที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำประมาณ 1200°-1300°ซ มีความสามารถในการไหลดีสามารถหล่อให้มีความหนาได้ต่ำสุดประมาณ 3-4 มม. เหล็กหล่อแบ่งออกเป็นหลายประเภทที่สำคัญคือ

1. เหล็กหล่อเทา เป็นเหล็กหล่อที่ใช้งานมากประเภทหนึ่ง มีโครงสร้างประกอบด้วยกราไฟต์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นถูกห่อหุ้มด้วยเนื้อเหล็กที่อาจจะเป็นเฟอร์ไรท์หรือเพิรไลท์ มีความต้านทานแรงดึงต่ำไม่เกิน 35 kg/mm^2 ความเหนียวน้อยแต่ทนแรงอัดได้ดี ดูดซึมแรงสั่นสะเทือนและเสียงได้ดี สภาพการนำความร้อนสูง เหมาะสำหรับทำแท่นเครื่องจักรเครื่องยนต์รองรับแรงสั่นสะเทือน ในประเทศมีโรงงานหล่อเหล็กหล่อเทาประมาณ 450 โรงกระจัดกระจายอยู่ทั่วไป แต่จะหนาแน่นในเขตกรุงเทพ-ธนบุรี

2. เหล็กหล่อเหนียว เป็นเหล็กหล่อที่เริ่มมีการผลิตในประเทศไทยประมาณ 5 ปีมาแล้ว เป็นเหล็กหล่อที่มีความเหนียวทนแรงดึงได้สูงมากกว่า 40 kg/mm^2 กราไฟต์ที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างจะเป็นเม็ดกลม การผลิตต้องอาศัยเทคโนโลยีเข้าช่วยเพื่อให้เกิดกราไฟต์เป็นเม็ดกลม เหล็กหล่อเหนียวถูกใช้งานแทนเหล็กหล่อเทาในกรณีที่มีแรงกระแทกและ

แรงบิดสูงจะไม่เกิดการแตกหัก แต่ราคาเหล็กหล่อเหนียวจะสูงกว่าเหล็กหล่อเทาประมาณ 20-30% ขณะนี้มีโรงงานผลิตเหล็กหล่อเหนียวเพิ่มมากขึ้น และสามารถผลิตได้มาตรฐานส่งออกต่างประเทศ

3. เหล็กหล่ออบเหนียว จัดเป็นเหล็กหล่อที่มีความเหนียวอีกประการหนึ่ง แต่ทนแรงดึงได้มากไม่เกิน 40 kg/mm^2 ภายหลังการหล่อเหล็กจะมีโครงสร้างที่แข็งและเปราะ เพราะธาตุคาร์บอนในเหล็กจะอยู่ในรูปของสารประกอบระหว่างเหล็กกับคาร์บอน (Cementite) ทำให้เหล็กแข็งไม่สามารถใช้งานได้ดี แต่เมื่อผ่านกรรมวิธีอบความร้อนที่อุณหภูมิสูง (900 °-950 °ซ) คาร์บอนจะแตกตัวกลับมาเป็นกลุ่มกราไฟต์โดยมีเนื้อเหล็กที่มีความเหนียวห่อหุ้ม ทำให้เหล็กหล่อมีความเหนียว เหล็กหล่อประเภทนี้จะใช้งานเฉพาะกรณีที่มีความหนาน้อยๆ แต่ต้องการคุณภาพของน้ำเหล็กที่มีการไหลดี (Castability) เช่นงานหล่อข้อต่อท่อน้ำ (Pipe fitting) และชิ้นส่วนจักรกลบางประเภท การใช้งานเหล็กหล่ออบเหนียวไม่กว้างขวางเท่าเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียว

กระบวนการผลิตเหล็กหล่อจะต้องมีองค์ประกอบหลายประการ เริ่มตั้งแต่เมื่อรับงานจะเป็นการรับภาพพิมพ์แบบหรือลักษณะงานตัวจริงจากผู้สั่งทำ จะต้องสร้างแบบกระสวน (Pattern) ด้วยไม้ โลหะหรือพลาสติก โดยเผื่อขนาดเพื่อการหดตัว และเพื่อการตัดแต่ง แยกแบบออกเป็นสองส่วนเพื่อความสะดวกในการทำแบบทราย

เมื่อได้แบบกระสวนที่ถูกต้องแล้วจะส่งไปยังแผนกปั้นแบบทราย เพื่อวางแผนในการทำแบบทรายหล่อโดยวางระบบรูเท (Sprue) ทางวิ่ง (Runner) ทางเข้าแบบ (Gating) และรูลันหรือไรเซอร์ เพื่อชดเชยการหดตัวของน้ำโลหะขณะเปลี่ยนสภาวะจากหลอมเหลวเป็นของแข็ง ทรายแบบที่ใช้จะเป็นทรายที่ทนความร้อนสูงเช่นทรายแก้ว (Silica sand) ผสมตัวประสาน ซึ่งอาจจะเป็นดินเหนียวเบนโทไนท์หรือฟูแรนเรซินแล้วแต่ชนิดและเทคนิคของแต่ละโรงงาน การปั้นแบบทรายจะมีทั้งการใช้แรงงานปั้น (Hand mold) หรือใช้เครื่องจักรเข้าช่วย (Machine molding) ขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงาน ถ้าเป็นงาน Job ส่วนใหญ่จะใช้แรงงาน ถ้าเป็นลักษณะ Mass production จะใช้อุปกรณ์หรือเครื่องเข้าช่วย เพื่อปริมาณและคุณภาพของแบบทราย

แผนกหล่อหลอมเหล็กจะทำหน้าที่ผลิตน้ำเหล็กตามส่วนผสมที่กำหนด โดยใช้เตาหลอมหลายประเภทที่นิยมใช้สำหรับเหล็กหล่อเทาจะใช้เตาพ่นลม (Cupola) โดยอาศัยถ่านโค้กเป็นพลังงานให้ความร้อน สำหรับเหล็กหล่อเหนียวและเหล็กหล่ออบเหนียวจะใช้เตาหลอมไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำ (Induction furnace) เพราะทำให้การควบคุมทั้งส่วนผสมทางเคมี และอุณหภูมิของน้ำเหล็กได้ดีกว่าเตาพ่นลมซึ่งปัจจุบันมีหลายโรงงานใช้เตาประเภทนี้อยู่ มีบางแห่งยังคงใช้

เตาพ่นลมผลิตเหล็กหล่อเหนียวและเหล็กหล่อออบเหนียวอยู่ และสามารถทำการผลิตเหล็กหล่อได้คุณภาพตามมาตรฐาน แต่ต้องอาศัยวัตถุดิบที่จะนำมาหลอมมีคุณภาพสม่ำเสมอ เมื่อหลอมเหล็กหล่อจนละลายตามอุณหภูมิที่กำหนดได้แล้วจะถ่ายจากเตาใส่เบ้านำมาเทลงแบบหล่อ ปล่อยให้เหล็กหล่อเย็นตัวในแบบทรายจนมีความแข็งแรงและคงตัวดีแล้วจะนำทั้งหีบแบบและเหล็กหล่อที่แข็งตัวแล้วไปรื้อเอาแบบเหล็กหล่อออก การรื้ออาจใช้แรงงานหรือเครื่องจักร (Vibrator) เข้าช่วยขึ้นอยู่กับขนาดและเทคโนโลยีของโรงงาน เมื่อได้ชิ้นงานหล่อแล้วจะทำการตัดรูเทและรูลันออกทำการตกแต่งรอยตัดให้เรียบก่อนส่งมอบให้ลูกค้าจะต้องทำการตรวจสอบคุณภาพขั้นสุดท้าย เพื่อคัดเอาชิ้นงานหล่อที่มีตำหนิออกนำไปแก้ไขหรือซ่อมแซมเพื่อให้ได้คุณภาพต่อไป

ในปัจจุบันตลาดของผลิตภัณฑ์เหล็กหล่อได้แก่ อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเฟืองจักรกลพื้นฐาน เครื่องจักรกลการเกษตร รถยนต์และรถจักรยานยนต์ เริ่มขยายตัวเร็วขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งนโยบายของรัฐบาลได้ส่งเสริมและบังคับให้มีการใช้ชิ้นส่วนรถยนต์และรถจักรยานยนต์ที่ผลิตขึ้นภายในประเทศเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงมาก ถึง 45-50% ขึ้นไป ดังนั้นความจำเป็นในการใช้ชิ้นส่วนโลหะประเภทเหล็กหล่อ และเหล็กกล้าคุณภาพสูงจึงมีมากขึ้น

เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเป็นเหล็กหล่อที่มีคุณภาพสูง มีคุณสมบัติทางกลดีมาก สามารถใช้แทนเหล็กกล้าในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ในอุตสาหกรรมรถยนต์ได้เป็นจำนวนมาก ในราคาต้นทุนที่ต่ำกว่า ข้อดีที่เหนือกว่าเหล็กกล้าอีกประการหนึ่งคือ สามารถหล่อหลอมชิ้นรูปชิ้นงานที่ซับซ้อนได้ดีกว่า ประเทศที่พัฒนาแล้วทั้งสหรัฐอเมริกา ยุโรปและญี่ปุ่น จึงมีการค้นคว้าและวิจัยทางด้านกระบวนการผลิต และการทดสอบคุณสมบัติของเหล็กหล่อกันมากในระยะ 10 ปีที่ผ่านมานี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ เป็นเหล็กหล่อที่มีความแข็งแรงทนทานสูง อัตราการยืดตัวพอเหมาะกับการประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้มาก แนวโน้มการค้นคว้าวิจัยดังกล่าวก้าวหน้าไปถึงขั้นประยุกต์ใช้กับการเก็บสารเคมี ซึ่งเป็นของเสียจากเตาปฏิกรณ์ปรมาณูและอุปกรณ์นิวเคลียร์ต่างๆ

คณะผู้วิจัยเล็งเห็นว่า ปัจจุบันประเทศไทยยังขาดการค้นคว้า และพัฒนาทางด้านกระบวนการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ดังกล่าว จึงมีความประสงค์ที่จะดำเนินการวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตที่เหมาะสมสำหรับเหล็กหล่อชนิดนี้ให้ประสบผลสำเร็จ สามารถเผยแพร่เป็นประโยชน์ต่อวงการอุตสาหกรรมผลิตเหล็กหล่อในประเทศได้

1.2 การใช้เหล็กหล่อในอุตสาหกรรมรถยนต์

สถิติปริมาณการใช้เหล็กหล่อในอุตสาหกรรมรถยนต์ในประเทศไทย ยังมิได้มีการรวบรวมไว้อย่างเป็นทางการ ในที่นี้จึงจะยกเอาข้อมูลของการใช้เหล็กหล่อในอุตสากรรมรถยนต์ในประเทศญี่ปุ่นในปีพ.ศ. 2527 ซึ่งแล้วประมาณการการใช้เหล็กหล่อในรถยนต์ในประเทศไทย เนื่องจากรถยนต์ที่ผลิตจากบริษัทญี่ปุ่นมีปริมาณสูงกว่า 80% ในประเทศไทย ซึ่งกล่าวได้ว่าการประมาณการนี้สามารถนำมาพิจารณาเป็นข้อมูลประกอบในการดำเนินการวิจัยได้ต่อไป

ตารางที่ 1 แสดงสถิติปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์ จากงานหล่อโลหะในอุตสาหกรรมรถยนต์ในประเทศญี่ปุ่นปีพ.ศ. 2527 ซึ่งเป็นข้อมูลล่าสุดที่รวบรวมไว้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัดส่วนการใช้ผลิตภัณฑ์หล่อโลหะในรถยนต์คิดเป็น 40% ของปริมาณผลิตภัณฑ์หล่อโลหะทั้งหมดของประเทศ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการผลิตภัณฑ์หล่อโลหะ และการใช้งานในรถยนต์ในประเทศญี่ปุ่น (พ.ศ.2527)

	วัสดุ	ปริมาณการผลิตโลหะหล่อ (ตัน/ปี)	ใช้ในรถยนต์ (ตัน/ปี)	สัดส่วน %
ประเภทเหล็ก	เหล็กหล่อเทา	3,397,065	1,538,646	45.3
	เหล็กหล่อเหนียว	887,901	519,122	58.5
	เหล็กหล่ออบเหนียว	298,356	108,268	36.3
	เหล็กกล้าหล่อ	545,574	28,659	5.3
นอกกลุ่มเหล็ก	อลูมิเนียมหล่อพิมพ์โลหะ	285,362	235,859	82.7
	อลูมิเนียมไดคาสท์	439,588	281,150	64.0
	สังกะสีไดคาสท์	55,372	25,393	45.9
	ทองแดงผสม	99,001	1,858	1.9
	ผลิตภัณฑ์หล่อความเที่ยงตรงสูง	7,688	2,309	30.0
	อื่นๆ	818,301	-	-
	รวม	6,834,208	2,741,291	40.1

ตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนการใช้วัสดุประเภทต่างๆ ต่อน้ำหนักรถยนต์ทั้งหมด ซึ่งจะเห็นได้ว่า เหล็กหล่อ อลูมิเนียม และโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากงานหล่อจะมีสัดส่วนประมาณ 15-19% ของน้ำหนักรถยนต์ทั้งคัน ถ้าคิดเฉลี่ยว่ารถยนต์แต่ละคันน้ำหนักประมาณ 1,200 กิโลกรัมแล้ว น้ำหนักงานหล่อที่ใช้ในรถยนต์จะอยู่ระหว่าง 180-228 กิโลกรัมต่อคัน

ตารางที่ 1.2 แนวโน้มอัตราการใช้วัสดุงานหล่อชนิดต่างๆ ในรถยนต์

วัสดุที่ใช้	อัตราการใช้			
	พ.ศ.2511	พ.ศ.2521	พ.ศ.2523	พ.ศ.2527
เหล็กกล้าแผ่น	46.9	45.7	44.6	46.6
เหล็กกล้าอื่นๆ	14.3	16.0	16.0	20.6
เหล็กหล่อ	13.8	10.8	10.8	9.8
อลูมิเนียม	3.0	4.2	2.6	4.4
โลหะนอกกลุ่มเหล็กอื่นๆ	3.0	2.6	4.5	2.3
พลาสติก	3.6	5.0	6.1	6.8
ยาง	5.0	5.3	5.3	4.2
แก้ว/กระจก	3.0	2.7	2.7	3.0
อื่นๆ	7.4	7.7	7.4	2.3
รวม	100	100	100	100
น้ำหนักรถ (กก.)	1,020	1,122	1,090	1,242

จากข้อมูลของบริษัทผู้จำหน่ายรถยนต์ในประเทศไทย และสำนักงานคณะกรรมการจัดการจราจร กรุงเทพฯ (สจร.) ปี พ.ศ. 2535 ประมาณกันว่าปริมาณความต้องการรถยนต์ในประเทศไทยอยู่ในอัตรา 300 คันต่อวัน หรือประมาณ 70,000 คันต่อปี ดังนั้นสามารถประมาณการน้ำหนักของผลิตภัณฑ์หล่อโลหะเฉพาะที่ใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ได้ว่า ประมาณ 12,600 ตัน ถึง 15,960 ตันต่อปีเฉพาะรถยนต์นั่ง ผลิตภัณฑ์ที่เป็นชิ้นส่วนที่จะใช้ในรถยนต์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีคุณภาพสูงเมื่อพิจารณาเฉพาะเหล็กหล่อ พบว่ามีปริมาณความต้องการประมาณ 10% ของน้ำหนักรถทั้งหมด ดังนั้นปริมาณความต้องการเหล็กหล่อในอุตสาหกรรมรถยนต์จะประมาณ 8,400 ตันต่อปี ในขณะที่เหล็กกล้าอื่นๆ ซึ่งใช้ทำเป็นชิ้นส่วนจะอยู่ประมาณ 20% ของน้ำหนักรถทั้งหมดหรือประมาณ 16,800 ตันต่อปี ถ้าสามารถนำเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์มาทดแทนได้ ก็จะลดต้นทุนการผลิตลงไปได้มาก

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ที่มีคุณภาพสูง เพื่อเผยแพร่ต่อวงการอุตสาหกรรมผลิตเหล็กหล่อในประเทศไทย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบกรรมวิธีในการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ ที่สามารถใช้เทคโนโลยีที่มีอยู่ภายในประเทศ

2. สามารถเผยแพร่กรรมวิธีการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ แก่โรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการผลิตเหล็กหล่อ

3. ได้วัสดุชนิดใหม่ที่สามารถทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล รถยนต์และรถจักรยานยนต์ อันเป็นประโยชน์ในการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ

4. เพิ่มพูนศักยภาพในงานวิจัยและพัฒนาด้านโลหกรรมของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และของประเทศขึ้น

1.5 วิธีการวิจัย

1. สำรวจความต้องการเชิงปริมาณ และคุณภาพของวัสดุที่ใช้ในการทำชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล รถยนต์และรถจักรยานยนต์ ที่สามารถใช้เหล็หล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ทดแทนได้ รวมทั้งราคาของวัสดุดังกล่าว เพื่อการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

2. ทดลองผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ เพื่อหาส่วนผสมของโลหะเจือที่เหมาะสมที่จะให้คุณสมบัติของเหล็กหล่อดังกล่าวที่สอดคล้องกับการใช้งาน

3. ทดลองใช้กระบวนการอบความร้อน เพื่อหาช่วงอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กหล่อดังกล่าว

4. ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลที่จำเป็นในการใช้งาน ได้แก่ความต้านแรงดึง อัตราการยืดตัว ความแข็ง และความทนทานต่อแรงกระแทก

5. สรุปกระบวนการผลิตที่เหมาะสม ส่วนผสมและวิธีการอบความร้อน เพื่อทำการเผยแพร่แก่อุตสาหกรรม

1.6 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทดลองผสมโลหะผสมประเภท Ni 5 ระดับ และ Mo 3 ระดับ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกล

2. ทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการอบชุบ 3 ระดับ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกล

3. ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลที่สำคัญ 3 ประการคือ ความต้านแรงดึง ความแข็ง และความทนทานต่อแรงกระแทก

โดยมีระยะเวลาดำเนินการวิจัย 1 ปี

1.7 อุปกรณ์ในการวิจัย

อุปกรณ์ที่จำเป็นและมีอยู่ ณ สถานที่ที่จะทำการวิจัย

1. เตาหลอมโลหะแบบกระแสเหนี่ยวนำ
2. เตาอบชุบโลหะ
3. เครื่องทดสอบความต้านแรงดึง
4. เครื่องทดสอบความแข็ง
5. เครื่องทดสอบแรงกระแทก
6. คอมพิวเตอร์ เพื่อใช้วิเคราะห์ข้อมูล

1.8 คณะผู้วิจัย

1. รศ.ดร.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์	หัวหน้าโครงการ
2. รศ.มนัส สถิรจินดา	นักวิจัย
3. รศ.ดร.กิตติ อินทรานนท์	นักวิจัย
4. นายเสริมพันธ์ แปลกสิริ	ผู้ช่วยวิจัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

กระบวนการหล่อเหล็กหล่อ

2.1 วัตถุดิบ

เหล็กหล่อกราไฟต์กลมมีขั้นตอนในการผลิตที่สำคัญคือ การผสมเหล็กหลอมเหลวกับโลหะผสมแมกนิเซียม-ซีเรียมหรือแรเอิธ เพื่อการฟอร์มกราไฟต์ให้เป็นเม็ดกลม วัตถุดิบในที่นี้จะหมายถึงเหล็กดิบ (Pig iron) เป็นส่วนใหญ่จะต้องมีปริมาณกำมะถันต่ำ เพราะแมกนิเซียมจะรวมกับกำมะถันได้ดีกลายเป็นแมกนิเซียมซัลไฟต์ (MgS) ถ้าในเหล็กดิบมีปริมาณกำมะถันสูงจำเป็นต้องใช้โลหะผสมแมกนิเซียม-ซีเรียมปริมาณสูงเช่นกัน

สำหรับธาตุอีกชนิดหนึ่งที่จะต้องพิจารณาคือ ฟอสฟอรัส ซึ่งจะรวมตัวกับเหล็กให้เหล็กฟอสไฟต์ เป็นส่วนหนึ่งที่มีผลทำให้ความเหนียวของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมลดลง เหล็กดิบที่ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมไม่ควรมีฟอสฟอรัสเกิน 0.1% และที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือวัตถุดิบไม่ว่าจะเป็นเหล็กดิบ หรือเศษเหล็กเหนียวจะต้องไม่มีธาตุที่มีผลต่อต้านบทบาทของแมกนิเซียม ดังเช่นไทเทเนียม อาร์เซนิก และตะกั่ว เป็นต้น

การควบคุมโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กหล่อในสภานภายหลังการหล่อ ถ้าต้องการใช้เป็นเฟอร์ไรท์ เหล็กดิบที่นำมาใช้จะต้องมีแมงกานีสต่ำไม่เกิน 0.2% แต่ในกรณีของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ ไม่จำเป็นต้องใช้เหล็กดิบที่มีปริมาณแมงกานีสต่ำ

สารน้อดดูแลนท์ (Nodulant) ที่ใช้ในการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมทั่วๆ ไปจะใช้โลหะผสมเฟอร์โร-ซิลิโก-แมกนิเซียม ที่มีปริมาณแมกนิเซียม 5-7% นอกจากนี้จะมีซีเรียมไม่เกิน 1% ซิลิกอน 40-50% และที่เหลือเป็นเหล็ก ปริมาณที่ใช้สารน้อดดูแลนท์ (Nodulant) ทำให้กราไฟต์กลมอยู่ระหว่าง 2-3% โดยน้ำหนัก

สารอินอคคูแลนท์ (Inoculant) ที่ใช้นั้น เนื่องผลทางด้านความสม่ำเสมอและขนาดของเม็ดกราไฟต์จะใช้ เฟอร์โร-ซิลิกอน (40-50%) โดยใช้ในอัตรา 0.1-0.4% โดยน้ำหนัก

ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กดิบที่ใช้มีส่วนผสมดังนี้

C	3.6-4%
Si	-
Mn	0.002%
P	0.02-0.03%
S	0.01%

น้อดดูแลนท์ มีส่วนผสม

Si	44-48%
Mg	5.5-6.5%
Ca	0.2-0.6%
Rare Earth	0.4-0.8%
Al	1.2% max

อินอคคูแลนท์ :-

Si	78 + 2%
Cr	0.8 + .2%
Ca	0.1 max
Al	0.5 max

2.2 เครื่องจักรอุปกรณ์ที่ใช้

การหลอมเหล็กหล่อ กระทำในเตาหลอมไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำ ขนาดความจุ 50 กก. ยี่ห้อ Pillar กำลัง 47 kw, 1000 Hz โดยหลอมเหล็กสำหรับการทดลองครั้งละ 20 กก. ที่อุณหภูมิ 1450°-1500°ซ

เมื่อเหล็กหลอมละลายจะทำการตรวจสอบปริมาณคาร์บอนและซิลิกอน ด้วยเครื่องตรวจวัด Carbon equivalent (C.E. METER) ของบริษัท Northrop

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับผสมสารน้อดดูแลนท์ใช้วิธี Plunger method

อุปกรณ์เก็บตัวอย่างเหล็กหล่อเพื่อนำไปวิเคราะห์หาส่วนผสมทั้งหมดด้วยเครื่อง Emission Spectro-analyser

2.3 กระบวนการหล่อและชิ้นงานหล่อ

หล่อเหล็กดิบ (Pig iron) ผสมเศษเหล็กเหนียวให้มีปริมาณคาร์บอน และซิลิกอน อยู่ในกรอบที่ต้องการ (C 3.6-3.8%, Si 1.4-1.6%) ในการทดลองจะผสมนิเกิล (Ni) และโมลิบดินั่ม (Mo) ตามปริมาณที่ต้องการเพื่อศึกษาผลของนิเกิลและโมลิบดินั่มที่มีต่อโครงสร้างพื้นฐานของเหล็ก

เมื่อเหล็กหล่อหลอมละลายจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดจะทำการวัดปริมาณคาร์บอน และซิลิกอนด้วยเครื่องวัด C.E. จะทำการปรับส่วนผสมในขณะนี้โดยการเติมคาร์บอนและซิลิกอน หรืออาจจะลดปริมาณคาร์บอนและซิลิกอน โดยใช้เศษเหล็กเหนียวผสมลงไปในเหล็กหลอมละลาย ทำการเก็บตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ส่วนผสมจำนวน 2 ตัวอย่าง

ทำการผสมสารน้อคดูแลนท์ โดยใช้ Plunger ที่ทำด้วยกราไฟต์ต่อด้ามเพื่อกดให้สารน้อดดูแลนท์จมลงใต้ผิวของเหล็กหลอมเหลว เมื่อสารน้อดดูแลนท์ละลายหมด ผสมสารอินอคคูแลนท์และใช้แท่งเหล็กใส่ให้สารอินอดคูแลนท์ละลายในน้ำเหล็กอย่างสม่ำเสมอ ทำการเก็บตัวอย่างเหล็กอีก 2 ตัวอย่าง เพื่อทำการวิเคราะห์ส่วนผสม

นำเหล็กหลอมละลายไปเทลงในแบบหล่อที่ปั้นด้วยทรายผสมเบนโทไนท์ (Green Sand) โดยแบบหล่อจะทำเป็นรูปทรง keel block เพื่อใช้สำหรับทดสอบความเค้นแรงดึง ตรวจสอบจุลโครงสร้าง และทำการอบชุบความร้อนต่อไป

2.4 ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานหล่อ

ชิ้นงานหล่อมีทั้งหมด 60 ชิ้น ส่วนผสมทางเคมีดังปรากฏในตารางที่ 2.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 Chemical composition and Microstructure of specimen (As cast)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Mg	Nodularity (%)	Pearlite content (%)	Microstructure as cast
A1	3.888	2.372	<0.18	0.022	0.008	0.605	0.121	0.045	78	57	F + P
A2	3.867	2.248	<0.18	0.020	0.009	1.046	0.121	0.053	90	43	F + P
A3	3.776	2.439	0.037	0.021	0.007	1.920	0.108	0.050	82	54	F + P
A4	3.845	2.440	0.033	0.022	0.007	2.834	0.108	0.068	70	40	F + P
A5	3.924	2.514	0.029	0.020	0.009	4.535	0.098	0.080	89	-	B
B1	3.951	2.773	<0.18	0.021	0.006	0.806	0.301	0.048	78	23	F + P
B2	3.849	2.505	<0.18	0.021	0.006	1.111	0.320	0.019	79	40	F + P
B3	3.732	2.852	<0.18	0.022	0.008	1.841	0.319	0.059	92	23	F + P
B4	4.212	2.494	<0.18	0.022	0.010	2.700	0.296	0.100	77	46	F + P
B5	3.880	2.484	<0.18	0.022	0.013	4.105	0.260	0.099	92	-	B
C1	3.890	2.643	<0.18	0.022	0.008	0.654	0.644	0.062	79	31	F + P
C2	4.047	2.588	<0.18	0.052	0.012	1.080	0.640	0.076	84	29	F + P
C3	3.802	2.624	<0.18	0.034	0.007	1.827	0.591	0.077	88	40	F + P
C4	3.808	2.679	<0.18	0.034	0.007	2.732	0.597	0.060	93	40	F + P
C5	3.421	2.789	<0.18	0.033	0.014	3.966	0.623	0.068	88	-	B

หมายเหตุ A1-A5 = ชิ้นงานที่มี Mo ผสมประมาณ 0.1%

B1-B5 = ชิ้นงานที่มี Mo ผสมประมาณ 0.3%

C1-C5 = ชิ้นงานที่มี Mo ผสมประมาณ 0.6%

Nodularity = ความกลมของเม็ดกราไฟต์

F = เฟอร์ไรท์

P = เพิรไลท์

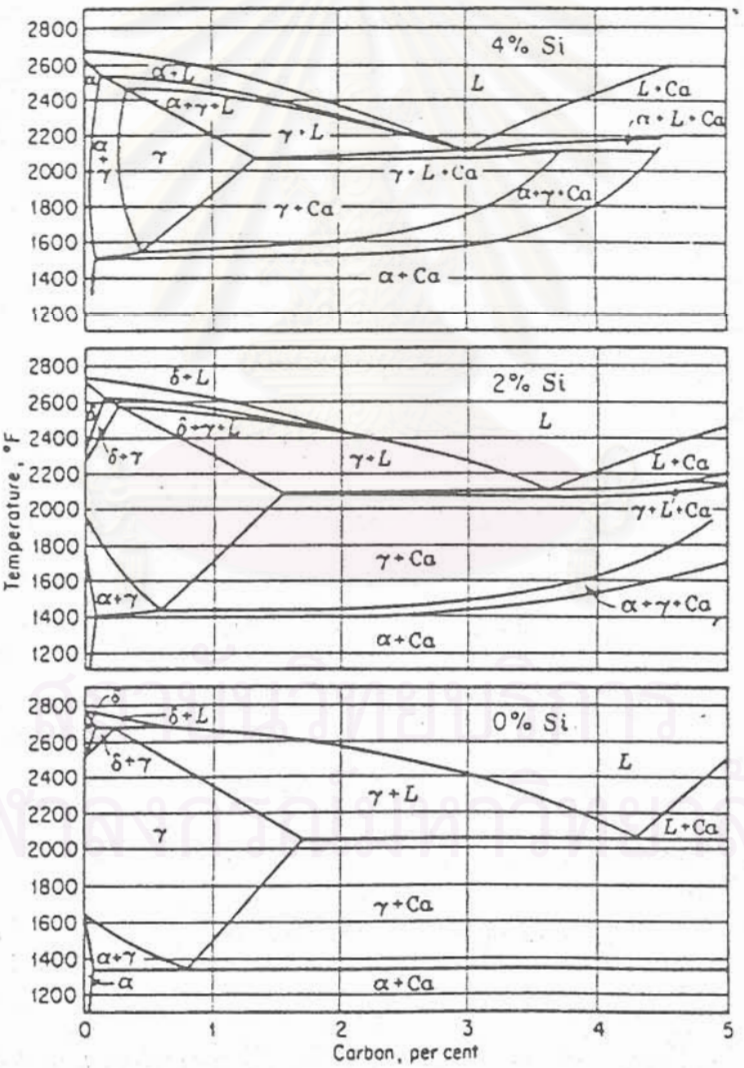
B = เบไนต์

บทที่ 3

กระบวนการอบชุบปรับปรุงคุณสมบัติ

3.1 แผนภูมิสมดุลย์เหล็กหล่อ

เหล็กหล่อกราไฟต์กลมจะประกอบด้วยโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นเฟอร์ไรท์ เพิร์ไลท์หรือเบไนต์กับผลึกของกราไฟต์ที่เป็นเม็ดกลม ดังนั้นแผนภูมิสมดุลย์ของเหล็กกับคาร์บอนจึงเป็นระบบ stable คือเหล็กกับกราไฟต์ แต่เหล็กหล่อกราไฟต์กลมจะมีซิลิกอนผสมอยู่ในปริมาณสูง (Si 2-2.5%) จึงทำให้ลักษณะของแผนภูมิสมดุลย์เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของซิลิกอน จากเอกสารอ้างอิงจะปรากฏแผนภูมิสมดุลย์ของเหล็กกราไฟต์ที่มีซิลิกอน 0.4% เท่านั้น (ดังรูปที่ 3.1)

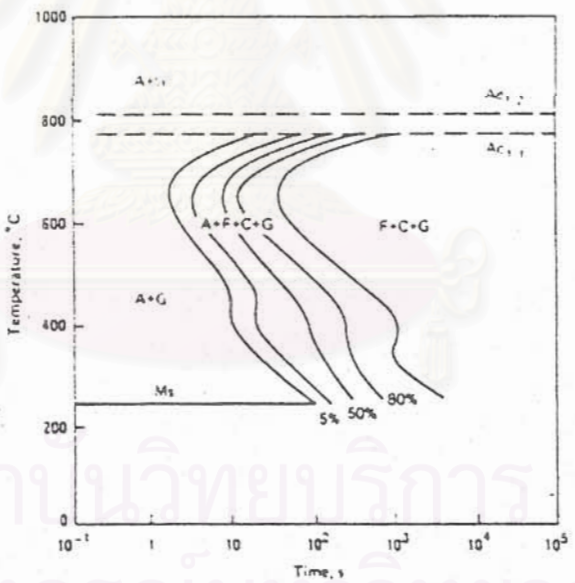


รูปที่ 3.1 แผนภูมิสมดุลย์ Fe-C-Si ที่มีซิลิกอน 0-4%

จากแผนภูมิจะพบว่าอาณาเขตของออสเตไนต์จะแคบลง และจุดยูเต็คติคจะถูกทำให้สูงขึ้น นอกจากนี้ปริมาณคาร์บอนที่จุดยูเต็คติคจะลดลง

3.2 แผนภูมิ TTT/CCT

เหล็กหล่อกราไฟต์กลม มีหลายชั้นคุณภาพทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งจะเกี่ยวพันไปถึงบทบาทของธาตุผสมด้วย แผนภูมิ TTT ของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมที่ปรากฏจากเอกสารอ้างอิงที่พอจะนำมาแสดงได้นั้นจะเป็นแผนภูมิ TTT ของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมที่มีโครงสร้างเป็นเพิร์ลิติคจะปรากฏลักษณะของแผนภูมิอยู่ห่างจากแกนตั้งหรือแกนแสดงอุณหภูมิมากพอสมควร ที่เป็นดังนี้เพราะเหล็กหล่อมีคุณสมบัติความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) อยู่ในเกณฑ์สูง ดังรูปที่ 3.2

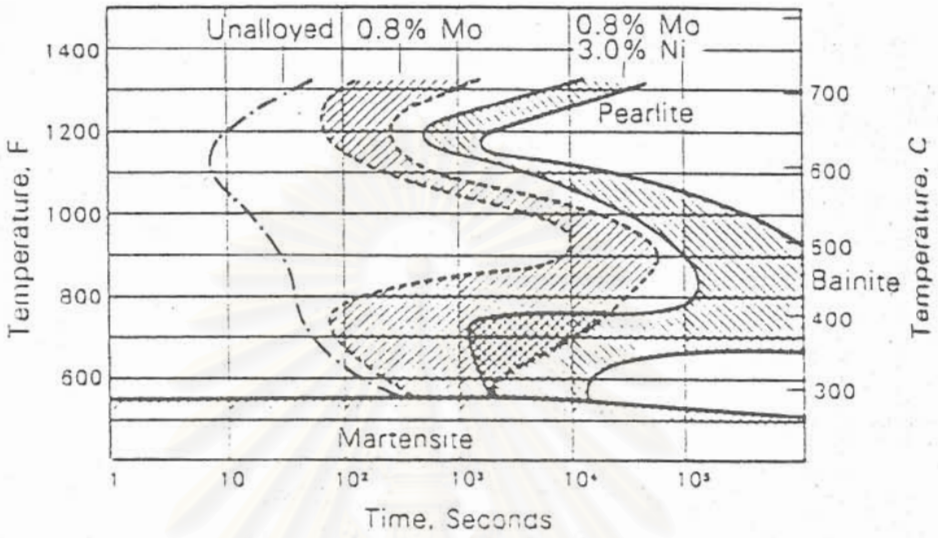


A, austenite; G, graphite nodules; F, ferrite; C, carbides

รูปที่ 3.2 แผนภูมิ TTT ของเหล็กหล่อกราไฟต์กลม

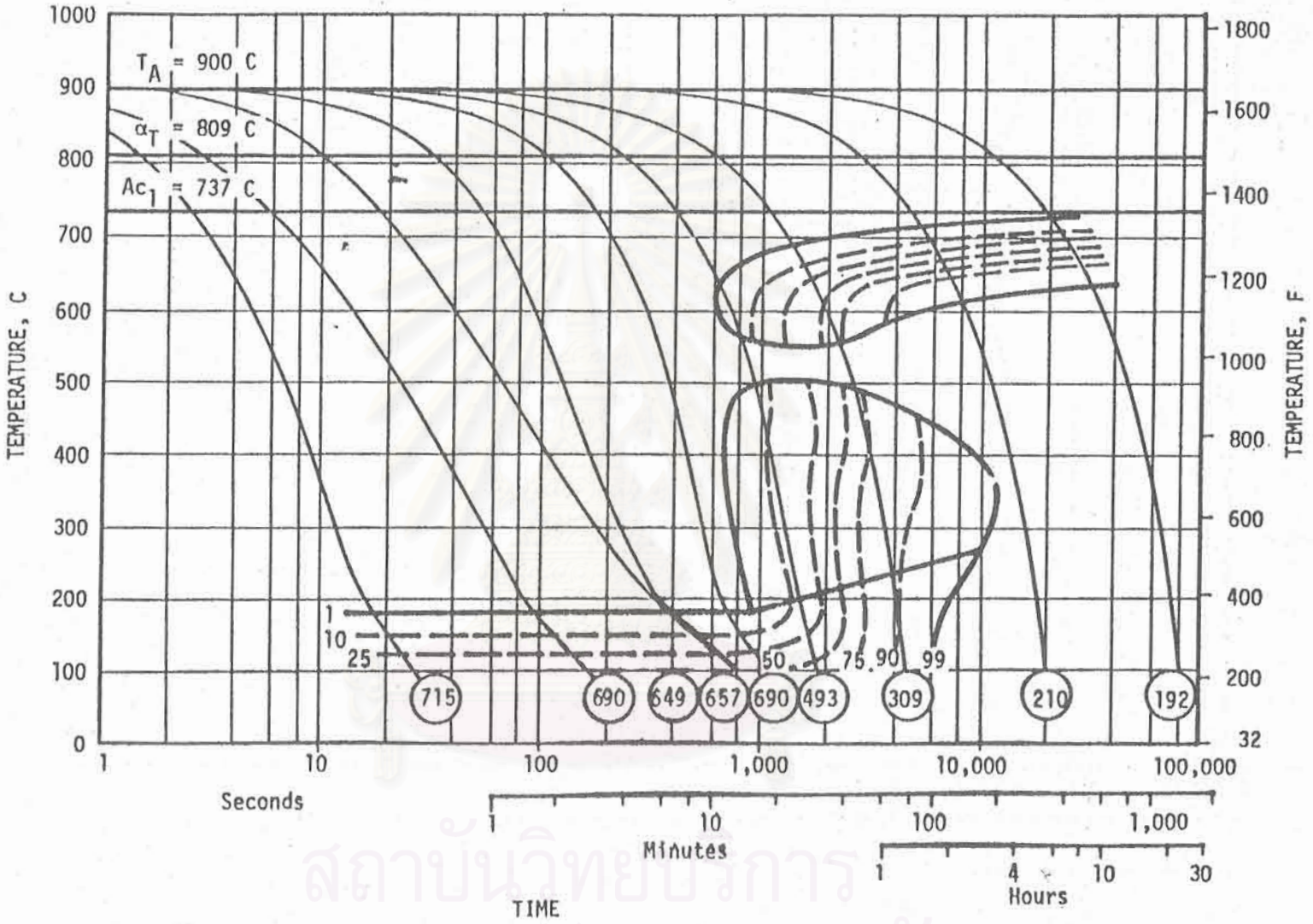
สำหรับเหล็กหล่อกราไฟต์กลมที่มีโมลิบดินั่มผสม (0.8%) หรือโมลิบดินั่มและนิกเกิลผสม ลักษณะของแผนภูมิ TTT หรือ I-T diagram จะมีลักษณะของเส้นกราฟ S ซึ่งจะอยู่ห่างจากแกนอุณหภูมิมากกว่าเหล็กหล่อกราไฟต์กลมที่ไม่มีธาตุผสมอีก แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติความสามารถใน

การชุบแข็งที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 3.3

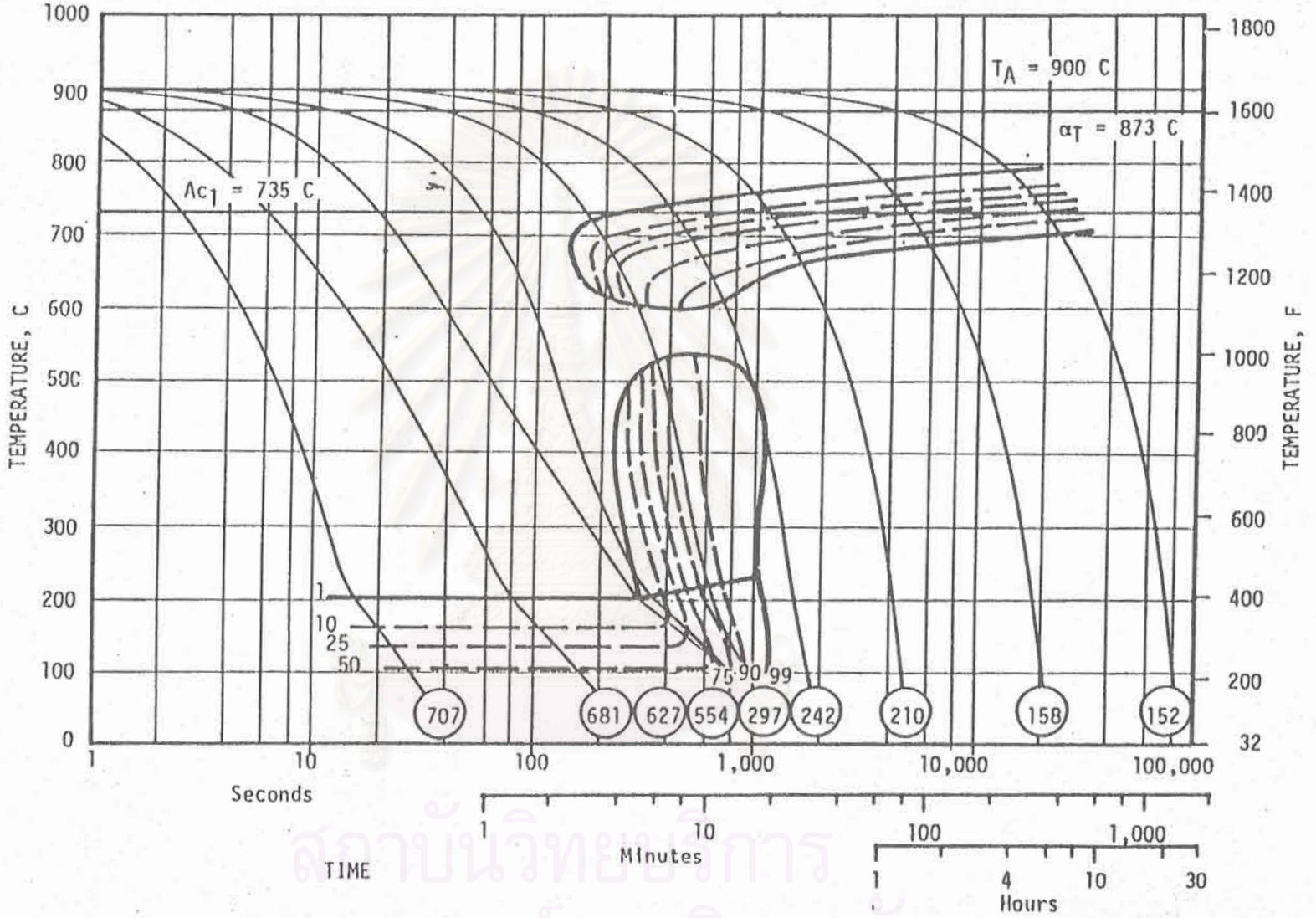


รูปที่ 3.3 แผนภูมิ TTT หรือ I-T ของเหล็กหล่อกราไฟต์กลม ที่มีโมลิบดินั่มผสม

สำหรับแผนภูมิ CCT (Continuous Cooling Transformation) จากเอกสารอ้างอิงไม่ปรากฏพบแผนภูมิ CCT ของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมที่ไม่มีธาตุผสม จะมีแต่แผนภูมิ CCT ของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมที่มี Ni และ Mo (2.37% Ni, 0.5% Mo) หรือ Mo ผสมอย่างเดียว (0.49% Mo) ดังรูปที่ 3.4, และ 3.5 ซึ่งลักษณะของแผนภูมิจะแยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่ออสเตนไนท์เปลี่ยนเป็นเพิร์ไลท์ กับส่วนที่ออสเตนไนท์เปลี่ยนเป็นเบไนต์ อันเนื่องมาจากบทบาทของโมลิบดินั่ม ส่วนบทบาทของนิเกิลคงจะมีผลทางด้านเคลื่อนกราฟมาทางขวามากขึ้นเป็นการเพิ่มคุณสมบัติความสามารถในการชุบแข็ง



รูปที่ 3.4 แผนภูมิ CCT ของเหล็กหล่อเทียบ 3.3% C, 2.3% Si, 0.32% Mn, 2.37% Ni และ 0.50% Mo



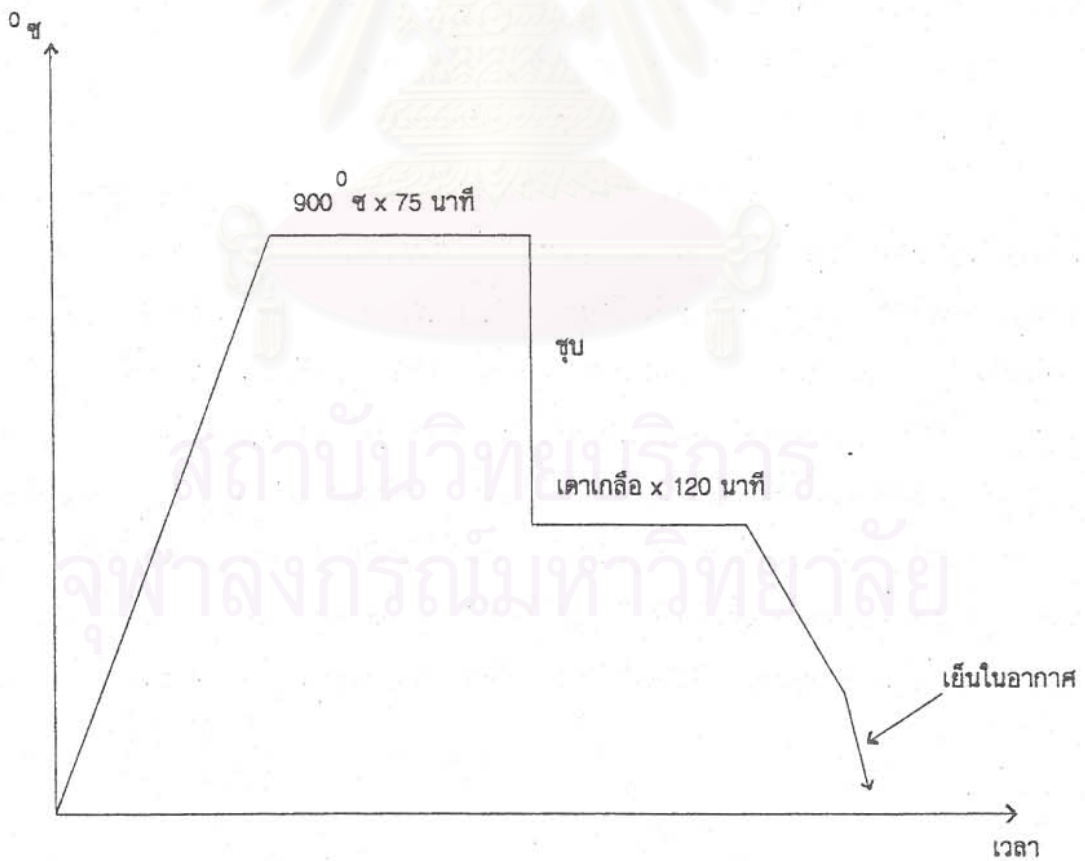
รูปที่ 3.5 แผนภูมิ CCT สำหรับเหล็กหล่อเหนียว 3.32% C, 2.58% Si, 0.35% Mn และ 0.49% Mo

3.3 อุปกรณ์ในการอบชุบ

อุปกรณ์ในการอบชุบ Austempering ประกอบด้วยเตาอบชุบชนิด Muffler สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ถึง 1200 °ซ ที่ใช้ในการวิจัยได้แก่เตาอบชุบยี่ห้อ Naber ขนาด 9.1 Amp 12x12x12 นิ้ว ส่วนเตาเกลือ (Salt-bath) จะใช้หลอมละลายเกลือที่อุณหภูมิ 300 °-500 °ซ ในงานวิจัยใช้เตายี่ห้อ Naber ขนาด 18.2 Amp เส้นผ่าศูนย์กลาง 9 นิ้ว สูง 18 นิ้ว และอุปกรณ์สำหรับจับชิ้นงานจากเตา Muffler มาจุ่มในเตาเกลือ พร้อมอุปกรณ์จับเวลา

3.4 วิธีการอบชุบ

การอบชุบจะเริ่มจากการเผาเหล็กภายในเตา Muffler (180 °ซ/ชม.) จนถึง 900 °ซ และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 900 °ซ นี้เป็นเวลา 75 นาที จากนั้นจะนำเหล็กไปชุบในอ่างเกลือที่อุณหภูมิต่างกันเริ่มจาก 200 °ซ และเปลี่ยนเป็นที่ 250 °ซ, 300 °ซ, 350 °ซ ใช้เวลา 120 นาที นำออกจากอ่างเกลือปล่อยให้เย็นในอากาศ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วิธีการอบชุบ

บทที่ 4

คุณสมบัติของเหล็กหล่อที่ได้จากการทดลอง

4.1 วิธีการทดสอบคุณสมบัติ

ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แบ่งชนิดของเหล็กหล่อตามโลหะผสมโมลิบดินั่ม (Mo) ออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่กลุ่ม A,B และ C โดยกลุ่ม A มีโมลิบดินั่ม 0.1% กลุ่ม B 0.3% และกลุ่ม C 0.6% ในแต่ละกลุ่มยังแบ่งตามส่วนผสมของนิกเกิล (Ni) ออกเป็น 5 ระดับ โดยมีนิกเกิลผสมในปริมาณ 0.6%, 1.0%, 1.8%, 2.7% และ 4.0% ตามลำดับ

การทดสอบคุณสมบัติต่างๆ มีดังนี้คือ

1. การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค เพื่อพิจารณารูปทรงของกราไฟต์ ปริมาณของเพิร์ไลท์และปริมาณของเบไนต์
2. การทดสอบความต้านแรงดึง
3. การทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก
4. การทดสอบความแข็ง

โดยทำการวิเคราะห์ และทดสอบทั้งในสภาพหลังการหล่อเสร็จ (As-Cast) และหลังการทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 250 °ซ, 300 °ซ และ 350 °ซ ตามลำดับ

4.2 โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกล ในสภาพหลังการหล่อเสร็จ

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคภายหลังการหล่อเสร็จ จะเห็นได้ว่าชิ้นงานทดสอบหมายเลข A5, B5 และ C5 ซึ่งมีปริมาณนิกเกิลผสมสูงที่สุด ในแต่ละชุดจะมีค่าความต้านแรงดึงสูงที่สุด โดยมีค่าระหว่าง 775 MPa - 1042 MPa ในขณะที่ค่า Elongation หรือส่วนยืดและค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบในกลุ่ม B ซึ่งมีโมลิบดินั่มประมาณ 0.3% จะมีค่าเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มอื่น ส่วนค่าความแข็งนั้นชิ้นงานทดสอบในกลุ่ม C จะมีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงที่สุด สำหรับปริมาณของเบไนต์นั้น ชิ้นงานทดสอบ C5 ซึ่งมีโลหะผสม Ni และ Mo สูงที่สุด จะเกิดเบไนต์ในสภาพหลังการหล่อสูงที่สุด และชิ้นงานทดสอบ ซึ่งมี Ni ผสมประมาณ 4% ในทุกชุดจะเกิดเบไนต์ในสภาพหลังการหล่อโดยไม่ต้องอบชุบ

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อ (As-Cast)

	Tensile strength		Elongation (%)	Impact strength (J)	Hardness (HB)	Pearlite content (%)	Bainite content (%)
	(kg/mm^2)	(MPa)					
A1	61.2	600	4.3	4.0	197.0	57	-
A2	64.5	632	9.3	5.0	197.0	43	-
A3	70.9	695	8.0	6.0	227.5	54	-
A4	79.2	776	2.3	4.0	240.7	40	-
A5	99.8	979	3.3	5.0	292.7	-	77
B1	59.7	585	11.8	9.0	174.8	23	-
B2	58.6	574	13.6	7.5	190.0	40	-
B3	68.6	672	11.0	5.0	218.0	23	-
B4	78.9	774	5.8	4.0	204.1	46	-
B5	106.3	1042	-	6.4	386.7	-	89
C1	64.9	636	7.7	3.7	249.0	31	-
C2	67.2	659	7.0	3.7	226.3	29	-
C3	67.8	664	7.0	3.7	218.7	40	-
C4	75.5	740	5.0	5.0	242.0	40	-
C5	77.0	775	-	8.0	306.3	-	92

4.3 โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 250 °ซ

ตารางที่ 4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเหล็กหล่อกราไฟต์กลมที่ผ่านการทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 250 °ซ หลังจากการอบชุบแล้วชิ้นงานทุกชิ้นจะมีเนื้อพื้นเป็นเบไนต์สูงถึง 78% ขึ้นไป โดยมีปริมาณเบไนต์สูงที่สุด 97% ในชิ้นงาน B3 ชิ้นงานในกลุ่ม B จะมีค่าความต้านแรงดึงเฉลี่ยสูงที่สุด และมีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงที่สุดเช่นเดียวกัน สำหรับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกนั้น ชิ้นงานในกลุ่ม A จะมีค่าความทนทานต่อแรงกระแทกต่ำสุด ขณะที่ชิ้นงานกลุ่ม B และ C มีค่าความทนทานต่อแรงกระแทกเฉลี่ยใกล้เคียงกัน

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 250 °ซ

	Tensile strength		Elongation (%)	Impact strength (J)	Hardness (HB)	Bainite content (%)
	(kg/mm^2)	(MPa)				
A1	87.2	855	1.3	5.0	387.3	83
A2	123.2	1207	2.0	5.0	381.3	89
A3	144.0	1412	1.5	5.0	436.5	78
A4	130.0	1278	0.8	5.0	413.3	92
A5	107.6	1054	0.8	5.0	427.8	89
B1	106.9	1048	0.5	6.0	436.9	94
B2	154.0	1511	1.8	6.0	431.3	92
B3	152.5	1495	3.3	6.0	433.3	97
B4	146.5	1436	3.8	4.0	445.7	83
B5	119.6	1180	-	6.2	435.7	89
C1	137.6	1348	1.0	6.2	416.0	92
C2	130.0	1274	2.0	5.0	425.0	83
C3	133.3	1306	1.5	5.0	438.7	86
C4	129.3	1267	2.0	7.0	439.0	78
C5	118.3	1159	-	5.0	436.0	80

4.4 โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 300 °ซ

ตารางที่ 4.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเหล็กหล่อที่ผ่านการทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 300 °ซ หลังการอบชุบ แล้วชิ้นงานจะมีโครงสร้างของเนื้อพื้นเป็นเบไนต์ตั้งแต่ 78-97% ชิ้นงานในกลุ่ม A จะมีค่าเฉลี่ยความต้านแรงดึงสูงที่สุด ในขณะที่ชิ้นงานในกลุ่ม B จะมีค่าความต้านแรงดึงเฉลี่ยต่ำที่สุด ส่วนความทนทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานกลุ่ม A และ B มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 300 °ซ

	Tensile strength		Elongation (%)	Impact strength (J)	Hardness (HB)	Bainite content (%)
	(kg/mm^2)	(MPa)				
A1	147.1	1442	0.5	8.0	331.8	86
A2	114.5	1122	3.5	9.0	329.0	92
A3	133.8	1311	2.5	9.0	355.8	89
A4	135.2	1325	3.3	9.0	361.1	97
A5	131.3	1287	4.0	9.0	360.2	92
B1	116.9	1146	3.3	9.0	363.0	80
B2	142.2	1396	3.5	12.5	352.0	89
B3	133.7	1310	4.3	8.0	354.3	80
B4	129.7	1271	3.7	6.0	306.6	94
B5	113.1	1108	3.8	8.0	368.3	78
C1	120.5	1181	3.0	7.5	364.8	92
C2	140.7	1379	4.7	6.2	351.6	94
C3	135.7	1330	1.5	7.0	365.7	97
C4	136.2	1335	1.0	9.0	370.0	86
C5	123.7	1212	2.9	8.0	360.7	86

4.5 โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 350 °ซ

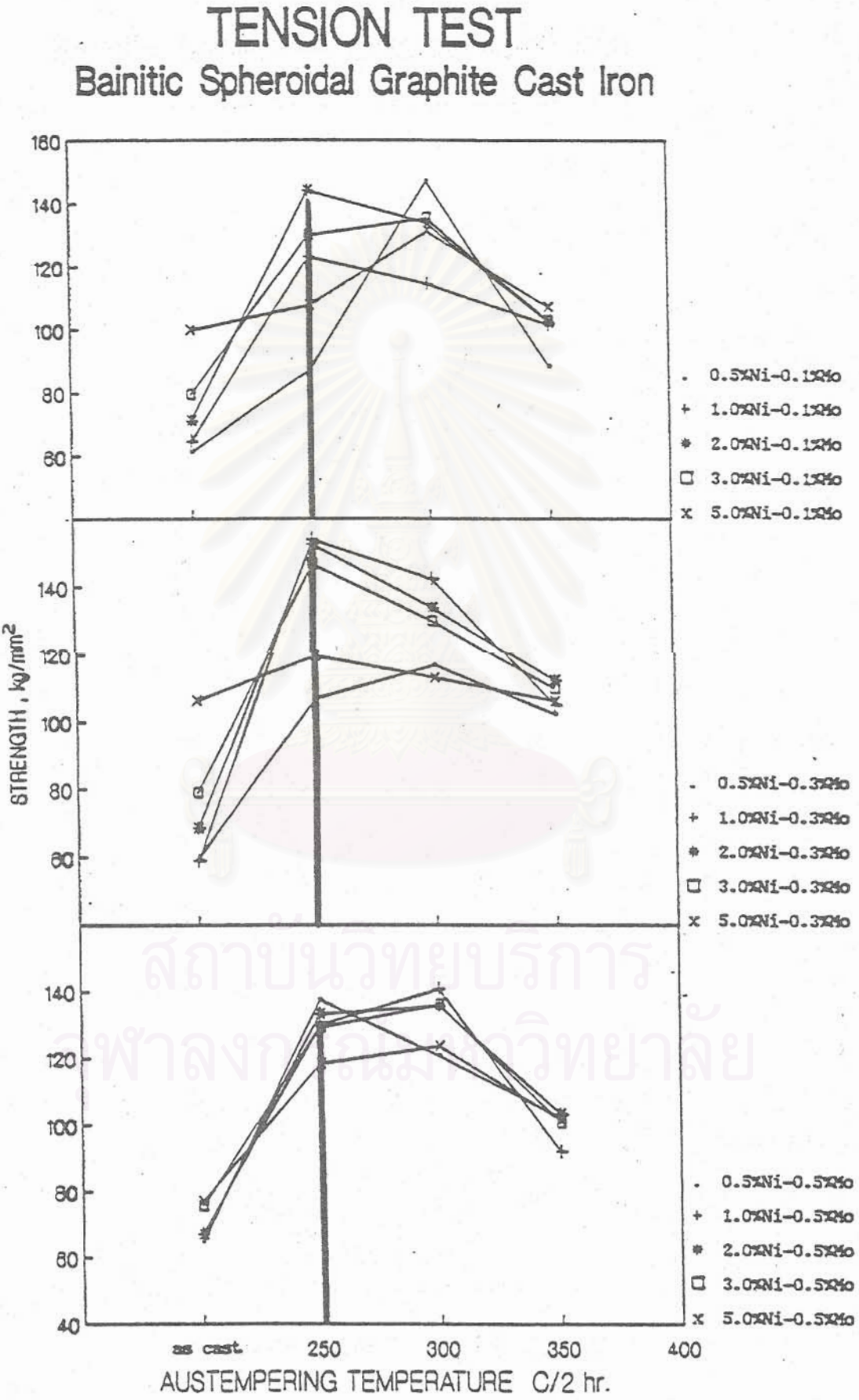
ตารางที่ 4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเหล็กหล่อที่ผ่านการทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 350 °ซ หลังการอบชุบแล้วชิ้นงานจะมีโครงสร้างของเนื้อพื้นเบไนต์ ตั้งแต่ 80-97% ชิ้นงานในกลุ่ม B จะมีค่าความต้านแรงดึงเฉลี่ยสูงที่สุด ในขณะที่ชิ้นงานในกลุ่ม C จะมีค่าความต้านแรงดึงเฉลี่ยต่ำที่สุด ความทนทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานในกลุ่ม B จะมีค่าสูงที่สุด ส่วนของกลุ่ม A และ C มีค่าใกล้เคียงกัน โครงสร้างเนื้อพื้นของกลุ่ม C จะมีปริมาณของเบไนต์เฉลี่ยสูงที่สุด ส่วนของกลุ่ม A จะต่ำที่สุด

ตารางที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 350 °ซ

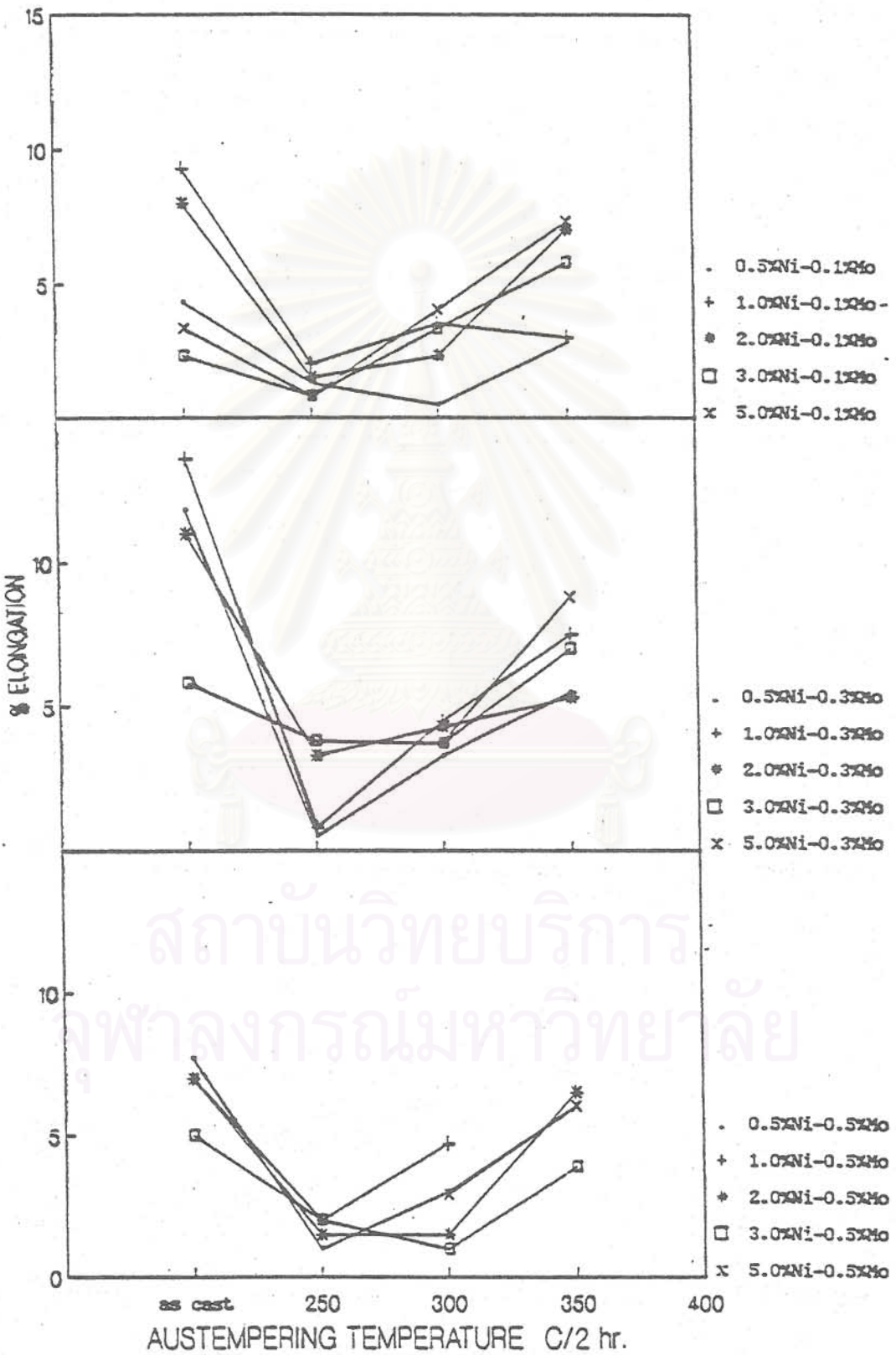
	Tensile strength		Elongation (%)	Impact strength (J)	Hardness (HB)	Bainite content (%)
	(kg/mm^2)	(MPa)				
A1	88.3	865	2.8	9.0	319.9	83
A2	101.5	995	3.0	9.0	279.3	89
A3	102.0	1000	7.0	11.0	303.7	78
A4	102.7	1007	5.8	10.7	288.5	92
A5	106.9	1048	7.3	11.0	283.3	89
B1	102.2	1001	5.5	11.8	305.3	94
B2	105.0	1029	7.5	13.5	303.0	92
B3	112.2	1100	5.3	12.0	272.5	97
B4	109.6	1072	7.0	9.0	291.0	83
B5	106.0	1039	8.8	10.2	281.9	89
C1	101.9	999	6.0	10.5	292.0	92
C2	92.0	902	-	10.7	298.1	83
C3	103.2	1011	6.5	8.5	301.9	86
C4	100.7	986	3.9	9.8	299.8	78
C5	101.3	993	6.0	11.5	279.7	80

4.6 บทวิเคราะห์ผลการทดลอง

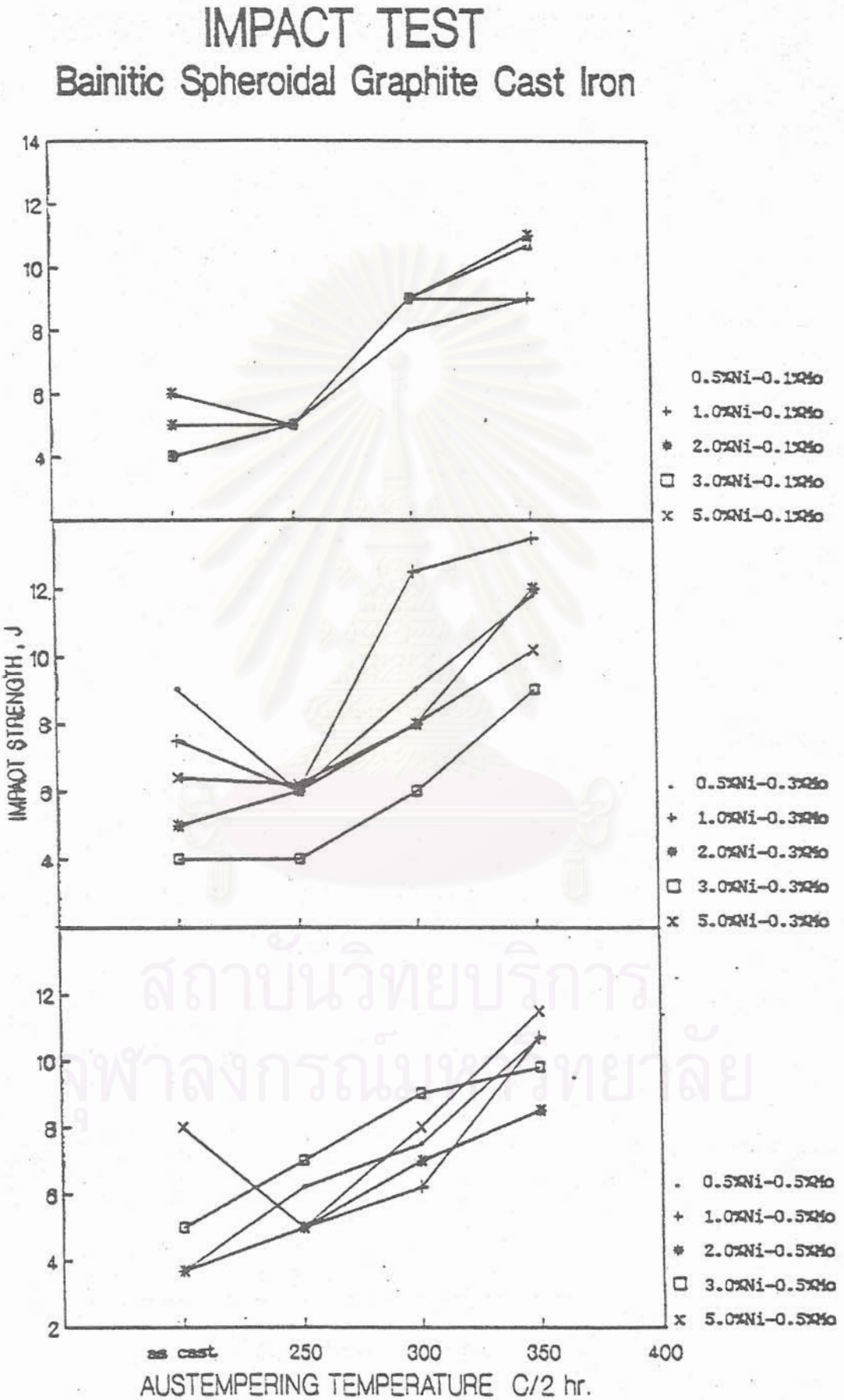
รูปที่ 4.1 - 4.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำ Austempering และคุณสมบัติเชิงกลในแง่ของความต้านแรงดึง อัตราส่วนยืดความทนทานต่อแรงกระแทก และความแข็ง ของชิ้นงานเหล็กหล่อที่โลหะผสมค่าต่างๆ กัน



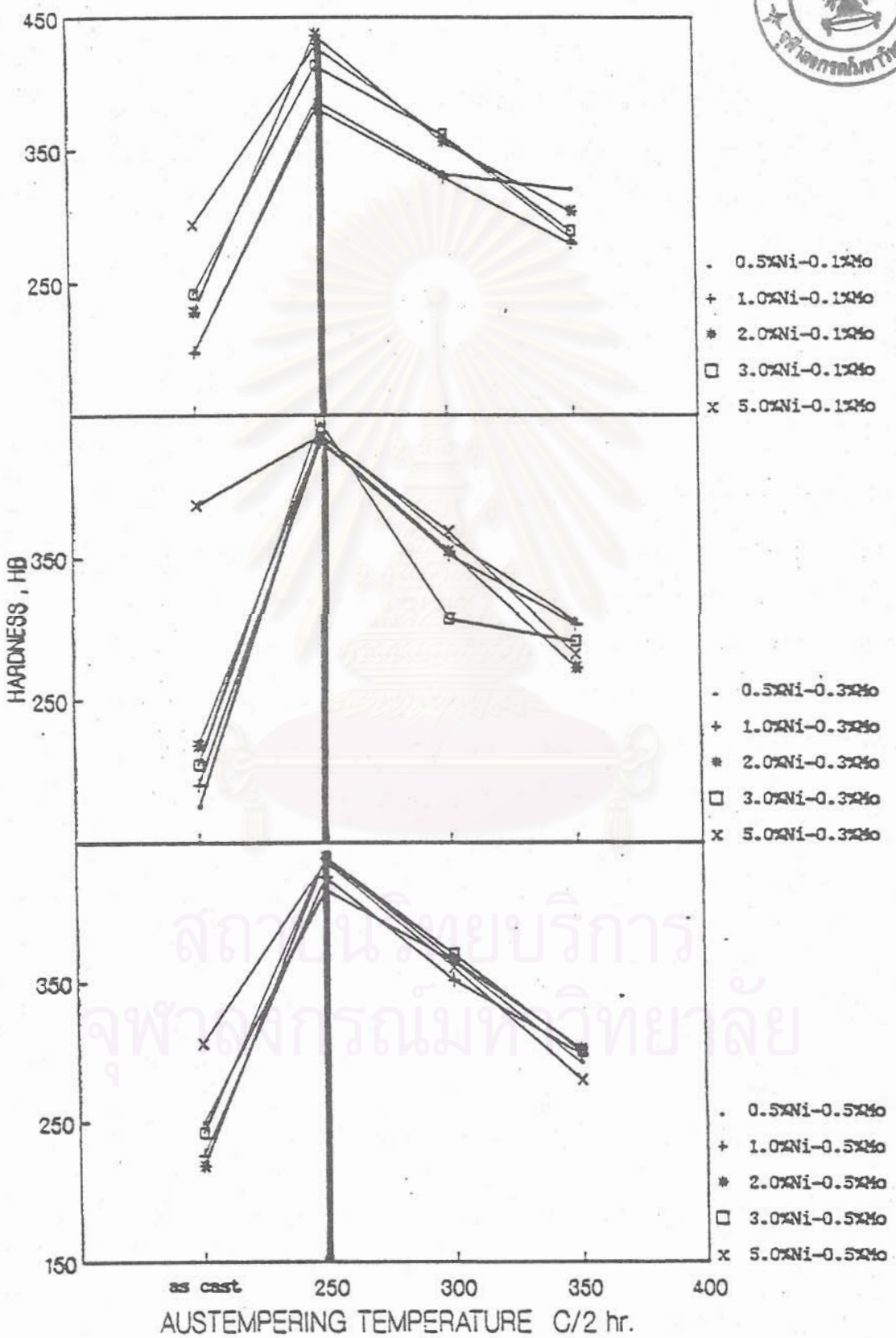
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำ Austempering และความต้านแรงดึง



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำ Austempering และอัตราส่วนยืด



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำ Austempering และความทนทานต่อแรงกระแทก



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำ Austempering และความแข็ง

จากกราฟของความต้านแรงดึง (รูปที่ 4.1) สามารถสรุปค่าส่วนผสมของ Ni และ Mo ที่ให้ค่าความต้านแรงดึงสูงที่สุด ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ส่วนผสมของ Ni และ Mo ที่ให้ค่าความต้านแรงดึงสูงที่สุด

ชิ้นทดสอบ / ส่วนผสม	As Cast	Austempering		
		250 °ซ	300 °ซ	350 °ซ
% Ni	5.0	1.0	0.5	2.0
% Mo	0.3	0.3	0.1	0.3
ความต้านแรงดึงสูงที่สุด(MPa)	1042	1509	1442	1100

จากตารางสรุปได้ว่า ส่วนผสม 1.0% Ni และ 0.3% Mo ทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 250 °ซ จะให้ค่าความต้านแรงดึงสูงที่สุด ที่ 1509 MPa

จากกราฟของความทนทานค่าแรงกระแทก (รูปที่ 4.3) สามารถสรุปค่าส่วนผสมของ Ni และ Mo ที่ให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกสูงที่สุด ดังตารางที่ 4.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 ส่วนผสมของ Ni และ Mo ที่ให้ค่าความต้านแรงกระแทกสูงที่สุด

ชิ้นทดสอบ / ส่วนผสม	As Cast	Austempering		
		250 °ซ	300 °ซ	350 °ซ
% Ni	5.0	3	1	1
% Mo	0.3	0.5	0.3	0.3
ความทนทานต่อแรงกระแทก(J)	9	7	12.5	13.5

จากตาราง สรุปได้ว่า ส่วนผสม 1% Ni และ 0.3% Mo ทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 350 °ซ จะให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกสูงที่สุดที่ 13.5 J

จากกราฟของความแข็ง (รูปที่ 4.4) สามารถสรุปค่าส่วนผสมของ Ni และ Mo ที่ให้ค่าความแข็งสูงที่สุด ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ส่วนผสมของ Ni และ Mo ที่ให้ค่าความแข็งสูงที่สุด

ชิ้นทดสอบ / ส่วนผสม	As Cast	Austempering		
		250 °ซ	300 °ซ	350 °ซ
% Ni	5	3	3	0.5
% Mo	0.3	0.3	0.5	0.1
ความแข็ง BHN	386.7	445.7	370.0	319.9

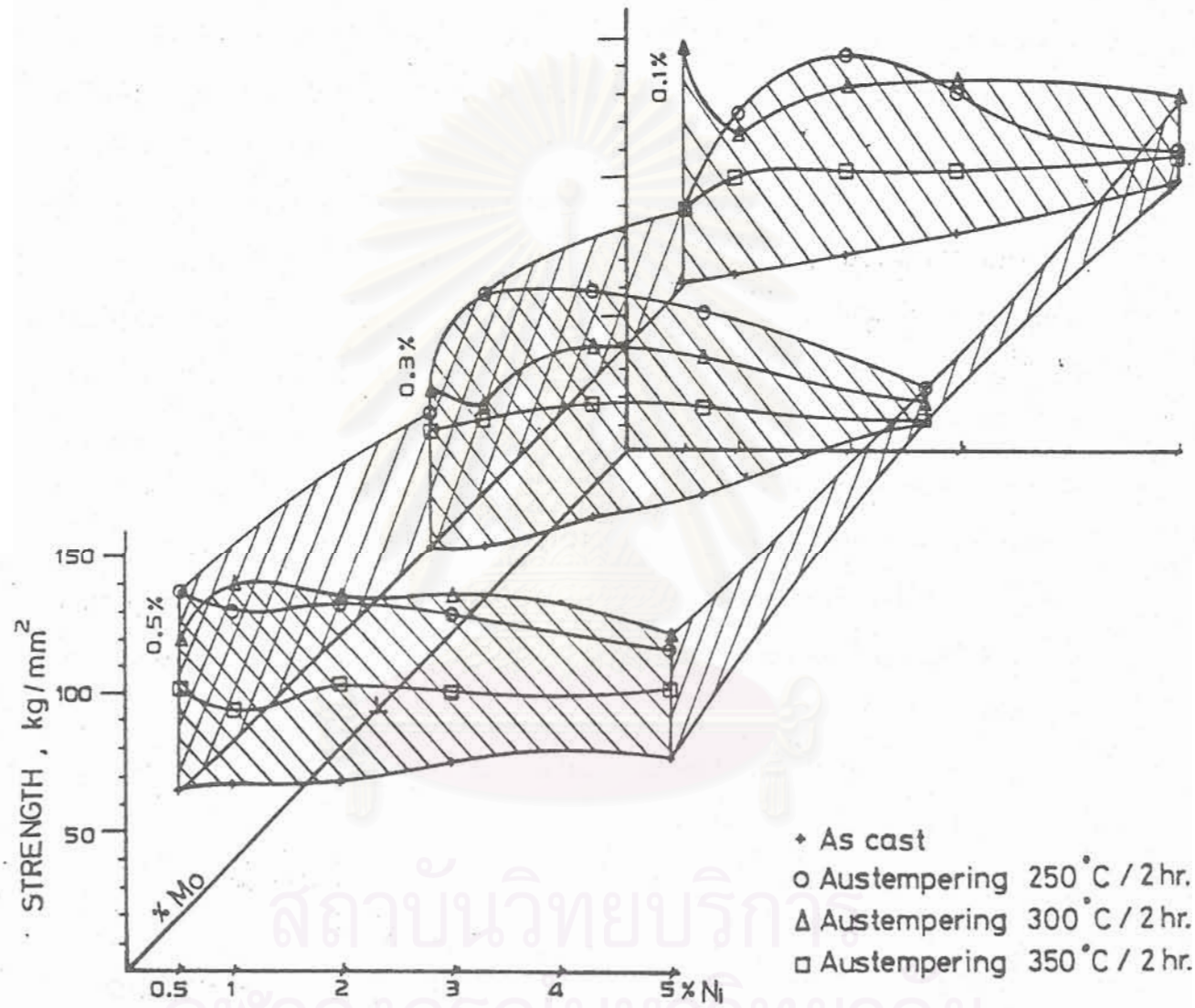
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุปได้ว่าชิ้นทดสอบที่ให้ค่าความแข็งสูงที่สุด ได้แก่ส่วนผสม 3% Ni, 0.3% Mo ผ่านการทำ Austempering ที่อุณหภูมิ 250 °ซ

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของโลหะผสม Ni และ Mo กับค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ จะเห็นได้ว่าที่ส่วนผสม 0.3% Mo จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่มีค่าสูงที่สุด และในชิ้นงานทดสอบชุดนี้ชิ้นงานที่มี Ni ประมาณ 1.5% จะให้ค่าความต้านแรงดึงสูงที่สุดเช่นเดียวกัน ในส่วนของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำ Austempering นั้น การทำที่อุณหภูมิ 250 °ซ จะให้ค่าความต้านแรงดึงในอัตราที่สูงที่สุด แต่ถ้าต้องการความทนทานต่อแรงกระแทกสูงจะต้องทำ Austempering ที่อุณหภูมิประมาณ 350 °ซ ทั้งนี้เนื่องจากการทำ Austempering ที่อุณหภูมิต่ำจะได้โครงสร้างเนื้อพื้นเป็น Lower Bainite และมี Pearlite แทรกอยู่เป็นบางส่วน แต่การทำ Austempering ที่อุณหภูมิสูงจะให้โครงสร้างเนื้อพื้นเป็น Upper Bainite ที่ละเอียดกว่า และมี Pearlite แทรกเป็นปริมาณต่ำ จึงมีผลให้ความทนทานต่อแรงกระแทกมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ

ในกรณีที่มีการเติมโลหะผสม Ni ในปริมาณสูงเกินกว่า 3% ขึ้นไปจากการทดลองพบว่าจะสามารถเกิดเนื้อพื้นเบไนต์ ในสภาพหลังการหล่อได้ โดยไม่จำเป็นต้องทำการอบชุบ หรือ Austempering เนื่องจาก Ni มีคุณสมบัติในการเคลื่อนย้ายเส้นขอบเขตในการเกิด Pearlite (ในแผนภูมิ TTT) ไปทางขวา และเคลื่อนที่เส้นขอบเขตการเกิด Bainite มาทางซ้ายได้มาก กล่าวอีกนัยหนึ่ง ก็คือ Ni เป็น Bainite Promoter ได้อย่างดี ดังนั้นในกรณีที่ไม่ต้องการจะทำการอบชุบก็สามารถทำให้เกิดเนื้อพื้นเบไนต์ได้เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ควรเติมโลหะผสม Mo ในปริมาณไม่เกิน 0.3% เพื่อทำให้ได้ค่าความต้านแรงดึงในระดับสูงเหมาะสมกับการใช้งาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



THE RELATIONSHIP BETWEEN STRENGTH AND Ni, Mo CONTENT AT 3 LEVELS OF AUSTEMPERING TEMPERATURE

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของโลหะผสม Ni และ Mo กับค่าความต้านแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ

บทที่ 5

วัสดุเหล็กในอุตสาหกรรมรถยนต์

5.1 ชิ้นส่วนและวัสดุที่ใช้ทำ

เนื่องจากเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ เป็นเหล็กหล่อที่มีคุณสมบัติในการรับแรงกระทำสูงและทนต่อการเสียดสี และมีความเหนียวค่อนข้างดี (เทียบกับเหล็กหล่อเทา) ทำให้สามารถใช้ทำชิ้นส่วนจักรกลต่างๆ ได้ โดยเฉพาะในงานที่ขึ้นรูปยากลำบาก การผลิตโดยใช้เหล็กหล่อจะทำให้ผลิตได้ง่ายขึ้น เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติทางกลแล้ว กลุ่มผู้ทำการวิจัยได้ตั้งเป้าหมายไปที่ชิ้นส่วนรถยนต์ รถบรรทุก เพราะชิ้นส่วนเหล่านี้ต้องการคุณสมบัติทางกลที่ดี และมีปริมาณความต้องการใช้สูง รวมทั้งมีการพัฒนาอุตสาหกรรมด้านนี้ในประเทศสูง มีการขยายตัวออกไปมาก ประกอบกับคุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะผลิตชิ้นส่วนเหล่านี้ได้ โดยต้นทุนในการผลิตก็ไม่สูงนัก โรงงานเหล็กหล่อในประเทศที่ผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมอยู่แล้วก็สามารถผลิตได้ ทางกลุ่มผู้วิจัยจึงออกหาข้อมูลจากทางบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ต่างๆ ถึงข้อกำหนดของเหล็กที่ใช้ทำชิ้นส่วนรถยนต์ รถบรรทุก โดยมุ่งประเด็นไปที่ชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็กหล่อ เหล็กกล้าชุบแข็งและเหล็กกล้าหล่อซึ่งเป็นวัสดุเหล็กที่จะนำเหล็กหล่อกราไฟต์เนื้อพื้นเบไนต์มาผลิตทดแทนได้ ซึ่งชิ้นส่วนรถยนต์ที่ใช้วัสดุเหล่านี้ทำจะเป็นชุดระบบถ่ายทอดกำลัง (Transmission part) เครื่องยนต์และช่วงล่างบางชิ้น การหาข้อมูลจึงมุ่งประเด็นไปที่ชิ้นส่วนเหล่านี้ สรุปข้อมูลที่ได้จากกลุ่มบริษัทประกอบรถยนต์ในประเทศแสดงในตารางที่ 5.1 ดังนี้

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลที่ได้รับจากบริษัทประกอบรถยนต์ในประเทศไทย

ชิ้นส่วนจักรกล	ข้อกำหนดวัสดุ
เฟืองแบบต่างๆ	
1. เฟืองท้าย (Differential)	SCM 415
2. เฟืองพีเนียน (Pinion)	SCM 420
3. เฟืองแหวน (Ring Gear)	SCM 420
4. เฟืองฟันใน (Internal Gear)	SCM 415
5. เฟืองล้อ (Crown Wheel)	SCM 420
6. เฟืองดอกจอก (Bevel Gear)	SCM 415

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลที่ได้รับจากบริษัทประกอบรถยนต์ในประเทศไทย (ต่อ)

ชิ้นส่วนจักรกล	ข้อกำหนดวัสดุ
7. เฟืองพา	SCM 415
8. เฟืองบังคับเลี้ยว (Steering Gear)	SCM 420
9. เฟืองฮีลิก (Helical Gear)	SCM 420
10. เฟืองแหวนล้อช่วยแรง (Flywheel Ring Gear)	SC 48
เพลา	
11. เพลาข้อเหวี่ยง (Crankshaft)	FCD 70
12. เพลาเข้า (Input shaft)	SCM 415
13. เพลาออก (Output shaft)	SCR 415
14. เพลาคลัตช์ (Clutch shaft)	SCR 415
15. เพลาตาม (Counter shaft)	SCR 415
16. เพลาห้องเฟืองท้าย (Differential Shaft)	SCR 415
ข้อต่อ	
17. ข้อต่ออ่อน (Universal Joint)	SCR 415
18. ข้อต่อคาร์ดาน (Cardan Joint)	SCR 415
19. ข้อต่อลูกหมาก (Ball Joint)	SCR 440
20. ข้อบังคับเลี้ยว (Steering Knuckle)	FCD 50,60
21. โบลท์ (Bolt)	SCM 440
Housing or Box	
22. เสื้อสูบ (Cylinder Box)	FC 25
23. เสื้อเฟืองท้าย (Differential Housing)	FCD 45
24. เสื้อหุ้มคลัตช์ (Clutch Housing)	FCD 50
25. เสื้อหุ้มทรงระฆัง (Bell Housing)	FCD 45
26. กระปุกเฟืองบังคับเลี้ยว (Steering Box)	FCD 50
27. ท่อรวมไอเสีย (Exhaust manifold)	FCD 45

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลที่ได้รับจากบริษัทประกอบรถยนต์ในประเทศไทย (ต่อ)

ชิ้นส่วนจักรกล	ข้อกำหนดวัสดุ
28. ฝาครอบคลัตช์ (Clutch Cover)	SCP 28, FCD 40
29. ฝาครอบเบรค (Brake Cover)	SCP 28
30. ห้องเกียร์ (Gear Box)	FC 25
31. Pump Housing (For Steering Gear)	FCD 50
32. Control Valve	SCR 15
ชิ้นส่วนอื่นๆ	
33. กระเดื่องวาวล์ (Rocker Arm)	FCD 50
34. Oil Cooler Jacket	FCD 50
35. Disc Cylinder	FCD 50
36. จานเบรค (Brake Disc)	FC 25
37. ดรัม (Brake Drum)	FC 20
38. คาลิเปอร์เบรค (Brake Caliper)	FCD 45
39. Steering Bracket	FCD 45
40. แผ่นคลัตช์ (Clutch Disc)	SCP 28
41. แผ่นกดคลัตช์ (Clutch Pressure Plate)	FC 25

หมายเหตุ SCR 415 และ 420 เป็นเหล็กกล้าที่ใช้ทำ Case Hardening

SCP 28 เป็นเหล็กกล้าหล่อที่ใช้งานที่รับแรงดันสูงๆ

FC 20, 25 เป็นเหล็กหล่อเทา

FCD 40, 45, 50 เป็นเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเพิร์ไลท์

SC 48 เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนหล่อ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 การแบ่งแยกหมวดของวัสดุเหล็กที่ทำชิ้นส่วนรถยนต์

จากตารางข้อมูลวัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วนรถยนต์ ในส่วนของระบบถ่ายทอดกำลังเครื่องยนต์ ช่วงล่างบางชิ้นจะแบ่งแยกออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

5.2.1 เหล็กหล่อ

5.2.2 เหล็กกล้าชุบแข็ง

5.2.3 เหล็กกล้าหล่อ

5.2.1 เหล็กหล่อ

5.2.1.1 เหล็กหล่อเทา

ชิ้นส่วนรถยนต์ที่ทำจากเหล็กหล่อเทา ได้แก่ ชิ้นส่วนจำพวกที่ไม่ต้องรับแรงกระแทกมากนัก เพราะเหล็กหล่อเทานั้นค่อนข้างเปราะ จากตารางข้อมูลจะแบ่งแยกชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็กหล่อเทาได้ดังนี้

- Disc Brake (FC 25)
- Drum Brake (FC 25)
- Housing ต่างๆ (FC 20, 25)
- Pulley ต่างๆ (FC 25)
- เสื้อสูบรถ (FC 25)
- Fly Wheel (FC 25)

ชิ้นส่วนเหล่านี้เป็นชิ้นส่วนที่ไม่ต้องรับแรงกระทำมากนัก เช่น ตัวเรือน (Housing) ซึ่งจะป้องกันชิ้นส่วนต่างๆ ที่สำคัญหรือ ชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนไหว เพื่อป้องกันฝุ่นหรือสารอื่นเข้าไป โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่อยู่ช่วงล่างของรถอาจมีเศษของต่างๆ กระเด็นขึ้นมาจากพื้นถนนขณะที่รถวิ่งอยู่ อาจเกิดความเสียหายได้ จึงไม่จำเป็นต้องใช้เหล็กที่ความแข็งแรงมากนัก เพียงแต่สามารถรับแรงกระทำอันอาจถ่ายทอดมาจากจุดที่ยึดอยู่ได้ก็เพียงพอ แต่มักจะมีรูปร่างซับซ้อนทำให้สะดวกที่จะใช้เหล็กหล่อทำ หรือบางชิ้นส่วนที่ใช้เหล็กหล่อเทาทำอาจมีการรับแรงเสียดสีของผิวสัมผัส เช่น Disc Brake, Drum Brake, Pulley, Fly Wheel จะพบว่าเหล็กหล่อเทามีค่าความแข็งสูงพอสมควร (187-241 HB) ดีกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนทั่วๆ ไป จึงสามารถใช้เหล็กหล่อเทาทำได้

สำหรับ Disc Brake หรือ Drum ในรถยนต์บางยี่ห้อ มีการนำเหล็กหล่อเทาผสมเข้ามาใช้ เช่น GG 15 CrMoNi ซึ่งมีการผสมธาตุอื่นๆ เข้ามาเพื่อช่วยคงคุณสมบัติเมื่ออุณหภูมิสูง แต่จะใช้ในรถยนต์บางรุ่นของบางยี่ห้อเท่านั้น โดยมักจะเป็นรถขนาดใหญ่หรือรถยนต์ที่มีกำลังเครื่องยนต์สูงๆ ต้องการประสิทธิภาพของระบบเบรคดีเยี่ยม

ตารางที่ 5.2 ส่วนประกอบทางเคมีของ FC 25 และ GG 15 CrMoNi

ข้อกำหนดวัสดุ / ธาตุผสม (%)	FC 25	GG 15 CrMoNi
C	> 2.0	3.0-4.0
Si	> 1.5	1.8-2.0
P	0.15 max	0.12 max
S	0.15 max	0.12 max
Mn	0.3-0.9	0.3-0.7
Ni	-	1.2-1.4
Cr	-	0.4-0.6
Mo	-	0.4-0.6

5.2.1.2 เหล็กหล่อกราไฟต์กลม

จากตารางข้อมูลจะแบ่งแยกกลุ่มชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็กหล่อกราไฟต์กลมได้ดังนี้

1. Housing ต่างๆ (FCD 40)
2. เพลาข้อเหวี่ยง (FCD 70)
3. Bracket ต่างๆ (FCD 45, FCD 50)
4. Exhaust Manifold

พวก Housing ต่างๆ ที่จะใช้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมทำนั้นมักจะเป็นพวกที่มีผนังบางๆ มักจะเป็นพวก Housing ของพวกรถยนต์หรือรถบรรทุกขนาดเล็กเท่านั้น เพราะถูกจำกัดมาด้วยพื้นที่ใช้สอย การใช้เหล็กหล่อเทาซึ่งมีคุณสมบัติทางด้านการรับแรงกระทำไม่สูงมาทำชิ้นส่วนบางๆ จึงไม่เหมาะสม อีกทั้งเหล็กหล่อเทาค่อนข้างเปราะด้วย จึงนำเหล็กหล่อกราไฟต์กลมมาใช้เพราะคุณสมบัติทางกลดี ความเหนียวดีกว่าเหล็กหล่อเทา ไม่เปราะแตกร้าวง่าย ซึ่งรูปร่างของ Housing มักจะมีรูปร่างซับซ้อน ทำให้สะดวกที่จะใช้เหล็กหล่อมากกว่าเหล็กกล้า

เพลาข้อเหวี่ยงเป็นชิ้นส่วนที่รับแรงกระทำสูง และมีรูปร่างซับซ้อน ทำให้ไม่สะดวกที่จะใช้เหล็กกล้ามากลึงขึ้นรูป แต่เนื่องจากต้องรับแรงกระทำสูงและมีความทนทานต่อความล้าที่ดี จึงต้องใช้เหล็กหล่อที่มีคุณภาพดี รับแรงกระทำสูงและมีความเหนียวดี จึงผลิตเป็นเหล็กหล่อกราไฟต์กลม (FCD 70) ที่รับแรงกระทำสูงๆ

Bracket เป็นชิ้นส่วนที่ยึดส่วนต่างๆ โดยต้องรับแรงกระทำอันเนื่องมาจากน้ำหนักของส่วนที่ยึดและการสั่นสะเทือนการกระแทก ทำให้ไม่สามารถใช้เหล็กหล่อเทาซึ่งเปราะและรับแรงกระทำได้ไม่มากนัก นอกจากนี้ยังมีรูปร่างที่ซับซ้อนยากลำบากต่อการนำเหล็กกล้ามากัดกลึงขึ้นรูป ทำให้เลือกใช้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมแทน โดยมากมักจะใช้เกรด FCD 50

Exhaust Manifold เป็นท่อร่วมไอเสียซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างระบบท่อไอเสียกับชุดสูบของเครื่องยนต์เป็นชิ้นส่วนที่มี Wall Thickness ที่บางและไม่ได้รับการเสียดสีมากนัก ทำให้เลือกใช้วัสดุที่มีความเหนียวค่อนข้างดี รูปร่างซับซ้อนมาก ทำให้ไม่สามารถผลิตโดยการขึ้นรูปเหล็กกล้าได้ หรือทำได้ลำบากมาก จึงใช้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมแทน ซึ่งเกรดเหล็กแล้วแต่ยี่ห้อของรถยนต์ แต่มักจะเป็น FCD 40, 50 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมแสดงในตารางที่ 5.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.3 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กหล่อกราไฟต์กลม

ข้อกำหนดวัสดุ / ธาตุผสม (%)	FCD 30	FCD 40-70
C	2.5 min	2.5 min
Si	2.5 min	-
Mn	0.4 min	-
P	0.08 max	-
S	0.02 max	-
Cu	-	0.1-0.6%

5.2.2 เหล็กกล้าชุบแข็ง

มีชิ้นส่วนรถยนต์จำนวนไม่น้อยที่ทำจากเหล็กกล้าชุบแข็ง มักจะเป็นชิ้นส่วนที่รับแรงกระทำมากๆ และต้องการความเหนียวดี รวมทั้งมีการเสียดสีของผิวสัมผัส (ในบางชิ้นส่วน) แต่จะต้องไม่มีรูปร่างที่ซับซ้อนจนเกินทั้งการกัดกลึงลำบาก หรือกัดกลึงแล้วมีการเสียเนื้อเหล็กโดยเปล่าประโยชน์มากเกินไป จากตารางข้อมูลจะแบ่งแยกชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็กกล้าชุบแข็งได้ดังนี้

1. เพลาต่างๆ (Shaft)
2. เฟือง (Gear)
3. ข้อต่อส่งกำลัง (Joint)

สำหรับเพลาต่างๆ เป็นเพลาที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก จึงง่ายต่อการขึ้นรูปทั้งเหล็กหล่อและเหล็กกล้า เพลาเป็นชิ้นส่วนที่รับแรงกระทำสูงในหลายทิศทาง มักจะต้องรับแรงเฉือน (Shear load) และต้องการวัสดุที่มีความเหนียวดี จึงเลือกใช้กลุ่มเหล็กกล้าอบชุบแข็งเพราะคุณสมบัติในด้านต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วดีกว่าเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อกราไฟต์กลมธรรมดา นอกจากนี้ในการผลิตเพลาจากเหล็กกล้าอบชุบแข็งยังทำได้รวดเร็ว และเปอร์เซนต์การเสียจากการผลิตต่ำ และเป็นชิ้นส่วนที่มีการควบคุมขนาดที่แน่นอน จึงเหมาะสมที่จะใช้เหล็กกล้าชุบแข็ง

(เหล็กหล่อไม่สามารถควบคุมขนาดได้แน่นอน ถ้าจะต้องการขนาดที่แม่นยำมากๆ ต้องกัดกลึง เช่นเดียวกับเหล็กกล้า)

เฟืองในรถยนต์เป็นชิ้นส่วนจักรกลที่มีการเสียดสี และรับแรงกระทำในหลายทิศทาง ทั้งแรงกด (Compressive Load), แรงดึง (Tension), แรงเฉือน (shear Load) และความแข็งสูงและต้องมีการควบคุมขนาดให้ได้แน่นอน จึงเลือกใช้เหล็กกล้าชุบแข็งตามเหตุผลเช่นเดียวกับเพลา

สำหรับเกรดเหล็ก (Specification) ของเหล็กกล้าชุบแข็งที่ใช้ทำชิ้นส่วนรถยนต์มักจะใช้เหล็กกล้าที่เหมาะสมแก่การทำ Case hardening อันได้แก่เหล็กกล้าผสมต่ำที่มีโครเมี่ยม (Cr) หรือโมลิบดินั่ม (Mo) ผสมอยู่ แล้วนำไปอบชุบแข็งโดยผ่านกระบวนการ Case hardening เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกล เกรดเหล็กที่ใช้ได้แก่ SCR 415, 420 ส่วนผสมทางเคมีของเกรดเหล็กเหล่านี้ แสดงในตารางที่ 5.4

ข้อกำหนดวัสดุ / ธาตุผสม (%)	SCR 415	SCR 420	SCM 415	SCM 420
C	0.13-0.18	0.18-0.23	0.13-0.18	0.18-0.23
Si	0.15-0.35	0.15-0.35	0.15-0.35	0.15-0.35
Mn	0.6-0.85	0.6-0.85	0.6-0.85	0.6-0.85
P	0.03 max	0.30 max	0.03 max	0.03 max
S	0.03 max	0.30 max	0.03 max	0.03 max
Cr	0.9-1.2	0.9-1.2	0.9-1.2	0.9-1.2
Mo	-	-	0.15-0.3	0.15-0.3

5.2.3 เหล็กกล้าหล่อ

ชิ้นส่วนรถยนต์ที่ทำจากเหล็กกล้าหล่อ มักจะเป็นชิ้นส่วนที่มีรูปร่างค่อนข้างซับซ้อนยากต่อการขึ้นรูป โดยใช้เหล็กกล้ามักจะเป็นพวก Housing หรือ Cover บางส่วนจักรกลที่มีการเคลื่อนไหว เช่น Clutch cover, Brake cover ซึ่งมีจุดต่อเนื่องกับส่วนเคลื่อนไหว

ทำให้ต้องรับภาระในหลายทิศทาง รวมทั้งต้องการความเหนียวที่ดีเพราะมักมีผนังที่บาง จึงมีการเลือกใช้เป็นเหล็กกล้าหล่อ แต่ในบางส่วนก็มีการปรับเปลี่ยนไปใช้เป็นเหล็กกราไฟต์กลมแล้ว

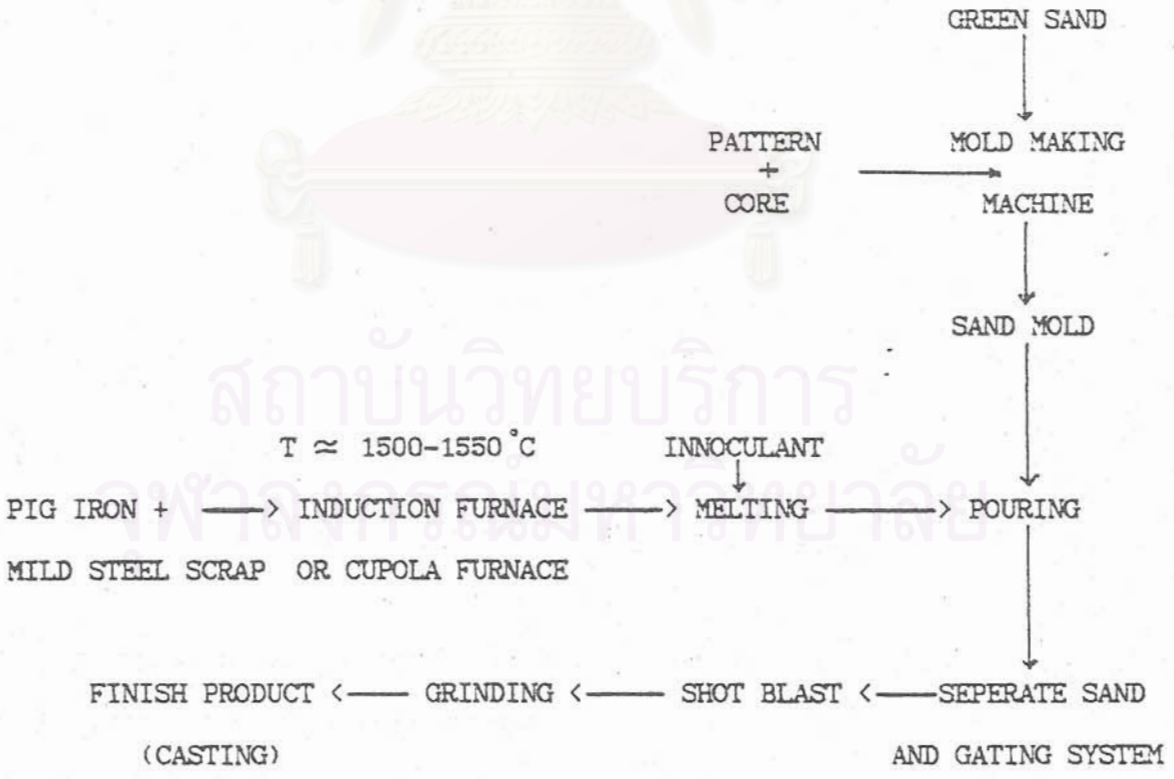
5.3 กระบวนการในการทำชิ้นส่วน

สำหรับหัวข้อกระบวนการในการทำชิ้นส่วนนั้น จะแบ่งแยกออกตามหมวดวัสดุเหล็กดังที่ได้กล่าวมาแล้วคือ เหล็กหล่อ เหล็กกล้าอบชุบแข็งและเหล็กกล้าหล่อ ถึงแม้แต่ละชิ้นส่วนจะมีกรรมวิธีปลีกย่อยแตกต่างกันออกไป แต่กรรมวิธีหลักก็ยังคงเป็นกระบวนการเดียวกันอยู่

5.3.1 กระบวนการผลิตเหล็กหล่อ

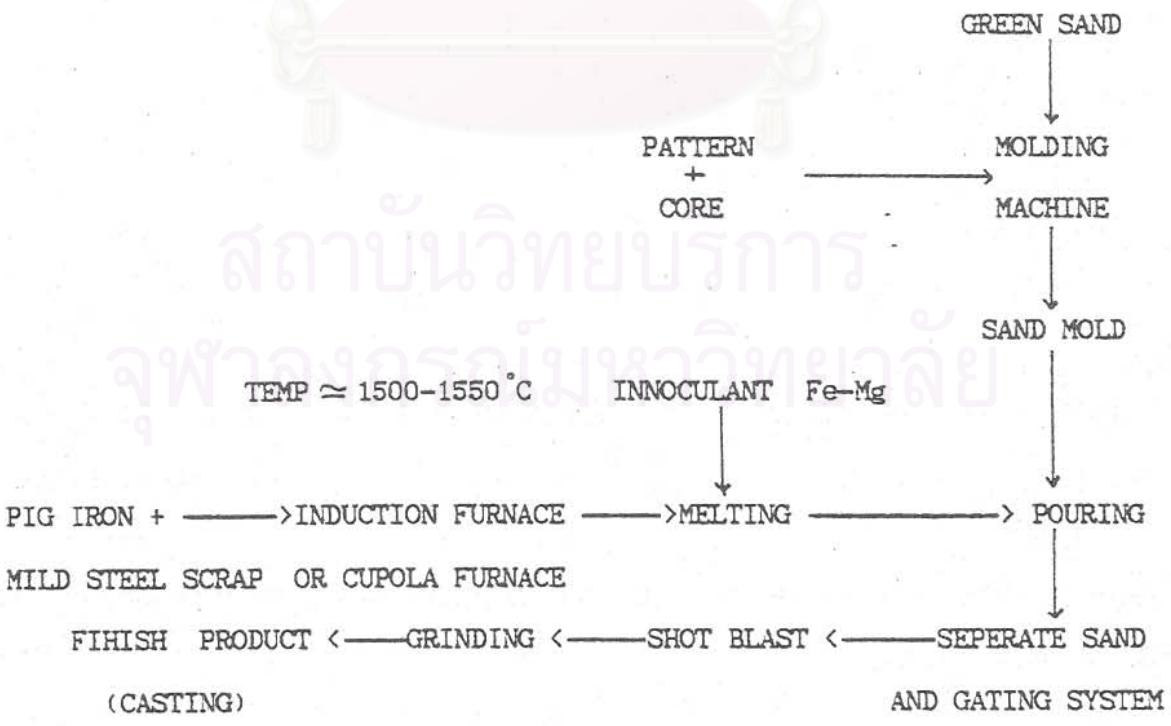
สำหรับเหล็กหล่อเราจะกล่าวถึง 2 ประเภทคือ เหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อกราไฟต์กลม ซึ่งมีการนำมาใช้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ในปัจจุบันเท่านั้น

5.3.1.1 กระบวนการผลิตเหล็กหล่อเทา



เริ่มจากการหลอมเหล็กดิบ (Pig iron) และเศษเหล็กอัด (Mild steel scrap) สำหรับในโรงงานอุตสาหกรรมมักจะไม่ใช้เหล็กดิบ แต่ใช้เศษเหล็กหล่อเทา (Grey cast iron, return scrap) ซึ่งจะได้มาจากกระบวนการผลิตอยู่แล้วแทน ทำการหลอมในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) หรือในโรงงานเก่าๆ อาจใช้เตาคิวโปลา (Cupola furnace) อุณหภูมิในการหลอมประมาณ 1500-1550 °ซ เติมคาร์บอนลงในเตาให้ได้ % คาร์บอนตามต้องการ และเติมซิลิกอนลงไปปรับ % ของซิลิกอนให้ได้ต่ำกว่าค่าที่ต้องการเล็กน้อย เพราะ % ซิลิกอนที่เหลือจะได้มาจากตอนเติม Innoculant เมื่อเหล็กหลอมเหลวได้อุณหภูมิ 1500 °ซ แล้วจึงเทออกจากเตาลงสู่ Ladle เติมสาร Innoculant ลงไป สาร Innoculant ตัวนี้ได้แก่ เฟอร์โร-ซิลิกอนจะช่วยให้เกิดกราไฟต์ละเอียดขึ้นและกระจายสม่ำเสมอ แล้วจึงเทลงสู่แบบหล่อที่ทำเตรียมไว้ ทิ้งเอาไว้จนเหล็กหล่อเย็นตัวแล้วจึงแยกเอาทรายออก รวมถึงแยกระบบจ่ายน้ำโลหะ (Gating system) แล้วนำไปขัดเจียร์เอาส่วนเกินของงานหล่อออกก็จะได้ชิ้นงานหล่อจึงเสร็จสิ้นกระบวนการ สำหรับการหล่อเหล็กหล่อเทา ตัวอย่างรูปชิ้นส่วนที่ผลิตโดยเหล็กหล่อเทา แสดงในรูปที่ 5.1

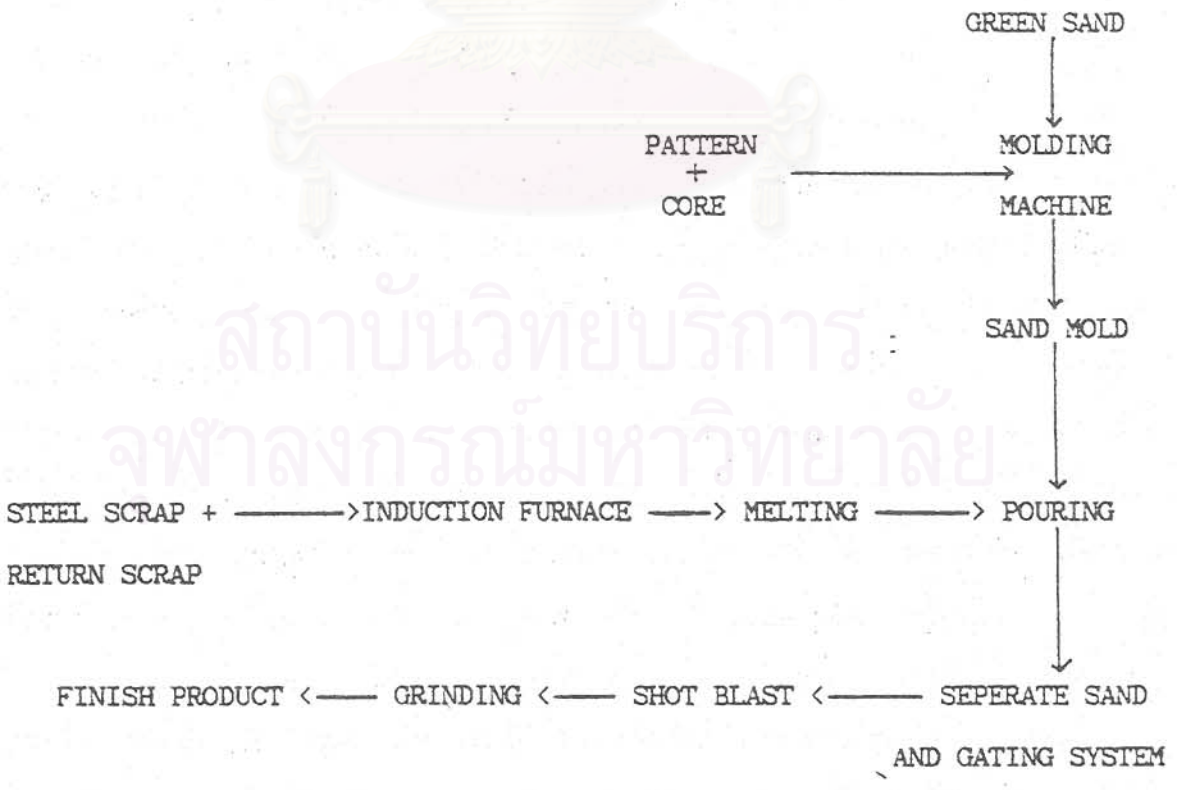
5.3.1.2 กระบวนการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลม



กระบวนการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมจะคล้ายคลึงกับเหล็กหล่อเทาแตกต่างกันตรงที่มีการเติมเฟอร์โร-แมกนีเซียมลงไปในเบ้า (พร้อมๆ กับการเติม Innoculant) เพื่อทำให้กราไฟต์ฟอร์มตัวเป็นรูปร่างกลม นอกจากนี้มีส่วนผสมของคาร์บอนและซิลิกอนที่ใส่แตกต่างจากเหล็กหล่อเทา นอกนั้นในกระบวนการจะเหมือนกันทุกประการ

การขึ้นรูปโดยการหล่อเป็นการขึ้นรูปโดยอาศัยแบบทรายที่ถูกอัดแน่นเป็นรูปร่างของชิ้นงานที่ต้องการมาเป็นตัวทำให้เกิดรูปร่างเมื่อเทน้ำเหล็กหลอมเหลวลงไป และปล่อยให้เย็นและแข็งตัวในแบบทราย ดังนั้นจึงสะดวกที่จะผลิตชิ้นงานที่รูปร่างซับซ้อน หรือถ้าเริ่มจากงาน กัดกลึงแล้วต้องกัดกลึงออกทำให้เสียเนื้อเหล็กมาก เพราะการหล่อจะได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างใกล้เคียงกับที่ต้องการ แต่มีข้อเสียคือ การควบคุมคุณภาพของเหล็ก เพราะงานหล่อมีองค์ประกอบที่มีผลกระทบจำนวนมากต่อโครงสร้างของเหล็กที่ได้ และการควบคุม Inclusion ในเนื้องาน และ % เสียอันเนื่องมาจาก Defect ของงานหล่อแบบต่างๆ

5.3.2 กระบวนการผลิตเหล็กกล้าต่างๆ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระบวนการผลิตเหล็กกล้าหล่อยังใกล้เคียงกับเหล็กหล่อแตกต่างกันที่เตาหลอมและส่วนผสมทางเคมี (Chemical composition) ซึ่งแตกต่างไปจากเหล็กหล่อ รวมทั้งเตาที่ใช้ก็จะใช้อุณหภูมิหลอมสูงกว่าเหล็กหล่อ (อุณหภูมิหลอมตัวของเหล็กกล้าจะสูงกว่าเหล็กหล่อ เพราะ % C ต่ำ ทำให้อุณหภูมิในการหลอมตัวสูงขึ้นเตาหลอมเหล็กกล้าจะใช้อุณหภูมิประมาณ 1700-1800 °ซ ส่วนเตาหลอมเหล็กหล่อจะใช้อุณหภูมิ 1500-1550 °ซ ทำให้เตาหลอมที่ใช้แตกต่างกันออกไป แต่ในกระบวนการอื่นๆ จะเหมือนกับกระบวนการผลิตเหล็กหล่อ

5.3.3 กระบวนการผลิตเหล็กกล้าชุบแข็ง

STEEL FOR CASE HARDENNING —>FORGING —>MACHINING —>CASE HARDENING

FINISH PRODUCT <— GRINDING <— TEMPERING <— QUENCHING

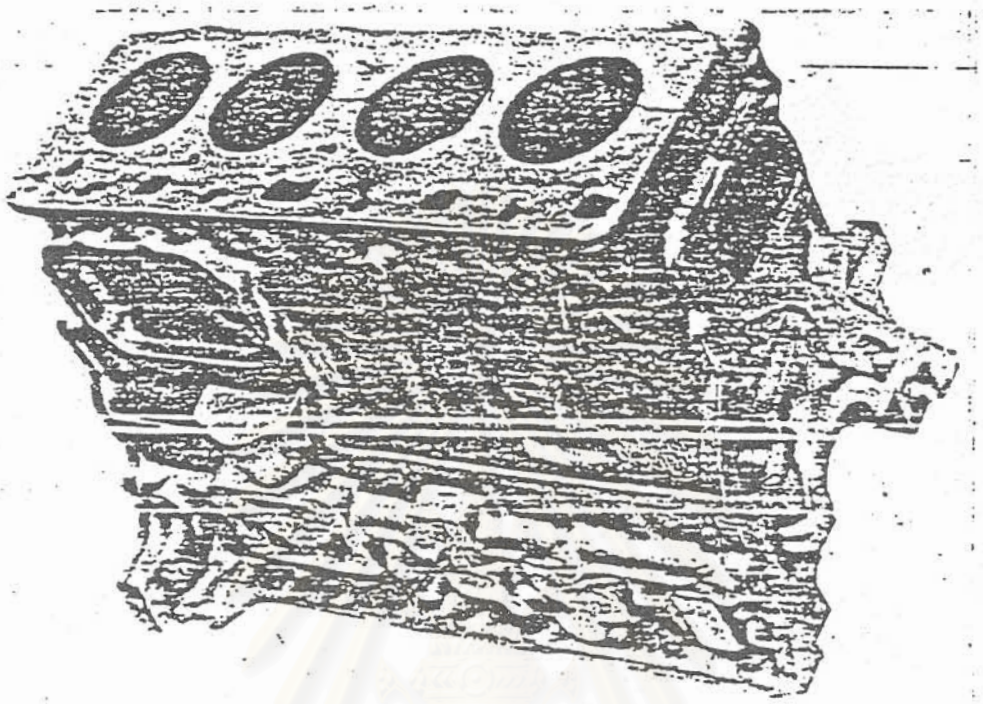
การผลิตชิ้นส่วนรถยนต์โดยใช้เหล็กกล้าชุบแข็ง จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนๆ นั้น จะได้แก่ เพลา เกียร์ ข้อต่อส่งกำลัง ซึ่งโดยกระบวนการผลิตจะไม่แตกต่างกัน มักเริ่มจากนำเหล็กกล้าผสมต่ำที่เหมาะสมกับการชุบแข็งนำมาขึ้นรูปโดยใช้แรงกระทำ เช่น Forging (Hot and Cold) โดยก่อนนำมาขึ้นรูปจะต้องมีการตัดเหล็กให้มีขนาดที่เหมาะสมก่อน เมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว จะนำมาผ่านการกัดกลึงให้ได้รูปร่างใกล้เคียงกับที่ต้องการ เพราะชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น เกียร์ เพลา ข้อต่อนั้น ต้องมีขนาดแน่นอนและรูปร่างมักจะยุ่งยาก ต่อการขึ้นรูปโดยใช้แรงกระทำอย่างเดียว จากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการชุบแข็ง (Heat treatment) ซึ่งกระบวนการชุบแข็งเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกลนี้ อาจจะแตกต่างกันไปบ้างเล็กน้อย เช่น อาจไม่มีการทำ Case Hardening โดยทำ Quenching เลยก็ได้ขึ้นกับชนิดและเกรดเหล็กที่ใช้ ถัดจากขั้นตอน Quenching แล้วต่อไปเป็นขั้นตอน Tempering ซึ่งทำเพื่อลดปัญหา ความเครียดตกค้างอันเนื่องมาจากการอบชุบแข็ง จากนั้นจึงนำไป Grinding อีกครั้งเพื่อให้ ชิ้นส่วนมีขนาดได้ตามต้องการ เพราะกระบวนการ Heat Treatment จะทำให้ Dimension เปลี่ยนไป

สำหรับการขึ้นรูปเฟืองที่มีรูปร่างง่ายๆ เช่น เฟืองฟันตรง เฟืองฟันใน อาจจะทำการกัดเฟืองจากแท่งเหล็กรูปทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของชิ้นงานที่ต้องการเพียงเล็กน้อย โดยการกัดฟันยาวไปตลอดทั้งท่อนแล้วค่อยตัดแบ่งเป็น

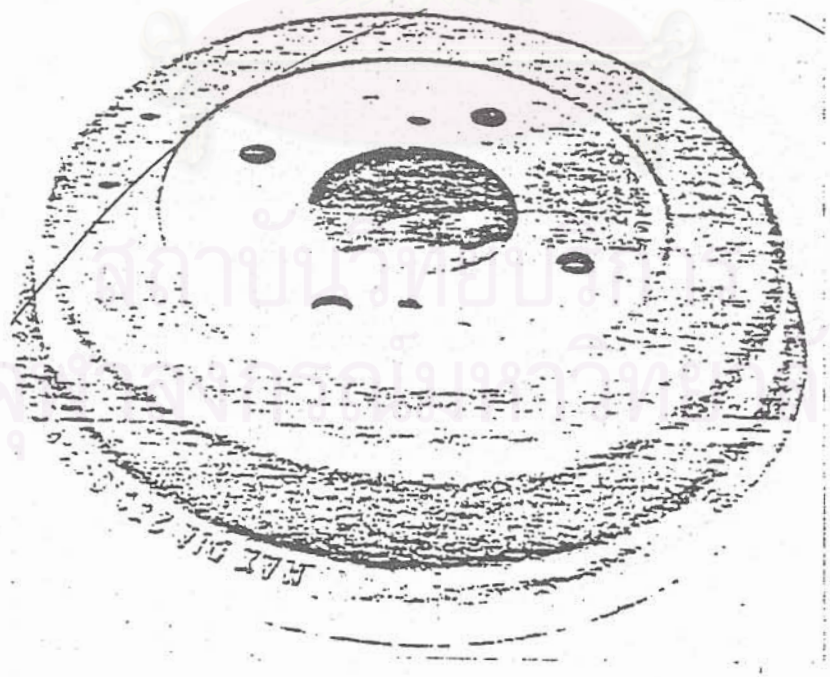
เฟืองย่อยอีกครั้ง จะนำได้สะดวกและปริมาณมากๆ รวดเร็วเหมาะกับการผลิตเฟืองรูปร่างง่ายๆ รูปร่างใกล้เคียงกับทรงกระบอกและมีขนาดเล็กๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.1 ชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็กหล่อเทา



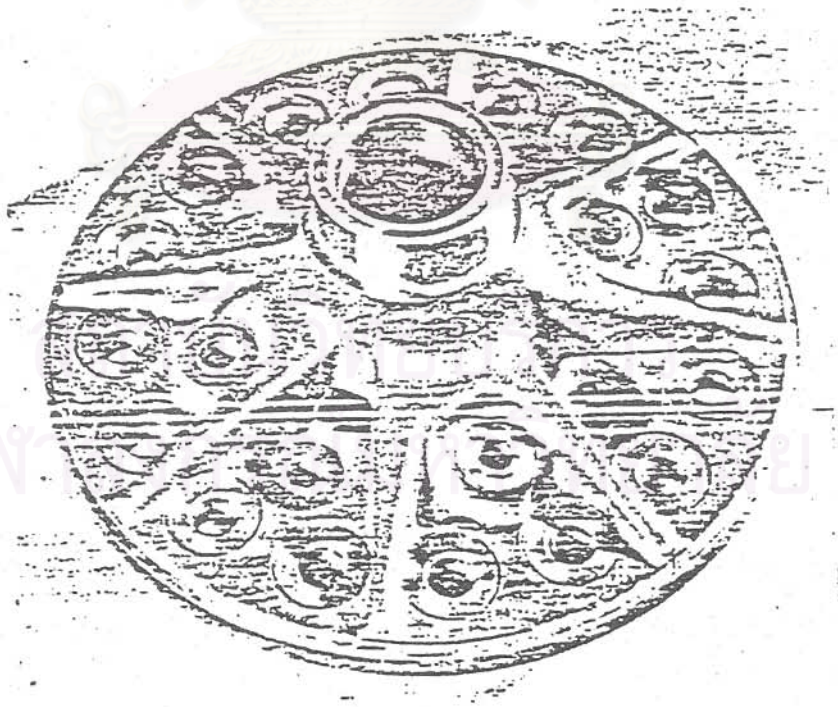
ก. Cylinder housing (เสื้อสูบ) วัสดุ FC 25



ข. Drum brake (ดรัม เบรค) วัสดุ FC 25

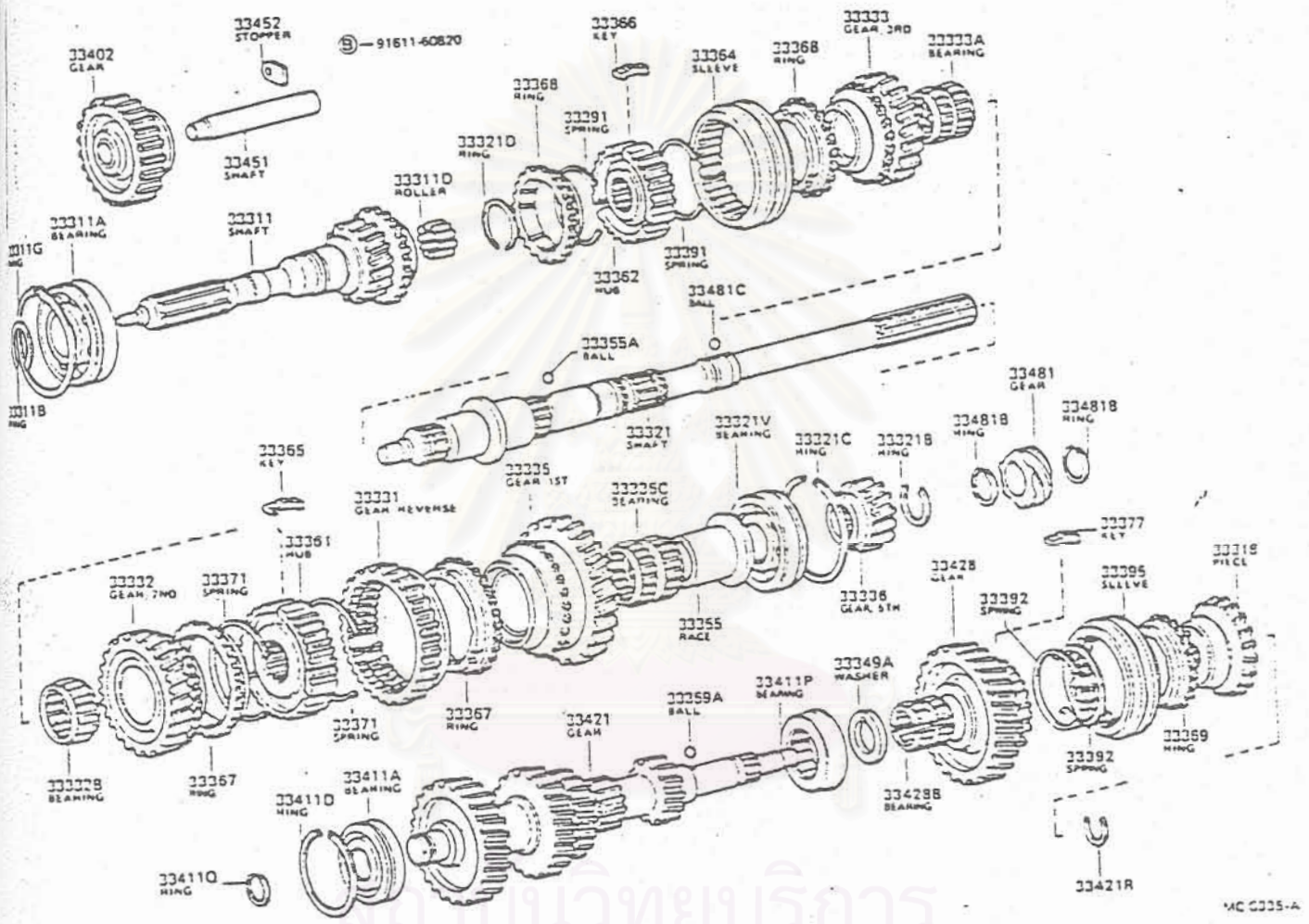
รูปที่ 5.2 ชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็กหล่อกราไฟต์กลม

ก. Crank Shaft (เพลาข้อเหวี่ยง) วัสดุ FCD 50, 70



ข. Clutch plate (แผ่นกดคลัตช์) วัสดุ FC 25, FCD 45, 50

รูปที่ 5.3 ก. ชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็กกล้าชุบผิว

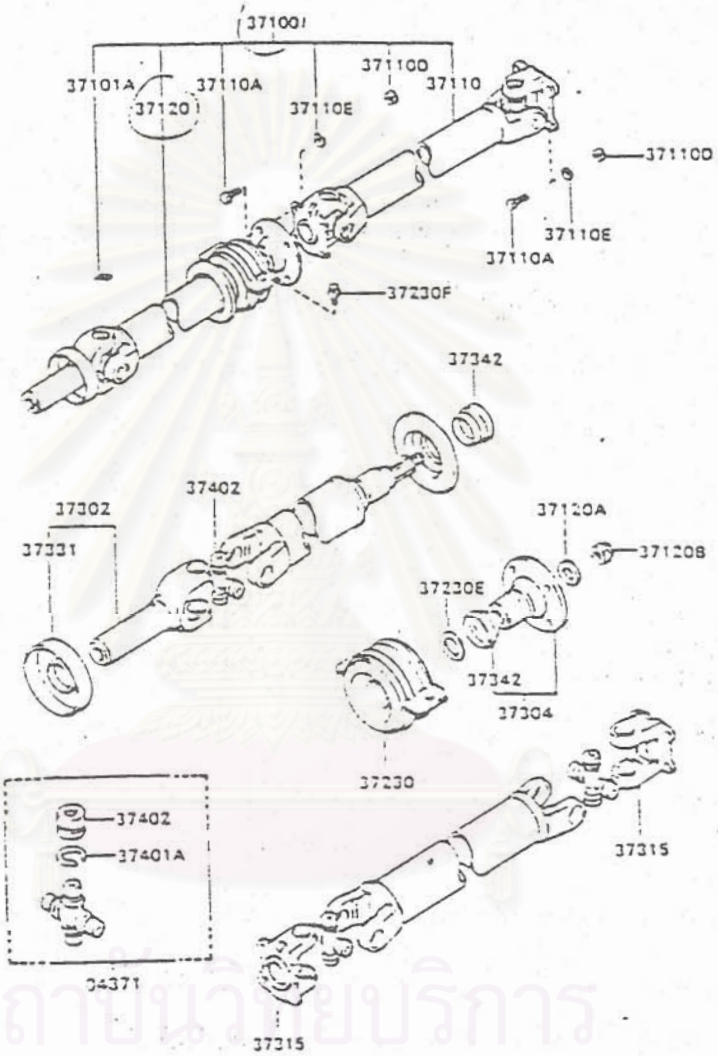


Transmission Gear (เฟืองในระบบถ่ายทอดกำลัง) วัสดุ SCM 415, 420

Shaft (เพลา) วัสดุ SCR 415, 420

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.3 ข. ชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็กกล้าชุบแข็ง



Universal Joint (ข้อต่อส่งกำลัง) วัสดุ SCR 415, 420

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
การวิเคราะห์เชิงเทคนิค

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบในเชิงเทคนิคระหว่างเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์ กับวัสดุเดิมที่ใช้ผลิตอยู่ ซึ่งในหัวข้อที่ผ่านมาแล้วได้แยกออกเป็น 3 หมวด คือ 1. เหล็กหล่อ 2. เหล็กกล้าชุบแข็ง 3. เหล็กกล้าหล่อ ในหัวข้อนี้จึงจะกล่าวถึงการเปรียบเทียบในเชิงเทคนิคกับ 3 กลุ่มนี้

6.1 เปรียบเทียบเชิงคุณสมบัติทางกล

เกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลนี้ ในรถยนต์ต้องการชิ้นส่วนที่มีน้ำหนักเบา แต่สามารถรับแรงกระทำได้มาก ดังนั้นถ้าเราเลือกใช้เหล็กที่มีคุณสมบัติทางกลสูงกว่า ก็จะทำให้สามารถลดขนาดของชิ้นส่วนลงได้ อันเป็นผลต่อเนื่องทำให้น้ำหนักของตัวรถเบาลง ทำให้สามารถใช้เครื่องยนต์ที่กำลังต่ำลงได้ เป็นการประหยัดพลังงานอีกส่วนหนึ่งด้วย ในหัวข้อจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลเท่านั้น จะไม่รวมองค์ประกอบพิจารณาอื่นๆ

6.1.1 เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กหล่อเทา (FC 20, FC 25)

เหล็กหล่อเทาเป็นเหล็กหล่อที่มีคุณสมบัติทางกลค่อนข้างต่ำ แต่มีความแข็งดีพอสมควร ค่อนข้างเปราะ (ดีกว่าเหล็กหล่อขาวแต่ด้อยกว่าเหล็กหล่อกราไฟต์กลม และเหล็กกล้า) คุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์ แสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์

	เหล็กหล่อเทา	เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์
HARDNESS (HB)	180-240	300-400
TENSILE STRENGTH (MPA)	220-270	850-1100
% ELONGATION	1-3%	5-9%

จากตารางคุณสมบัติทางกลจะเห็นว่า เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์มีคุณสมบัติทางกลในทุกๆ ด้านดีกว่าเหล็กหล่อเทา พิจารณาดูในด้านความแข็งที่เป็นคุณสมบัติที่ค่อนข้างเด่นของเหล็กหล่อเทา จะพบว่าความแข็งของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมดีกว่า และยังมีความ

เหนียวที่ดีกว่าอีกด้วย (พิจารณาจาก % ELONGATION ที่สูงกว่า) จึงสรุปได้ว่าในเชิงคุณสมบัติทางกล แล้วสามารถใช้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์แทนเหล็กหล่อเทาได้ และดีกว่าใช้เหล็กหล่อเทาในทุกๆ ด้านของคุณสมบัติทางกล

6.1.2 เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กหล่อกราไฟต์กลม (พื้นเฟอร์ไรท์หรือเพิร์ไลท์)

เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้าง เพิร์ไลท์หรือเฟอร์ไรท์ มีคุณสมบัติทางด้านการรับแรงกระทำดีกว่าเหล็กหล่อเทา และคุณสมบัติทางด้านความเหนียวดีกว่า แต่ความแข็งใกล้เคียงกัน คุณสมบัติทางกลแยกตามเกรดเหล็กของเหล็กหล่อกราไฟต์กลม แสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อกราไฟต์กลม และเหล็กกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์

	FCD 40	FCD 50	FCD 70	เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์
HARDNESS (HB)	201 max	170-241	229-302	300-400
TENSILE STRENGTH (MPA)	400 min	500 min	700 min	850-1100
% ELONGATION	12 min	7 min	2 min	5-9%

จากตารางคุณสมบัติทางกล จะพบว่าค่าความแข็งและความทนทานต่อแรงดึงของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์จะสูงกว่าเหล็กหล่อกราไฟต์กลมธรรมดา (พื้นโครงสร้างเพิร์ไลท์หรือเฟอร์ไรท์) มาก ในขณะที่ % ELONGATION ใกล้เคียงกับเหล็กหล่อ FCD 50, 70 และต่ำกว่า FCD 40 อยู่บ้าง ทำให้ยังสามารถรับแรงกระแทกได้ค่อนข้างดี ไม่เปราะแตกร้าวง่าย ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนๆ นี้ ว่าเราแบ่งกลุ่มชิ้นส่วนรถยนต์ที่ทำจากเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเป็น 4 กลุ่มคือ 1. HOUSING ต่างๆ 2. CRANKSHAFT 3. BRACKET 4. EXHAUST MANIFOLD ต่อไปนี้จะกล่าวถึงความเหมาะสมในเชิงคุณสมบัติทางกลของทั้ง 4 กลุ่มชิ้นส่วนนี้

1. กลุ่ม HOUSING ต่างๆ ทำด้วย FCD 40, 50 ซึ่งเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลกับเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์ จะพบว่าทางด้านความแข็งและความทนทานต่อแรงดึง FCD 40, 50 ด้อยกว่า แต่ทางด้านความเหนียวแล้ว FCD 40, 50 ดีกว่าบ้าง

พิจารณาจากคุณสมบัติทางกลโดยรวมแล้ว สามารถใช้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ทดแทนได้ใกล้เคียงกันในด้านคุณภาพ เพราะพวก HOUSING ต่างๆ ไม่ได้รับแรงกระทำมากนัก แต่ควรมีความเหนียวดี การใช้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์ทดแทนจึงไม่ได้ทำให้คุณภาพดีขึ้นมากมายนัก เพราะพวก HOUSING ต่างๆ ก็มีอายุการใช้งานปกติยาวนานอยู่แล้ว จึงสรุปว่าสามารถใช้งานทดแทนได้ แต่ไม่จำเป็นเปลี่ยนแปลง เพราะไม่ได้ทำให้คุณภาพดีขึ้นมากนัก

2. กลุ่มเพลาข้อเหวี่ยง (CRANKSHAFT) ทำจากเหล็กหล่อ FCD 70 เป็นชิ้นส่วนจักรกลที่ถ่ายทอดกำลังจากลูกสูบรถยนต์ไปสู่ระบบเพลาและเฟืองต่างๆ เป็นชิ้นส่วนจักรกลที่ต้องการรับแรงกระทำสูงๆ ทั้งแรงดึง แรงกด แรงเฉือน แรงกระแทก รวมทั้งรับแรงกระทำเป็นรอบๆ มีการเปลี่ยนทิศทางแรงกระทำตลอดเวลา (Cyclic load) รวมถึงต้องการความเหนียวที่ดี ไม่เปราะแตกร้าวง่าย เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลแล้ว ทางด้านความแข็งและความทนทานต่อแรงดึง เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ดีกว่า FCD 70 ความเหนียวอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน และความทนทานต่อความล้า (Fatigue strength) ดีกว่า (Fatigue strength หาได้จาก 30% ของ Tensile strength) การใช้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ จะทำให้ชิ้นส่วนมีความแข็งแรงทนทานเพิ่มขึ้น เพิ่มความปลอดภัยและความมั่นใจแก่ชิ้นส่วนจักรกล รวมทั้งทำให้สามารถลดขนาดของชิ้นส่วนลงได้ ทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้เต็มประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เป็นการประหยัดพลังงานจึงเหมาะสมอย่างยิ่งในเชิงคุณสมบัติทางกลที่จะนำมาใช้ทดแทน

3. BRACKET เป็นชิ้นส่วนที่ยึดชิ้นส่วนจักรกล ทำจาก FCD 50 มักเป็นชิ้นส่วนที่มี Wall Thickness บางๆ จึงต้องใช้ชิ้นส่วนที่รับแรงกระแทกได้ดี จากคุณสมบัติทางกลเปรียบเทียบกันแล้ว สามารถนำเหล็กกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์มาใช้ทดแทนได้

4. EXHAUST MANIFOLD ทำจากเหล็กเกรด FCD 40, 50 ลักษณะเช่นเดียวกับกลุ่ม HOUSING ต่างๆ ทุกประการ จากการพิจารณาเชิงคุณสมบัติทางกลซึ่งเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์ มีความแข็งและความทนทานต่อแรงดึงดีกว่า แต่ความเหนียวอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน (% ELONGATION ใกล้เคียงกัน) สรุปได้ว่า สามารถใช้ทดแทนได้ แต่ไม่ทำให้คุณภาพดีขึ้น เพราะชิ้นส่วนนี้ไม่ได้รับแรงกระทำหรือการเสียดสีอะไรมากมายนัก เหล็กหล่อกราไฟต์กลมขนาด FCD 40, 50 ก็มีคุณสมบัติเพียงพอต่อการรับแรงกระทำเหล่านี้อยู่แล้ว

6.1.3 เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กกล้าชุบแข็ง

เหล็กกล้าชุบแข็งวัสดุที่รับแรงกระทำได้สูง มีความแข็งสูง ทนต่อการเสียดสีได้ดี

ในชิ้นส่วนของรถต่างๆ จะใช้เหล็กกล้าชุบแข็งทำ เฟือง เพลา ข้อต่อต่างๆ คุณสมบัติทางกล แสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าชุบแข็งและเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์

	เหล็กกล้าชุบแข็ง	เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์
HARDNESS (HB)	220-420	300-400
TENSILE STRENGTH (MPA)	750-1300	850-1100
% ELONGATION	8-15%	5-9%

จากตารางคุณสมบัติทางกล (ตารางที่ 6.3) จะพบว่า ค่า HARDNESS และ TENSILE STRENGTH อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน ส่วนค่า % การยืดตัว (%ELONGATION) เหล็กกล้าชุบแข็งจะดีกว่า แต่ค่า % การยืดตัวของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ก็ยังพอเพียงต่อการนำไปใช้งาน เพราะชิ้นงานยังมีความเหนียวค่อนข้างดีไม่เปราะแตกร้าวง่าย พิจารณาจากคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกัน แต่เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์มีข้อได้เปรียบบางประการคือเหล็กกล้าชุบแข็งจะมีความแข็งสูงเฉพาะที่ผิวเท่านั้น ซึ่งเป็นเพียงผิวบางๆ ถ้าหากพื้นผิวแข็งนี้หมดไปแล้วนั้น ผิวด้านในจะอ่อน ทำให้เมื่อใช้งานที่ได้รับการเสียดสีจะเกิดการเสียหายได้รวดเร็ว เช่น เฟืองต่างๆ ที่มีการเสียดสีของผิวสัมผัสตลอดเวลา โดยเฉพาะในเฟืองขนาดใหญ่ๆ หรือข้อต่ออ่อน (SPIDER KID ใน UNIVERSAL JOINT) ขนาดใหญ่ของพวกรถบรรทุกจะพบผลรุนแรงขึ้น เพราะแรงกระทำและแรงบดในการเสียดสีมากขึ้น แต่ผิวมีความแข็งเท่าเดิม (วัสดุเดิมความแข็งเท่าเดิม) ทำให้ความเสียหายเมื่อชั้นผิวแข็งหมดไปแล้วรุนแรงขึ้นอีก เป็นข้อได้เปรียบอีกประการของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ ที่มีต่อเหล็กกล้าชุบแข็ง สรุปแล้วในเชิงคุณสมบัติทางกลเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์ สามารถนำมาใช้ทดแทนเหล็กกล้าชุบแข็งได้ นอกจากนี้แล้วเหล็กหล่อ ยังมีข้อได้เปรียบเหล็กกล้าตรงที่ คุณสมบัติทางกลเท่ากันในทุกทิศทาง (ความทนทานต่อแรงกระทำ) แต่เหล็กกล้าจะมีคุณสมบัติรับแรงได้สูงในทิศทางของแรงกระทำชิ้นรูปเท่านั้น ส่วนในทิศทางอื่นคุณสมบัติในการรับแรงจะด้อยกว่า ในชิ้นส่วนเช่น เฟือง เพลา ข้อต่อ ซึ่งรับแรงกระทำในหลายทิศทาง จึงสามารถใช้เหล็กหล่อทำได้ นอกจากนี้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์มีกราไฟต์กระจัดกระจายอยู่ในโครงสร้าง ทำให้ผิวลื่นลดการเสียดทานของผิว

สัมผัสลงไปได้ ทำให้ความเสียหายจากการสูญเสียเนื้องานลดลงไปได้ เป็นข้อดีอีกส่วนหนึ่งของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ในการทำชิ้นส่วนเหล่านี้

6.1.4 เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กกล้าหล่อ

เหล็กกล้าหล่อเป็นเหล็กหล่อที่มีคุณสมบัติทางด้านการรับแรงกระทำดี มีความเหนียวดี (%ELONGATION สูง) ความแข็งอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับเหล็กหล่อเทา และเหล็กหล่อกราไฟต์กลมคุณสมบัติจะใกล้เคียงกับเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเพิร์ไลท์หรือเฟอร์ไรท์มาก แต่ความเหนียวและ % การยืดตัวจะดีกว่า คุณสมบัติทางด้านการรับแรงกระทำจะดีกว่าเล็กน้อย การใช้งานจะใช้งานในลักษณะเช่นเดียวกับเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเพิร์ไลท์หรือเฟอร์ไรท์ ในชิ้นส่วนรถยนต์มีการใช้เหล็กกล้าหล่อ 2 เกรดคือ SC 48 และ SCP 28 ซึ่งใช้ทำชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อน และมีการรับแรงกระแทกหรือความหนางานไม่มาก ต้องการคุณสมบัติด้านความเหนียวที่ดี คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าหล่อทั้ง 2 เกรดที่ใช้แสดงในตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 คุณสมบัติของเหล็กกล้าหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์

	SC 48	SCP 28	เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์
HARDNESS (HB)	200-270	200-270	300-400
TENSILE STRENGTH (MPA)	450-550	500-600	850-1100
% ELONGATION	12-17%	15-20%	5-9%

โดยปกติจะใช้งานลักษณะเดียวกับเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเพิร์ไลท์หรือเฟอร์ไรท์ ซึ่งแต่เดิมแล้วชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน มักจะเลือกใช้เหล็กกล้าหล่อทั้งสิ้น แต่เมื่อมีการค้นพบเหล็กหล่อกราไฟต์กลมที่ผลิตได้ง่ายและปัญหาน้อยกว่า คุณสมบัติใกล้เคียง จึงมีการนำมาใช้ทดแทน แต่บางชิ้นส่วนที่รับแรงกระแทก มีการสั่นสะเทือนมากๆ ก็ยังนิยมใช้เหล็กกล้าหล่ออยู่ เช่น CLUTCH COVER, CLUTCH PLATE, FLYWHEEL RING GEAR ฯลฯ ดูจากคุณสมบัติทางกลแล้วทางด้านความเหนียวเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์ด้อยกว่าอยู่บ้าง การใช้งานทดแทนจึงไม่ค่อยเหมาะสมนักสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนหล่อ แต่สามารถใช้ทดแทนเหล็กกล้าหล่อผสมต่ำได้ คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าหล่อผสมต่ำ แสดงในตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าหล่อผสมต่ำ และเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์

	เหล็กกล้าหล่อผสมต่ำ	เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์
HARDNESS (HB)	220-350	300-400
TENSILE STRENGTH (MPA)	600-1200	850-1100
% ELONGATION	7-12%	5-9%

กลุ่มเหล็กกล้าหล่อผสมต่ำที่เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ สามารถทดแทนได้นั้น จะเป็นเหล็กกล้าหล่อผสมต่ำที่นำไปปรับปรุงคุณสมบัติโดยการชุบแข็ง ซึ่งพิจารณาจากตารางคุณสมบัติทางกลแล้ว สามารถใช้ทดแทนกันได้ เหล็กกล้าหล่อผสมต่ำมักใช้ทำชิ้นส่วนที่รับแรงสูงๆ มีการเสียดสีรูปร่างยากๆ เช่นข้อต่อบางชิ้น CLUTCH PLATE สลักและ BRACKET ต่างๆ เฟืองบางแบบ ฯลฯ ซึ่งมักจะใช้ในรถขนาดใหญ่ๆ มากกว่า

6.2 เปรียบเทียบความยากง่ายในการผลิต

องค์ประกอบประการที่ 2 ที่พิจารณาในแง่การวิเคราะห์เชิงเทคนิคได้แก่ การเปรียบเทียบกรรมวิธีในการผลิตของแต่ละกลุ่ม โดยจะวิเคราะห์ถึงกระบวนการ และขั้นตอนในการผลิตความยุ่งยาก รวมถึงการใช้เครื่องจักร โดยจะพิจารณาในแง่ความเป็นไปได้ในการผลิตในประเทศไทยเป็นหลัก

ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมาถึงกระบวนการผลิตของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์ และ 4 กลุ่มวัสดุที่ทางกลุ่มวิจัยตั้งเป้าหมายทดแทนไว้ ในหัวข้อนี้จึงจะกล่าวถึงในเชิงเปรียบเทียบทีละกลุ่มต่อไป

6.2.1 เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กหล่อต่างๆ

การผลิตเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์และเหล็กหล่อเทามีกระบวนการผลิตที่เหมือนๆ กัน เพราะเป็นประเภทของเหล็กหล่อผสมต่ำเช่นเดียว สามารถผลิตได้โดยใช้เตาผลิตเหล็กหล่อธรรมดาทั้งคู่ (Cupola furnace, Induction furnace) โดยเฉพาะในเหล็กหล่อกราไฟต์กลมที่ผสม %Ni และ Mo พอเหมาะที่ให้โครงสร้างเบไนต์ทั้งหมดได้โดยไม่ต้องทำการชุบแข็ง (Austempering) จะมีกระบวนการผลิต เช่นเดียวกับ

เหล็กหล่อเทาทุกประการ ซึ่งทำให้ในโรงงานผลิตเหล็กหล่อเทาทั่วไปก็สามารถทำการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์ได้เช่นกัน แต่อาจต้องมีอุปกรณ์ควบคุมตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีเพิ่มขึ้น เช่น Spectrometer ที่สามารถตรวจสอบ % ส่วนผสมของ Ni, Mo ได้ เพราะโรงงานผลิตเหล็กหล่อเทาในประเทศบางโรงงานยังใช้เครื่องมือตรวจสอบแบบเก่า เช่น C.E.METER ที่สามารถตรวจสอบได้เฉพาะปริมาณ C และ Si เท่านั้น

6.2.2 เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กหล่อกราไฟต์กลม

เช่นเดียวกับเหล็กหล่อเทา เพราะเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อกราไฟต์กลม มีกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่างๆ เหมือนกันแตกต่างเพียงส่วนประกอบทางเคมีเท่านั้น ดังนั้นเกี่ยวกับกระบวนการผลิตของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์ และพื้นเพิร์ไลท์หรือเฟอร์ไรท์จึงเหมือนกัน

6.2.3 เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กกล้าหล่อ

กระบวนการผลิตเหล็กกล้าหล่อและเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์จะใกล้เคียงกันจะแตกต่างกันตรงที่ส่วนผสมทางเคมี และเตาหลอมของเหล็กกล้าหล่อจะใช้อุณหภูมิสูงกว่าเหล็กหล่อ ส่วนกระบวนการอื่นๆ จะเหมือนกัน และในประเทศไทยก็มีโรงงานผลิตเหล็กกล้าหล่ออยู่แล้ว แต่การผลิตเหล็กกล้าหล่อจะมีปัญหาทางด้านเทคนิคบางประการ คือการไหลตัวของเหล็กกล้าหล่อจะด้อยกว่าเหล็กหล่อ และมีการหดตัวสูงกว่า ทำให้ในการผลิตต้องมีการควบคุมมากกว่ารวมถึงการควบคุม %C ซึ่งมีค่าต่ำ จะทำให้ควบคุมได้ยากกว่าเหล็กหล่อ แต่ในด้านขั้นตอนการผลิตแล้วเหมือนๆ กัน

6.2.4 เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กกล้าชุบแข็ง

จากกระบวนการผลิตของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์ และเหล็กกล้าชุบแข็ง จะพบว่าขั้นตอนจะแตกต่างกันมากทั้งทางด้านการขึ้นรูป การปรับปรุงคุณภาพวัตถุดิบ เครื่องจักรกล ฯลฯ จึงจะเปรียบเทียบความแตกต่างแต่ละขั้นตอนออกเป็นตาราง เปรียบเทียบดังในตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 การเปรียบเทียบความแตกต่างในการผลิตระหว่างเหล็กกล้าชุบแข็งและเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์

กรรมวิธี	เหล็กกล้าชุบแข็ง	เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์	ข้อได้เปรียบของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์	ข้อเสียเปรียบของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์
1. การขึ้นรูป	การขึ้นรูปโดยใช้แรงกระทำ เช่น FORGING, ROLLING	ขึ้นรูปโดยกรรมวิธีการหล่อ	ทำได้แม้รูปร่างจะยุ่งยาก ซับซ้อนไม่สิ้นเปลืองเนื้อเหล็ก	ควบคุมการผลิตยาก คุณภาพไม่แน่นอน ลงทุนสูง
2. การปรับปรุงคุณสมบัติ	กระบวนการอบชุบด้วยความร้อน (Heat treatment)	การเติมสารผสม การอบชุบด้วยความร้อน	สามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ง่าย อาจไม่ต้องทำการอบชุบแต่เติมธาตุผสมเป็นการลดขั้นตอนการผลิต	ควบคุมคุณภาพได้ยากกว่าเหล็กกล้า
3. วัตถุดิบ	เหล็กกล้าผสมต่ำ	เศษเหล็ก, เหล็กดิบ, ธาตุผสม	วัตถุดิบหาได้ง่าย ราคาถูก	ลดขั้นตอนยุ่งยากในการจัดการพวกวัตถุดิบต่างๆ
4. เครื่องจักรกล	เครื่องจักรกลขนาดเล็ก	เครื่องจักรกลขนาดใหญ่	ทำได้ปริมาณรวดเร็วต้นทุนต่ำ	ลงทุนสูงในครั้งแรก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ในด้านการขึ้นรูป สำหรับเหล็กหล่อกราไฟต์กลม ซึ่งขึ้นรูปโดยกรรมวิธีการหล่อจะควบคุมการผลิต โดยเฉพาะด้านคุณภาพได้ยากกว่าเหล็กกล้า ซึ่งใช้เหล็กกล้าสำเร็จรูปมาผ่านกรรมวิธีการขึ้นรูปโดยใช้แรงกระทำ แต่สำหรับเหล็กหล่อจะสามารถผลิตได้หลากหลายในกรณีที่งานรูปร่างต่างๆ กัน แต่กรรมวิธีผลิตเหล็กจะทำได้เพียงรูปร่างไม่มากนักในเครื่องจักร 1 เครื่อง (เซ็ท)

- การปรับปรุงคุณสมบัติทางกล เหล็กกล้าชุบแข็งจะใช้กรรมวิธีการอบชุบความร้อน (Heat treatment) ส่วนเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ จะสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้โดยการเติมสารผสม (Ni และ Mo) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ นอกเหนือจากกรรมวิธีการอบชุบด้วยความร้อนที่ทำได้ทั้งเหล็กกล้าและเหล็กหล่อ แต่มีข้อแตกต่างประการหนึ่งคือ เหล็กหล่อจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันทั้งก้อน มากกว่าเหล็กกล้าที่มีความแข็งสูงเฉพาะผิว และรับแรงกระทำได้ดีในทิศทางการขึ้นรูป

- วัตถุดิบ สำหรับเหล็กกล้าที่ผลิตสำเร็จรูปนำมาทำการขึ้นรูป ส่วนเหล็กหล่อจะใช้พวกวัตถุดิบ เช่น เศษเหล็ก เหล็กดิบ สารเคมี นำมาหลอมรวมปรับส่วนผสมทางเคมีให้ได้ตามต้องการ ซึ่งวัตถุดิบทางเหล็กหล่อจะถูกกว่า

- เครื่องจักรกล การผลิตเหล็กกล้าชุบแข็งจะใช้เครื่องมือในการขึ้นรูปขนาดเล็กแต่ต้องเพิ่มเครื่องมือในกระบวนการอบชุบด้วยความร้อน ซึ่งในเหล็กหล่ออาจไม่ใช้ก็ได้ แต่เครื่องจักรกลสำหรับการผลิตเหล็กหล่อเป็นเครื่องจักรกลขนาดใหญ่ต้องลงทุนเบื้องต้น แต่สามารถทำการผลิตงานได้มาก โดยต้นทุนทางด้านวัตถุดิบจะต่ำกว่า

สรุปแล้วการผลิตเหล็กกล้าและเหล็กหล่อมีกระบวนการผลิตแตกต่างกันมาก ในด้านการขึ้นรูปเหล็กกล้าจะยุ่งยากน้อยกว่าในกรณีที่งานรูปร่างง่ายๆ แต่ไม่สามารถทำงานได้หลากหลายเหมือนอย่างงานหล่อ และถ้าในกรณีชิ้นงานรูปร่างยุ่งยากซับซ้อน การผลิตเหล็กหล่อจะลดขั้นตอนได้อย่างมาก เมื่อเทียบกับการผลิตเหล็กกล้า แต่การเตรียมวัตถุดิบของการผลิตเหล็กหล่อจะมากกว่าเหล็กกล้า ซึ่งใช้เหล็กสำเร็จรูป แต่การสูญเสียเนื้อโลหะไปในการผลิตจะน้อยกว่าเหล็กกล้า เพราะเนื้อโลหะที่สูญเสียไปในงานหล่อสามารถนำกลับมาหลอมผลิตได้ใหม่ รวมทั้งงานที่เสีย เนื่องจากการผลิตด้วย และการลงทุนเบื้องต้นจะสูงสำหรับเหล็กหล่อและใช้เครื่องจักรกลขนาดใหญ่ และการควบคุมคุณภาพของงานหล่อจะไม่แน่นอนเท่าเหล็กกล้า

สำหรับการผลิตเหล็กกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ เพื่อทดแทนเหล็กกล้าชุบแข็งควรจะเลือกใช้ส่วนผสมที่ต้องทำ ออสเทมเปอร์ริ่ง เพราะชิ้นส่วนในหมวดนี้จะมีการกัดกลึงเกือบทั้งชิ้น ถ้าใช้ส่วนผสมที่ได้โครงสร้างพื้นฐานเป็นเบไนต์ในสภาพหล่อ จะทำให้กัดกลึงงานลำบากอาจจะต้องใช้มีดกลึงเกรดพิเศษที่แข็งมากๆ อาจจะต้องใช้ความเร็วต่ำๆ อัตราการป้อนช้า ทำให้ต้นทุนทางด้านการกัดกลึงสูง ซึ่งสำหรับเหล็กกล้าชุบแข็งจะทำการกัดกลึงให้ได้ขนาดใกล้เคียงมาก่อนแล้วจึงทำการอบชุบแข็ง จากนั้นจึงกลึงล้างผิวเพียงเล็กน้อย ค่าใช้จ่ายด้านกัดกลึงจึงไม่สูงนัก สำหรับเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ ควรจะเลือกใช้ส่วนผสมที่ไม่เป็นเบไนต์ที่สภาพหล่อ

นำมากัดกลิงให้ได้ขนาดใกล้เคียงแล้วทำ Austempering จากนั้นจึงนำไปกลิงล้างอีกครั้งจะทำให้ค่าใช้จ่ายถูกกว่า เพราะปัจจุบันค่าใช้จ่ายทางด้านกัดกลิงแพงกว่างานหล่ออยู่แล้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7
การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

ในการพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กหล่อ โดยการนำเอาวัสดุใหม่เข้าทดแทนวัสดุเดิม นอกจากจะพิจารณาถึงองค์ประกอบต่างๆ ของเหล็กหล่อ เช่น คุณสมบัติทางกล กรรมวิธีการผลิต ยังจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อประเมินคุณค่าของโครงการ ซึ่งโครงการวิจัยนี้ได้พิจารณาถึง อายุการใช้งานและต้นทุนการผลิต โดยทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบความเหมาะสมและความคุ้มค่าในการเลือกใช้วัสดุระหว่างเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ กับการผลิตเหล็กชนิดอื่นๆ

7.1 อายุการใช้งาน

อายุการใช้งานเป็นองค์ประกอบที่ช่วยในการตัดสินใจในการเลือกวัสดุที่จะนำมาผลิต โดยแสดงถึงความคุ้มค่าในการใช้งาน เช่นชิ้นส่วนรถยนต์หรือรถบรรทุกที่ต้องการความปลอดภัยสูง และการซ่อมแซมทำได้ยาก การตัดสินใจเลือกใช้วัสดุในกรณีที่ราคาต้นทุนของวัสดุต่างๆ ใกล้เคียงกัน ย่อมเลือกวัสดุที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า

ปัจจุบันนี้ ยังไม่มีข้อมูลที่แสดงอายุการใช้งานของชิ้นงานที่ทำจากเหล็กกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์และวัสดุอื่นๆ บางตัวเป็นตัวเลขที่แน่นอน เพราะอายุการใช้งานนอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุแล้ว ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น สภาพการใช้งานและการบำรุงรักษา แต่อาจสามารถเปรียบเทียบอายุการใช้งานของวัสดุต่างๆ ได้ดังตารางที่ 7.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.1 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบอายุการใช้งาน

ชิ้นส่วนและลักษณะการใช้งาน	เหล็กหล่อเทา	เหล็กหล่อกราไฟต์กลม	เหล็กกล้าหล่อ	เหล็กกล้าชุบแข็ง	เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์
1. ชิ้นส่วนที่มีการเสียดสี แต่รับแรงกระแทกไม่มากนัก (DRUM BRAKE, DISC BRAKE ฯลฯ)	0000	000	000	0000	00000
2. ชิ้นงานที่มีผนังบางๆ มีแรงกระแทกบ้าง ไม่รับแรงมากนัก (EXHAUST MANIFOLD)	0	0000	0000	0	000
3. ชิ้นงานที่รับแรงกระทำสูงๆ (เพลา)	0	00	00	0000	0000
4. ชิ้นงานที่รับแรงกระทำสูงๆ และมีการเสียดสีมาก (เช่น เฟืองข้อต่อ)	0	0	0	0000	0000
5. ชิ้นส่วนพวกที่เป็น COVER หรือ HOUSING ต่างๆ	000	0000	0000	0	

00000 ดีมาก
0000 ดี
000 พอใช้
00 ไม่ดี
o ใช้ไม่ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 7.1 จะเห็นได้ว่าอายุการใช้งานของชิ้นงานที่ทำจากวัสดุต่างๆ นั้นขึ้นอยู่กับ ลักษณะการใช้งาน การรับแรงกระทำ การเสียดสี ฯลฯ ซึ่งสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบการใช้วัสดุเดิมกับการใช้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ได้ดังนี้

7.1.1 การเปรียบเทียบกับเหล็กหล่อเทา

ตามปกติเหล็กหล่อเทาจะมีอายุการใช้งานนาน ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบเฉพาะกลุ่มชิ้นงานที่ทีจากเหล็กหล่อเทาที่อาจเกิดการสึกหรอ เนื่องจากการเสียดสี ซึ่งได้แก่ Drum Brake ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบแล้วพบว่า เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ ซึ่งมีความแข็งสูงกว่าเหล็กหล่อเทาประมาณ 100-150 HB และมีความเหนียวดีกว่า (% ELONGATION ดีกว่ามาก) จะทำให้อายุการใช้งานของ Drum Brake มากขึ้นประมาณ 2-4 ปี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน แต่มีข้อเสียคือ อายุการใช้งานของผ้าเบรคสั้นลง เนื่องจากความแข็งของหน้าสัมผัสสูงขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองผ้าเบรคมากกว่าปกติ

7.1.2 การเปรียบเทียบกับเหล็กหล่อกราไฟต์กลม

เหล็กหล่อกราไฟต์กลมมักใช้ทำชิ้นส่วนของ Housing ที่ต้องการความเหนียวและชิ้นส่วนที่ต้องการรับแรงกระแทกค่อนข้างมากของ Housing เหล็กหล่อกราไฟต์กลมทั้งพื้นเพิร์ไลท์และเบไนต์สามารถทนแรงกระแทกได้ดี โดยโครงสร้างเบไนต์จะมีคุณสมบัติเด่นกว่าโครงสร้างเพิร์ไลท์ทางด้านการรับแรงและความแข็งโครงสร้าง แต่มีคุณสมบัติด้อยกว่าในด้านความเหนียว และเมื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานของวัสดุทั้ง 2 ประเภทแล้ว พบว่าไม่มีความแตกต่างกันในชิ้นส่วน Housing ที่ไม่ได้รับแรงกระทำมากนัก แต่ในชิ้นส่วนที่รับแรงกระทำค่อนข้างมาก เช่น ข้อเหวี่ยง Bracket การใช้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ จะทำให้อายุการใช้งานยาวขึ้น เพราะสามารถรับแรงกระแทกได้มากกว่า แม้ว่าคุณสมบัติด้านความเหนียวจะด้อยกว่าก็ตาม

7.1.3 การเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าหล่อ

เหล็กกล้าหล่อและเหล็กหล่อกราไฟต์กลม จะใช้ในงานลักษณะเดียวกัน แต่เหล็กกล้าหล่อจะมีคุณสมบัติด้านความเหนียวดีกว่า ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ ทดแทนเหล็กกล้าหล่อในชิ้นงานบางประเภทที่มีความหนาของผนังไม่มาก และแตกร้าวง่าย ได้แก่ พวก Housing ต่างๆ ของระบบถ่ายทอดกำลัง ห้องเฟืองท้าย กระปุกเฟืองบังคับเลี้ยว เป็นต้น

7.1.4 การเปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กกล้าชุบแข็ง

เหล็กกล้าชุบแข็งเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ มีคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกัน ทั้งทางด้านการรับแรงกระทำและความแข็ง แต่แตกต่างกันตรงที่โครงสร้าง โดยเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ จะมีโครงสร้างเป็นเบไนต์ทั้งก้อน ส่วนเหล็กกล้าชุบแข็งจะมีความแข็งสูงบริเวณผิวเท่านั้น ทำให้เมื่อเกิดการสึกหรอที่ผิวไปแล้ว ผิวด้านในที่อ่อนกว่าจะมีการสึกหรออย่างรวดเร็ว ทำให้อายุการใช้งานสั้น อีกทั้งเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์มีกราไฟต์กระจัดกระจายอยู่ในโครงสร้าง ช่วยทำให้ผิวลื่นและมีการสึกหรอลดลง แต่มีข้อเสียเปรียบตรงที่การควบคุมคุณภาพทำได้ยากกว่าเหล็กกล้า

7.2 ต้นทุนการผลิต

ต้นทุนการผลิตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของการวิเคราะห์ เชิงเศรษฐศาสตร์ในการเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ เพราะถึงแม้ว่าวัสดุที่นำมาใช้มีอายุการใช้งานสั้นกว่า แต่ถ้ายอมเปลี่ยนใหม่เมื่อหมดอายุงานก็อาจคุ้มกว่าได้ ในการประเมินต้นทุนการผลิตนี้เป็นการคิดต้นทุนโดยประมาณ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการเปรียบเทียบได้ดังต่อไปนี้

7.2.1 ต้นทุนการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นโครงสร้างเบไนต์

เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ จากการทดลองมีส่วนผสมที่น่าสนใจ 2 แบบ คือ

1. ผสมนิกเกิล (Ni) 4% และโมลิบดินัม (Mo) 0.3% ซึ่งจะได้โครงสร้างเบไนต์ในสภาพหล่อ โดยไม่ต้องทำออสเทมเปอร์ริ่ง

2. ผสมนิกเกิล 1.8% โมลิบดินัม 0.3% แล้วทำออสเทมเปอร์ริ่งให้ได้โครงสร้างเบไนต์

จะเห็นได้ว่า แบบแรกนั้นไม่ต้องทำออสเทมเปอร์ริ่งจึงทำให้ขั้นตอนการผลิตลดลง แต่ราคาส่วนผสมทางเคมีนี้ค่อนข้างแพง ส่วนแบบที่ 2 แม้ว่ามีส่วนผสมของนิกเกิลและโมลิบดินัมน้อยทำให้ราคาส่วนผสมทางเคมีลดลงแต่มีการทำออสเทมเปอร์ริ่ง ดังนั้นจึงมีค่าใช้จ่ายทางด้านการผลิตเพิ่มขึ้น ในการพิจารณาการเลือกใช้วัสดุชนิดใดนั้นต้องทำการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตดังรายละเอียดต่อไปนี้

ส่วนผสมนิกเกิล 4% และโมลิบดีนั่ม 0.3%

ราคาเหล็กหล่อกราไฟต์กลม 30 บาท/กก.

ราคานิกเกิล (บริสุทธิ์) 450 บาท/กก.

ราคาเฟอร์โร-โมลิบดีนั่ม (Mo:72.52%) 225 บาท/กก.

เหล็ก 1 กิโลกรัม จะมีนิกเกิล 0.04 กรัมและโมลิบดีนั่ม 3 กรัม

นิกเกิล 40 กรัม คิดเป็นเงิน 18 บาท

โมลิบดีนั่ม 3 กรัม จะต้องใช้เฟอร์โร-โมลิบดีนั่ม 4.14 กรัม คิดเป็นเงิน 1 บาท

ดังนั้นต้นทุนเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ ส่วนผสม นิกเกิล 4% และโมลิบดีนั่ม 0.3% เท่ากับ 49 บาท/กก.

ส่วนผสมนิกเกิล 1.8% และโมลิบดีนั่ม 0.3%

เหล็ก 1 กิโลกรัม มีนิกเกิล 18 กรัม และ โมลิบดีนั่ม 3 กรัม

นิกเกิล 18 กรัม คิดเป็นเงิน 8.10 บาท

โมลิบดีนั่ม 3 กรัม ต้องใช้เฟอร์โร-โมลิบดีนั่ม 4.14 กรัม คิดเป็นเงิน 1 บาท

การทำการอบชุบออสเทมเปอร์ริ่ง คิดเป็นเงิน 20 บาท/กก.

ดังนั้นเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ส่วนผสมนิกเกิล 1.8% และโมลิบดีนั่ม 0.3% เท่ากับ 59.10 บาท/กก.

หมายเหตุ การผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ มีขั้นตอนการผลิตเหมือนการหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเพิร์ไลท์หรือเฟอร์ไรท์ เพียงแต่ส่วนผสมต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถคิดต้นทุน โดยอ้างอิงจากราคาเหล็กหล่อกราไฟต์กลม แล้วเพิ่มราคาส่วนผสมหรือราคาการอบชุบออสเทมเปอร์ริ่งเข้าไป

7.2.2 **ต้นทุนการผลิตเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อกราไฟต์กลม**

การคิดต้นทุนการผลิตของเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อกราไฟต์กลม ได้จากการสอบถามข้อมูลจากกลุ่มผู้ผลิตเหล็กหล่อให้กับบริษัทประกอบรถยนต์ ดังแสดงต่อไปนี้

ราคาเหล็กหล่อเทา 20 บาท/กก.

ราคาเหล็กหล่อกราไฟต์ 30 บาท/กก.

7.2.3 ต้นทุนการผลิตของเหล็กกล้าชุบแข็ง (เพลา, ข้อต่อ, เฟืองต่างๆ)

เหล็กกล้าชุบแข็งที่ใช้ทำชิ้นส่วนในระบบถ่ายทองกำลังมี 2 เกรด ได้แก่ SCM 415, 420 และ SCR 415, 420 โดยเกรด SCM มีโครเมี่ยมผสมอยู่ 0.9-1.2% และโมลิบดินั่ม 0.3-0.5% ส่วนเกรด SCR จะมีแต่โครเมี่ยมผสมอยู่ 0.9-1.2%

การคิดต้นทุนการผลิตของเหล็กกล้าชุบแข็ง มีดังนี้

เหล็กกล้าผสมต่ำ	40	บาท/กก.
การทำการอบชุบด้วยความร้อน (CASE HARDENING + ชุบน้ำมัน)	30-35	บาท/กก.

ดังนั้นราคาเหล็กกล้าชุบแข็งแต่ยังไม่รวมราคาการขึ้นรูป ประมาณ 70-75 บาท/กก.

ทั้งนี้ราคาการขึ้นรูปจะแตกต่างกันไปตามลักษณะชิ้นงาน โดยที่ถ้ารูปร่างชิ้นงานยุ่งยาก เช่น ข้อต่อต่างๆ ก็จะราคาสูง แต่ถ้าเป็นชิ้นงานรูปร่างไม่ซับซ้อน เช่น เฟืองและเพลา ราคาก็จะต่ำลงมา แต่ก็สามารถประเมินราคาเหล็กกล้าชุบแข็งรวมการขึ้นรูปได้ ประมาณ 120-200 บาท/กก.

หมายเหตุ การผลิตเหล็กกล้าชุบแข็ง ต้องใช้เหล็กกล้าผสมต่ำ ผ่านการอบชุบด้วยความร้อน แล้วจึงผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงกระทำ

7.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบการเลือกใช้วัสดุระหว่างเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์กับเหล็กชนิดอื่นๆ

การวิเคราะห์นี้จะทำการพิจารณาทั้งอายุการใช้งาน และต้นทุนการผลิตจากข้อมูลในหัวข้อ 7.1 และ 7.2

7.3.1 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับเหล็กหล่อเทา

จากหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าต้นทุนการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์สูงกว่าเหล็กหล่อเทาประมาณ 30 บาท/กก. ซึ่งแพงกว่าเหล็กหล่อเทาเกือบ 2 เท่า

ดังนั้นในชิ้นส่วนที่ใช้เหล็กหล่อเทาเป็นวัสดุ ไม่ได้รับแรงกระทำสูงและมีอายุการใช้งานนานอยู่แล้ว เช่น Pully Housing Cover ไม่คุ้มค่าที่จะนำเหล็หล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์มาทดแทน และถึงแม้ว่าการนำเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์มาใช้แทนเหล็กหล่อเทา

จะทำให้อายุการใช้งานนานขึ้น แต่ก็ยังมีข้อเสีย เช่น ทำให้อายุการใช้งานของผ้าเบรคลดลง ใน Drum Brake หรือ Disc Brake ลดลง เมื่อพิจารณาราคาผ้าเบรคแล้วจึงไม่คุ้มค่าที่จะนำเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ มาทดแทนเช่นเดียวกัน

7.3.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเพิร์ไลท์และเฟอร์ไรท์

เนื่องจากเหล็กหล่อกราไฟต์กลม มักใช้ทำชิ้นส่วนรถยนต์ ซึ่งแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ 2 ประเภท จึงทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบแยกตามประเภทได้ ดังต่อไปนี้

ประเภทที่ 1 กลุ่ม Housing และ Exhaust Manifold

ชิ้นส่วนเหล่านี้เป็นชิ้นส่วนที่ต้องการความเหนียวที่ดีไม่เปราะหรือแตกร้าวง่าย ซึ่งในปัจจุบันนี้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเพิร์ไลท์และเฟอร์ไรท์มีคุณสมบัติดังกล่าว เมื่อทำการเปรียบเทียบราคาและอายุการใช้งานกับเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์แล้ว พบว่าเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเพิร์ไลท์และเฟอร์ไรท์มีราคาถูกกว่าประมาณ 20 บาท/กก. และยังมีอายุการใช้งานนานกว่า จึงไม่เป็นการเหมาะสมที่จะนำวัสดุใหม่มาทดแทน

ประเภทที่ 2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกลุ่มเพลาข้อเหวี่ยง, Bracket และข้อบังคับเลี้ยว

ชิ้นส่วนต่างๆ เหล่านี้ต้องรับแรงกระทำสูง มีการเสียดสีของผิวสัมผัส ไม่ควรเกิดการสึกหรอง่ายเพราะการซ่อมแซมแก้ไขค่อนข้างยาก จึงต้องการวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลสูง และมีความเหนียวที่ดี เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเหล็กหล่อกราไฟต์กลมธรรมดาพบว่า เป็นการเหมาะสมที่จะนำเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์มาทดแทนวัสดุเดิม เพราะเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ มีคุณสมบัติทางกลดีกว่าทำให้อายุการใช้งานนานกว่า โดยที่ราคาของวัสดุไม่แตกต่างกันมากนัก

นอกจากนี้ชิ้นส่วนเพลาข้อเหวี่ยงที่เป็นชิ้นส่วนถ่ายทอดกำลัง เมื่อทำจากเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลสูงขึ้น จะสามารถลดขนาดของชิ้นส่วนลงได้ ทำให้น้ำหนักลดลง จึงเป็นการประหยัดพลังงานมากขึ้นด้วย

7.3.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กกล้าหล่อ

เหล็กกล้าหล่อมักใช้ในการทำชิ้นส่วนพวก Housing หรือ Cover ต่างๆ ที่

ต้องการความเหนียว เช่นเดียวกับกลุ่ม Housing หรือ Cover ที่ทำจากเหล็กหล่อกราไฟต์กลมธรรมดา เมื่อพิจารณาราคาต้นทุนและอายุการใช้งานเปรียบเทียบกับเหล็กกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ พบว่าเหล็กกล้าหล่อมีราคาถูกกว่าประมาณ 15-20 บาท/กก. และมีอายุการใช้งานนานกว่า ดังนั้นจึงไม่คุ้มค่าที่จะนำเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ มาทดแทนเหล็กกล้าหล่อ

7.3.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กกล้าชุบแข็ง

เหล็กกล้าชุบแข็งและเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ มีคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะทางด้านความแข็งและการมีผิวลื่นช่วยลดการสึกหรอที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่มีการเสียดสี เช่น เฟือง ข้อต่อส่งกำลัง ข้อต่อลูกหมาก แต่เมื่อเปรียบเทียบราคาพบว่า เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์มีราคาถูกกว่าประมาณ 30 บาท/กก. และเมื่อมีการขึ้นรูปเหล็กกล้าชุบแข็ง ในงานรูปร่างซับซ้อน จะสิ้นเปลืองเนื้อเหล็กมาก ทำให้ราคาต้นทุนสูงขึ้นอีก ดังนั้นการใช้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ เหมาะสมและคุ้มค่ากว่าการใช้เหล็กกล้าชุบแข็ง

7.4 การลงทุนเพิ่มสำหรับการผลิตในประเทศ

การขยายการลงทุนโดยทำการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลม เพิ่มจากโรงงานที่ทำการผลิตเหล็กหล่ออยู่แล้ว พบว่ามีการลงทุนเพิ่มไม่มาก เพราะยังใช้กระบวนการผลิตเดิม แต่มีการเปลี่ยนแปลงจากงานหล่อปกติเล็กน้อย โดยเพิ่มขั้นตอนการผลิตอีก 2 จุดดังนี้

1. ส่วนผสมทางเคมี

สำหรับโรงงานเหล็กหล่อที่ใช้เครื่องมือการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ที่เรียกว่า Spectrometer ซึ่งสามารถตรวจสอบส่วนผสมของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ได้ จะไม่มีปัญหา แต่โรงงานเหล็กหล่อที่ใช้เครื่องมือตรวจสอบส่วนผสมของคาร์บอน (C) และซิลิกอน (Si) ที่เรียกว่า C.E. Meter จำเป็นที่ต้องลงทุนเพิ่มเติม โดยทำการติดตั้งเครื่องมือตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์อีกประมาณ 2-3 ล้านบาท ซึ่งเครื่องมือตรวจสอบนี้มีอายุการใช้งานนานมาก

2. กระบวนการอบชุบด้วยความร้อน

ส่วนใหญ่โรงงานเหล็กหล่อมักไม่มีเครื่องมือสำหรับทำการอบชุบด้วยความร้อน แต่จะใช้วิธีการจ้างโรงงานอบชุบอีกแห่งหนึ่ง เพื่อทำการอบชุบชิ้นงานที่ต้องการ เพราะการลงทุนต้องใช้วงเงินสูงมาก ถ้าจะลงทุนติดตั้งกระบวนการอบชุบรวมอยู่ในกระบวนการผลิตด้วย จะต้อง

พิจารณารายละเอียดของปริมาณการใช้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ ในประเทศว่ามีความเหมาะสมและคุ้มค่าหรือไม่

ดังนั้นการลงทุนเพิ่มโดยการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ ที่มีส่วนผสมนิกเกิล 4% และโมลิบดินัม 0.3% เป็นโครงการที่มีคุณค่าความเหมาะสมและมีความคุ้มค่า

7.5 สรุปผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์

ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ในการนำเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ มาใช้ทดแทนวัสดุต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.1 สรุปผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์

วัสดุเดิม	ชิ้นส่วน	ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ในการใช้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์มาทดแทน	
		เหมาะสม	ไม่เหมาะสม
เหล็กหล่อ	1. ชิ้นส่วนที่ไม่ได้รับแรงกระทำสูง เช่น Pulley, Housing Cover		x
	2. ชิ้นส่วนที่ไม่ได้รับแรงกระทำและการเสียดสี เช่น Drum Brake, Disc Brake		x
เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเพิร์ไลท์และเฟอร์ไรท์	1. ชิ้นส่วนที่ไม่ได้รับแรงกระทำสูง เช่น Housing, Exhaust Mainfold		x
	2. ชิ้นส่วนที่ได้รับแรงกระทำสูง เช่น เพลาข้อเหวี่ยง, Bracket, ข้อบังคับเลี้ยว	x	
เหล็กกล้าหล่อ	1. ชิ้นส่วนที่ไม่ได้รับแรงกระทำสูง เช่น ห้องเฟืองท้าย กระปุกเลี้ยวบังคับเลี้ยว		x
เหล็กกล้าชุบแข็ง	1. เพลาทด	x	
	2. กลุ่มข้อต่อส่งกำลัง	x	
	3. กลุ่มเฟืองต่างๆ	x	

จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์แล้วพบว่าเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ สามารถทดแทนเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเพิร์ไลท์และเฟอร์ไรท์รวมทั้งเหล็กกล้าชุบแข็งในชิ้นส่วนของรถยนต์ที่ต้องรับแรงกระแทก มีการเสียดสี และเกิดการสึกหรอ ได้อย่างเหมาะสมและคุ้มค่า เพราะมีคุณสมบัติทางกลสูง ทำให้อายุการใช้งานนานและประหยัดค่าใช้จ่ายมากขึ้น สมควรที่จะได้รับการพิจารณาสนับสนุนด้านการลงทุน เพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กหล่อของประเทศไทยต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

บทสรุป

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ ในการทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นส่วนรถยนต์ โดยพิจารณาที่จะนำไปใช้ทดแทนวัสดุประเภทเหล็กหล่อเทา เหล็กกล้าหล่อ และเหล็กกล้าชุบแข็ง โดยทำการศึกษาถึงประเภทของชิ้นส่วนต่างๆ ที่ใช้วัสดุเหล็กหล่อเทา เหล็กกล้าหล่อ และเหล็กกล้าชุบแข็งผลิตอยู่ในปัจจุบัน และทำการศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกลที่จำเป็นของชิ้นส่วนต่างๆ เหล่านี้ นำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ ที่ได้ทดลองทำการผลิตขึ้นในห้องทดลอง เพื่อดูว่าจะสามารถนำเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ไปใช้ทดแทนได้เหมาะสมมากน้อยเพียงใด

ทางด้านของกระบวนการผลิตนั้น ได้มีการศึกษาถึงการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ โดยการเติมโลหะผสมนิเกิลและโมลิบดีนั่มในปริมาณต่างๆ ในกระบวนการหล่อ จากนั้นจึงนำมาทำการอบชุบในกระบวนการ Austempering ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เพื่อพิจารณาถึงโครงสร้างจุลภาคเบไนต์ที่เกิดขึ้น ทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลที่สำคัญได้แก่ ความต้านแรงดึง อัตราการยืดตัว ความทนทานต่อแรงกระแทกและความแข็ง

การศึกษาดังกล่าวข้างต้น เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคในการนำเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ มาใช้ทดแทนวัสดุเหล็กหล่อและเหล็กกล้าหล่อในการทำชิ้นส่วนรถยนต์ จากนั้นได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยพิจารณาถึงต้นทุนการผลิตและการลงทุนที่จำเป็นต่างๆ ของโรงงานผลิตเหล็กหล่อในปัจจุบัน ที่จะเปลี่ยนมาทำการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์

จากผลการศึกษาวิจัยพบว่า เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์มีความเป็นไปได้ทั้งในเชิงเทคนิค ในการนำมาใช้ผลิตทดแทนวัสดุเหล็กต่างๆ ในการทำชิ้นส่วน 3 ประเภทดังนี้

1. ชิ้นส่วนที่มีการเสียดสี แต่รับแรงกระแทกไม่มากนัก เช่น DRUM BRAKE, DISC BRAKE
2. ชิ้นส่วนที่มีผนังบางๆ มีแรงกระแทกบ้าง ไม่รับแรงกระแทกมากนัก เช่น EXHAUST MANIFOLD
3. ชิ้นส่วนพวกที่เป็น COVER หรือ HOUSING ต่างๆ

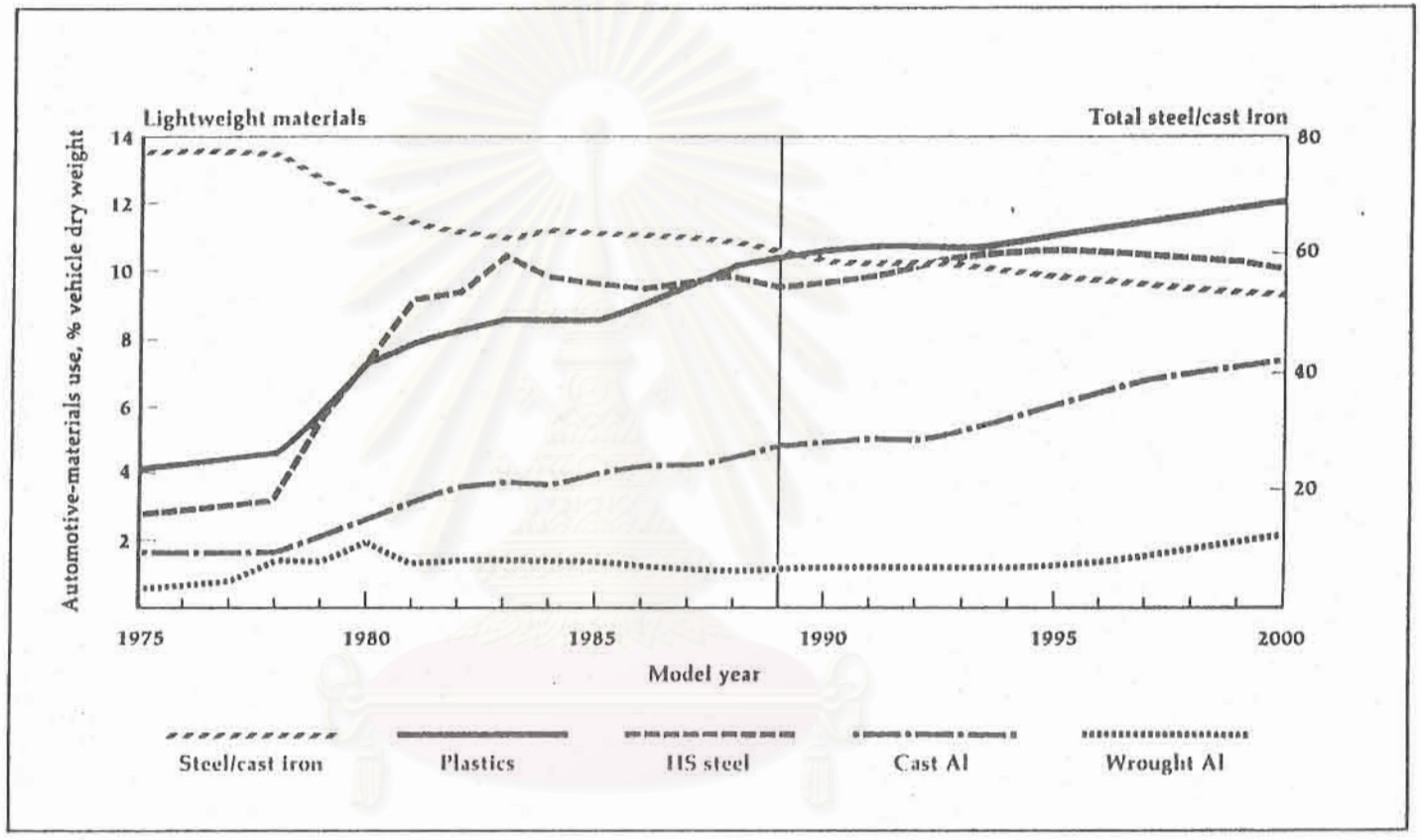
สำหรับความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์นั้น เหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์สามารถทดแทนเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเพิร์ไลท์ เฟอร์ไรท์ รวมทั้งเหล็กกล้าชุบแข็งในชิ้นส่วนของรถยนต์ที่ต้องรับแรงกระแทก มีการเสียดสีและเกิดการสึกหรอได้อย่างเหมาะสมและ

คุ้มค่า เพราะมีคุณสมบัติทางกลสูง อายุการใช้งานนานและประหยัดค่าใช้จ่ายมากขึ้น สมควรได้รับการพิจารณาสนับสนุนด้านการลงทุน เพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมผลิตเหล็กหล่อของประเทศไทยต่อไป

เมื่อพิจารณาถึงการใช้วัสดุประเภทเหล็กในอุตสาหกรรมรถยนต์ในอนาคต จะเห็นได้ว่า ปริมาณการใช้วัสดุประเภทนี้ยังอยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างสูงกว่า 50% ดังที่ได้ระบุไว้ในวารสาร Advance Materials Processing ของ American Socity of Metal (ASM) ดังรูปที่ 8.1

ดังนั้น การพิจารณาส่งเสริมการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กหล่อในประเทศไทยเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ ซึ่งมีความต้องการเพิ่มมากขึ้นตลอดระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มต่อไปในอนาคต จึงเป็นสิ่งที่รัฐบาลควรพิจารณาสนับสนุนอย่างยิ่งต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 8.1 แนวโน้มการใช้วัสดุประเภทต่างๆ ในอุตสาหกรรมรถยนต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

1. THE JAPAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY : AUTOMOBILE AND CASTING ; APRIL, 1986.

2. รศ.มนัส สถิรจินดา : วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก ; วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, พิมพ์ครั้งที่ 1, พฤษภาคม 2531, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 224-226

3. CHARLES F. WALTON, TIMOTHY J. OPAR : IRON CASTING HANDBOOK ; IRON CASTING SOCIETY, 1981, หน้า 566-569

4. KIYOAKI AKESHI et al : SPHEROIDAL GRAPHITE CAST IRON, FUNDAMENTAL, THEORY, APPLICATION, AGNE CO., LTD., MARCH, 1983, หน้า 266-269

5. KATSUYA IKAWA et al : FUNDAMENTAL AND APPLICATION OF SPHEROIDAL GRAPHITE CAST IRON ; MARUZEN CO., LTD., JANUARY, 1992, หน้า 223-226

6. รศ.มนัส สถิรจินดา และคณะ : กระบวนการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์เบไนต์ ; วารสารโลหะ วัสดุ และแร่ ; สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 มิถุนายน 2532, หน้า 92-97

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบสอบถาม

1. ชื่อบริษัท หรือโรงงาน .....

2. ประเภทโรงงาน (สามารถตอบได้มากกว่า 1 ข้อ)

   2.1 [ ] โรงงานประกอบรถยนต์

   2.2 [ ] โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ (เฉพาะส่วนที่เป็นโลหะ)

   2.3 [ ] อื่นๆ โปรดระบุ .....

3. ในกรณีที่ท่านประกอบรถยนต์อย่างเดียว ท่านนำเข้าหรือสั่งผลิตในประเทศ ผลิตจากโรงงานอะไร ตามชิ้นส่วนดังต่อไปนี้

ชิ้นส่วนจักรกล	นำเข้าหรือ ผลิตในประเทศ	ชื่อโรงงาน ผู้ผลิต	ความต้องการ (กก. / เดือน)	ต้นทุน บาท/กก.	SPECIFICATION (JIS, ASTM, etc)
1. ข้อเหวี่ยง (CRANK)	.....	.....	.....	.....	.....
2. เพลาข้อเหวี่ยง (CRANK SHAFT)	.....	.....	.....	.....	.....
3. สลักข้อเหวี่ยง (CRANK PIN)	.....	.....	.....	.....	.....
4. ล้อช่วยแรง (FLY WHEEL)	.....	.....	.....	.....	.....
5. เฟืองไทม์มิ่ง (TIMING GEAR)	.....	.....	.....	.....	.....
6. แผ่นคลัทช์ (CLUTCH DISC)	.....	.....	.....	.....	.....
7. เพลาคลัทช์ (CLUTCH SHAFT)	.....	.....	.....	.....	.....
8. เพลาตามในห้องเกียร์ (COUNTER SHAFT)	.....	.....	.....	.....	.....
9. ข้อต่อคาร์ดาน (CARDAN JOINT)	.....	.....	.....	.....	.....
10. ยอย, ข้อต่ออ่อน (UNIVERSAL JOINT)	.....	.....	.....	.....	.....
11. SYNCHRONIZER	.....	.....	.....	.....	.....
12. เพลาครึ่ง, เพลาข้าง (HALF SHAFT)	.....	.....	.....	.....	.....
13. เสื้อเฟืองท้าย	.....	.....	.....	.....	.....
14. เฟืองท้าย	.....	.....	.....	.....	.....
15. เพลาห้องเฟืองท้าย	.....	.....	.....	.....	.....
16. ข้อต่อในห้องเฟืองท้าย	.....	.....	.....	.....	.....
17. จานเบรค (BRAKE DISC)	.....	.....	.....	.....	.....
18. ดรัมเบรค (BRAKE DRUM)	.....	.....	.....	.....	.....

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชิ้นส่วนจักรกล	นำเข้าหรือ ผลิตในประเทศ	ชื่อโรงงาน ผู้ผลิต	ความต้องการ (กก. / เดือน)	ต้นทุน บาท/กก.	SPECIFICATION (JIS, ASTM, etc)
19. กระปุกเฟืองบัลคับเลี้ยว (STEERING GEAR)	.....	.....	.....	.....	.....
20. เฟืองในกระปุกเฟือง บังคับเลี้ยว	.....	.....	.....	.....	.....
21. ปีกนก (WISH BONE)	.....	.....	.....	.....	.....
22. ลูกหมาก (BALL JOINT)	.....	.....	.....	.....	.....
23. กระเดื่องหยุดเฟือง	.....	.....	.....	.....	.....
เฟืองต่างๆ ในชุดอุปกรณ์ต่างๆ					
24. เฟืองฟันตรง	.....	.....	.....	.....	.....
25. เฟืองฟันโค้ง	.....	.....	.....	.....	.....
26. เฟืองดอกจอก	.....	.....	.....	.....	.....
27. เฟืองหนอน	.....	.....	.....	.....	.....
28. เฟืองพีเนียน	.....	.....	.....	.....	.....
29. เฟืองฟันใน	.....	.....	.....	.....	.....
30. เฟืองแหวน	.....	.....	.....	.....	.....
31. เฟืองฮีลิก	.....	.....	.....	.....	.....

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. กรุณาช่วยระบุชิ้นส่วนจักรกลที่ทำจากเหล็กกล้าชุบแข็งหรือเหล็กกล้าผสมสูง รวมทั้งปริมาณการผลิตหรือปริมาณความต้องการ, ต้นทุน, SPECIFCATION ของเหล็กที่ใช้ผลิต

ชิ้นส่วน	กรรมวิธีการผลิต	ปริมาณการผลิต (กก. / เดือน)	ต้นทุน บาท/กก.	SPECIFICATION (JIS, ASTM, etc)
3.1	.....	.....	.....	.....
3.2	.....	.....	.....	.....
3.3	.....	.....	.....	.....
3.4	.....	.....	.....	.....
3.5	.....	.....	.....	.....
3.6	.....	.....	.....	.....
3.7	.....	.....	.....	.....
3.8	.....	.....	.....	.....
3.9	.....	.....	.....	.....
3.10	.....	.....	.....	.....
3.11	.....	.....	.....	.....
3.12	.....	.....	.....	.....

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. ท่านคิดว่าแนวโน้มในการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ดังกล่าวตามตารางในประเทศไทยเป็นอย่างไร (โดยใช้วัสดุเดิมที่ใช้กันอยู่)

[ ] คงต้องมีการนำเข้าต่อไปอีกนาน

[ ] มีแนวโน้มจะทำการผลิตในประเทศในเวลาอันใกล้นี้

[ ] มีการผลิตในประเทศไทยอยู่แล้ว แต่คุณภาพค่อนข้างต่ำ จึงไม่มีการใช้

[ ] มีการใช้ชิ้นส่วนที่ผลิตในประเทศไทยอยู่แล้ว

[ ] อื่น ๆ .....

.....

5. ท่านเห็นควรด้วยหรือไม่ในการนำเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเนื้อพื้นเบไนต์ เข้ามาใช้ทดแทนเหล็กกล้าชุบแข็งหรือเหล็กกล้าผสมสูงบางตัว โดยที่คุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกัน

.....

.....

.....

.....

.....

.....

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย