

เหล็กหล่อเหนียวความแข็งแรงสูง HIGH STRENGTH DUCTILE IRONS

ปัญญา ศรีจันทร์

สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
บางมด ราษฎร์บูรณะ กรุงเทพฯ 10140

PANYA SRICHANDR

*Materials Technology Division
School of Energy and Materials
KMIT. Thonburi, Bangkok*

บัณฑิต ใจชื่น

บริษัท บี.เค.เจ เอ็นจิเนียริง จำกัด
ถนนสุขสวัสดิ์ 72 พระประแดง
จ.สมุทรปราการ 10130

PANDIT JAICHUEN

*B.K.J. Engineering Co., Ltd.
Suksawat 72 Road, Prapradang
Samutprakarn*

บทคัดย่อ

เหล็กหล่อเหนียวความแข็งแรงสูงเป็นโลหะที่มีการใช้งานในทางวิศวกรรมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทดแทนชิ้นส่วนเหล็กกล้าที่ผลิตโดยกระบวนการหุบขึ้นรูป ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กหลอดังกล่าวมีขั้นตอนการผลิตที่ง่ายกว่า แต่มีคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกัน หัวใจของการผลิตคือการควบคุมโครงสร้างของเนื้อเหล็กให้เป็นเบไนท์ งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษากระบวนการผลิตและอิทธิพลของพารามิเตอร์การผลิตต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของเหล็กหล่อเหนียวความแข็งแรงสูง ผลการวิจัยพบว่าเหล็กหลอดังกล่าวสามารถผลิตได้ 2 วิธีคือ การหล่อให้เป็นชิ้นงานโดยไม่ต้องผ่านการอบชุบ และการหล่อให้เป็นเหล็กหล่อเหนียวธรรมดาแล้วอบชุบด้วยวิธีออสเทมเปอริง ในการผลิตโดยวิธีแรกพบว่าปริมาณธาตุผสมที่พอเหมาะคือ นิกเกิลประมาณ 2% และโมลิบดีนัมประมาณ 1% การผลิตโดยวิธีหลังจะควบคุมโครงสร้างได้ดีกว่าวิธีแรก คุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเหนียวที่ผลิตได้ทั้ง 2 วิธี จะมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นส่วนเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบและอบคลายเครียด ประโยชน์ใช้งานและศักยภาพของเหล็กหล่อความแข็งแรงสูงดังกล่าวจึงมีมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการผลิตชิ้นส่วนที่เคยผลิตด้วยเหล็กกล้าชุบแข็ง เช่น เพลาข้อเหวี่ยง เฟือง เป็นต้น

ABSTRACT

High strength ductile irons are being used extensively in engineering applications replacing forged steel components. This is due mainly to shorter process route while mechanical properties are comparable to those of quenched and tempered steels. The key to being of high strength is the bainite matrix which, of course, is influenced by process parameters and chemical compositions. The results of this investigation show that bainitic matrix could be achieved in the as-cast condition by the addition of about 2% Ni and 1% Mo thus requiring no further heat-treatment. Austempering of ordinary ductile iron yields more uniform bainite structure of the matrix. Tensile strength as high as 1,000 MPa and above could be attained.

1. บทนำ

เหล็กหล่อ นับเป็นกลุ่มโลหะที่มีความสำคัญและเป็นที่ยอมรับใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรม เนื่องจากเป็นโลหะที่มีราคาถูกและมีขั้นตอนการผลิตที่ง่ายไม่สลับซับซ้อน พัฒนาการในการปรับปรุงคุณภาพของเหล็กหล่อมียาวนาน และในปัจจุบันพัฒนาการดังกล่าวก็ยังคงมีต่อไปอย่างไม่หยุดยั้ง เป็นที่เชื่อได้ว่าเหล็กหล่อจะยังคงมีความสำคัญและแพร่หลายในงานวิศวกรรมต่อไปอีกนานเท่านาน

ข้อจำกัดที่สำคัญของเหล็กหล่อคือ การที่เหล็กหล่อมียุคสมบัติทางกลหลาย ๆ อย่างด้อยกว่าเหล็กเหนียว เช่น ความแข็งแรงและความเหนียวต่ำ เป็นต้น ทำให้ประโยชน์ใช้งานของเหล็กหล่อยังไม่กว้างขวางมากเท่าที่ควร ดังนั้น ประเด็นหลักที่สำคัญอย่างหนึ่งของการพัฒนา ก็คือการพัฒนาความแข็งแรงและความเหนียวให้ดีขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดย 2 วิธีหลัก ๆ คือ การปรับปรุงโครงสร้างโดยการอบชุบอบสเทมเปอริง และการปรับปรุงส่วนผสมทางเคมี วัตถุประสงค์หลักคือ การทำให้เกิดโครงสร้างเบไนท์ในเนื้อของเหล็กหล่อ โครงสร้างเบไนท์นี้เองที่เป็นที่มาของความแข็งแรงของเหล็กหล่อ

เหล็กหล่อเหนียวที่มีโครงสร้างเบไนท์นี้ไดถูกนำมาใช้งานทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวางในต่างประเทศ เช่น เฟืองในรถยนต์และรถบรรทุกขนาดเล็ก (1, 2) เฟืองในเครื่องจักรอุตสาหกรรม เครื่องทอผ้า (3, 4) เพลลาข้อเหวี่ยงสำหรับเครื่องปรับอากาศ และตู้เย็น (5) ชิ้นส่วนในระบบส่งกำลัง (6, 7) ชิ้นส่วนของรถชุดดักและเครื่องจักรกลในการก่อสร้าง (8) ชิ้นส่วนสำหรับอุปกรณ์รถไฟ (9, 10) เป็นที่คาดกันว่าในปัจจุบันมีการผลิตชิ้นส่วนวิศวกรรมจากเหล็กหล่อเหนียวความแข็งแรงสูงไม่ต่ำกว่า 50,000 ตัน ในปี 2534 และยังมีศักยภาพในการใช้งานอื่น ๆ อีกมาก (11) ในประเทศไทยมีการผลิตชิ้นส่วนจากเหล็กหล่อกลุ่มนี้อยู่บ้างคือ การผลิตเพลลาข้อเหวี่ยงของคอมเพรสเซอร์สำหรับเครื่องปรับอากาศ จึงเป็นที่คาดว่า จะมีการผลิตมากและหลากหลายชิ้นในอนาคต

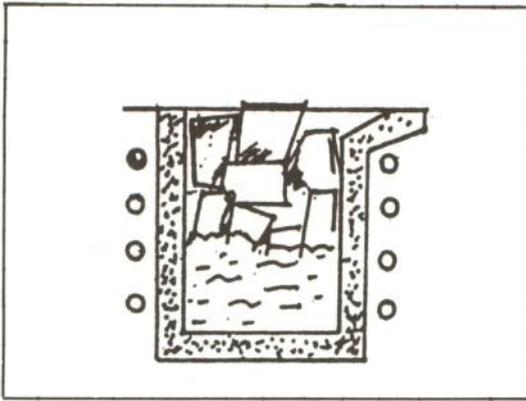
เหล็กหล่อเหนียวความแข็งแรงสูงก็เหมือนกับเหล็กหล่อหรือชิ้นงานหล่อทั่วไปคือ มีการกระจายของคุณสมบัติค่อนข้างมาก มีพารามิเตอร์หลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของงานหล่อ ข้อมูลเชิงปริมาณยังไม่มากพอที่จะทำให้ผู้ใช้ประโยชน์เกิดความมั่นใจได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อการใช้งานนั้นจะต้องมีความมั่นใจสูง ซึ่งนับเป็นอุปสรรคอย่างหนึ่งในการขยายตลาดของเหล็กหล่อกลุ่มนี้ ข้อมูลเชิงปริมาณทั้งในแง่ของข้อมูลการผลิตและข้อมูลด้านคุณสมบัติตลอดจน know-how ในการผลิตให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาในเชิงวิศวกรรมและเชิงพาณิชย์ ปัญหาด้านราคาก็เป็นอุปสรรคที่สำคัญอย่างหนึ่ง โดยเฉพาะการผลิตโดยการอบชุบอบสเทมเปอริง อย่างไรก็ตาม ข้อดีต่าง ๆ ของเหล็กหล่อกลุ่มนี้มีเป็นจำนวนมากสมควรได้รับการวิจัยและพัฒนาให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์และหาแนวทางในการแก้ปัญหาและอุปสรรคโดยวิธีการต่าง ๆ เพื่อให้สามารถได้ประโยชน์จากเหล็กหล่อกลุ่มนี้ให้มากที่สุด

การศึกษาวิจัยที่มีในประเทศในปัจจุบันพอมียาวแต่ยังไม่มีการศึกษาเชิงปริมาณที่ลึกซึ้งและเป็นระบบ การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการผลิตโดยการผสมธาตุและการอบอบสเทมเปอริงยังไม่มี การที่จะสามารถใช้โลหะกลุ่มนี้ให้กว้างขวางมากขึ้น จำเป็นต้องข้อมูลเหล่านี้ในรายละเอียดและในแง่มุมต่าง ๆ และต้องมีเป็นจำนวนมากจึงจะสามารถสร้างความมั่นใจให้กับผู้ผลิตและผู้ใช้ได้

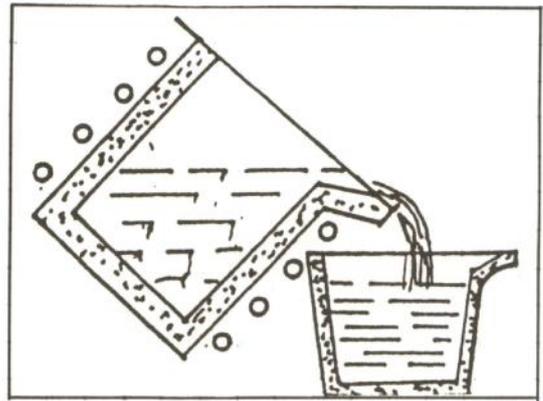
งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบของการพัฒนาทั้ง 2 วิธีในแง่ของโครงสร้างที่เกิดขึ้นและคุณสมบัติทางกลที่ได้ในเชิงปริมาณ ตลอดจนศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การผลิตต่าง ๆ อันเป็นที่มาของโครงสร้างและคุณสมบัติ

2. ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

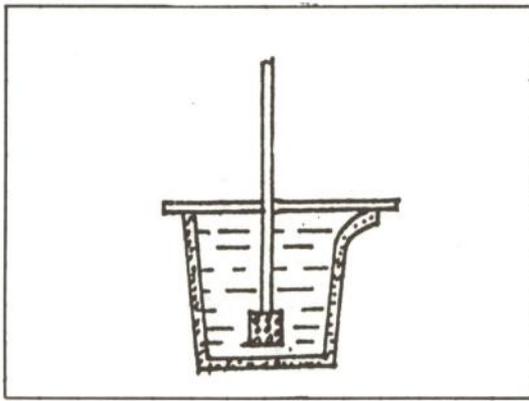
2.1 การหลอม การหล่อ และการเตรียมชิ้นงานทดสอบ



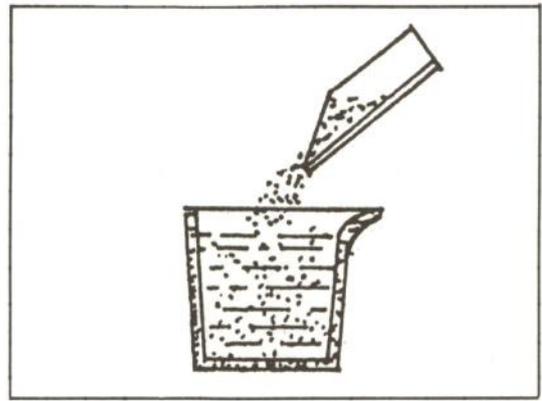
1. เติมเหล็กดิบ, เศษเหล็กเหนียว, FeMo Ni, สาร Recarburizer



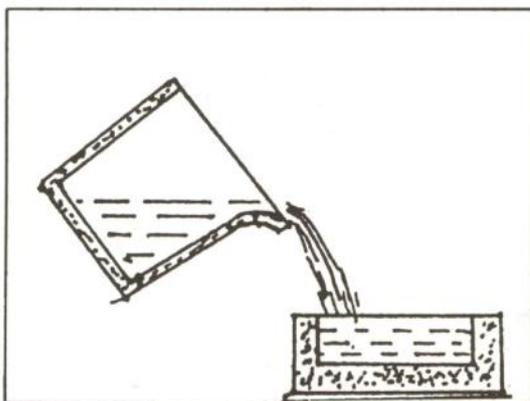
2. เทน้ำโลหะลงในเข้าเท



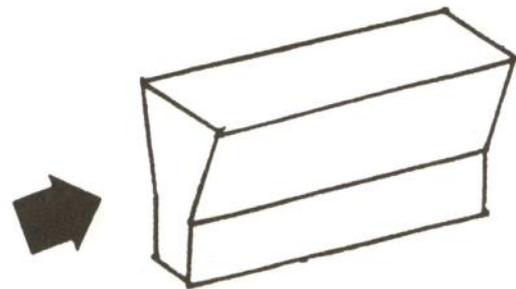
3. เติมสาร Nodularizer



4. เติมสาร Inoculant



5. เทน้ำโลหะลงในแบบ

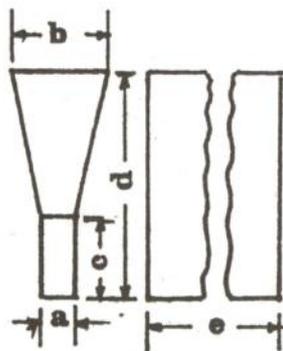


รูปที่ 1 การหลอมและเทงานในการทดลอง

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของงานทดสอบ

Charge No.	ส่วนผสมทางเคมี								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Mg	CE
1	3.32	2.66	0.35	<0.042	<0.018	0.55	-	0.019	4.22
2	3.15	2.65	0.354	<0.042	<0.018	2.08	-	0.049	4.05
3	3.47	2.27	0.341	<0.042	<0.018	-	0.297	<0.009	4.24
4	3.32	2.52	0.393	<0.042	<0.018	<0.154	0.952	0.036	4.07
5	3.34	2.59	0.414	<0.042	<0.018	0.518	0.276	0.039	4.22
6	3.11	2.64	0.216	<0.042	<0.018	1.16	0.97	0.038	4.00
7	2.20	2.78	0.20	<0.042	<0.018	1.12	0.98	0.030	3.15
8	3.11	2.98	0.44	0.051	0.025	2.14	0.99	0.028	4.12
9	3.01	2.79	0.285	0.049	0.022	2.17	1.127	0.044	3.95
10	3.05	2.72	0.297	0.05	0.022	1.59	1.057	0.033	3.97
11	3.90	2.73	0.200	0.032	0.015	3.10	0.925	0.055	4.84
12	3.79	2.63	0.221	0.042	0.016	2.14	0.927	0.027	4.67
13	3.30	2.30	0.24	0.042	0.007	2.14	0.97	0.038	4.082

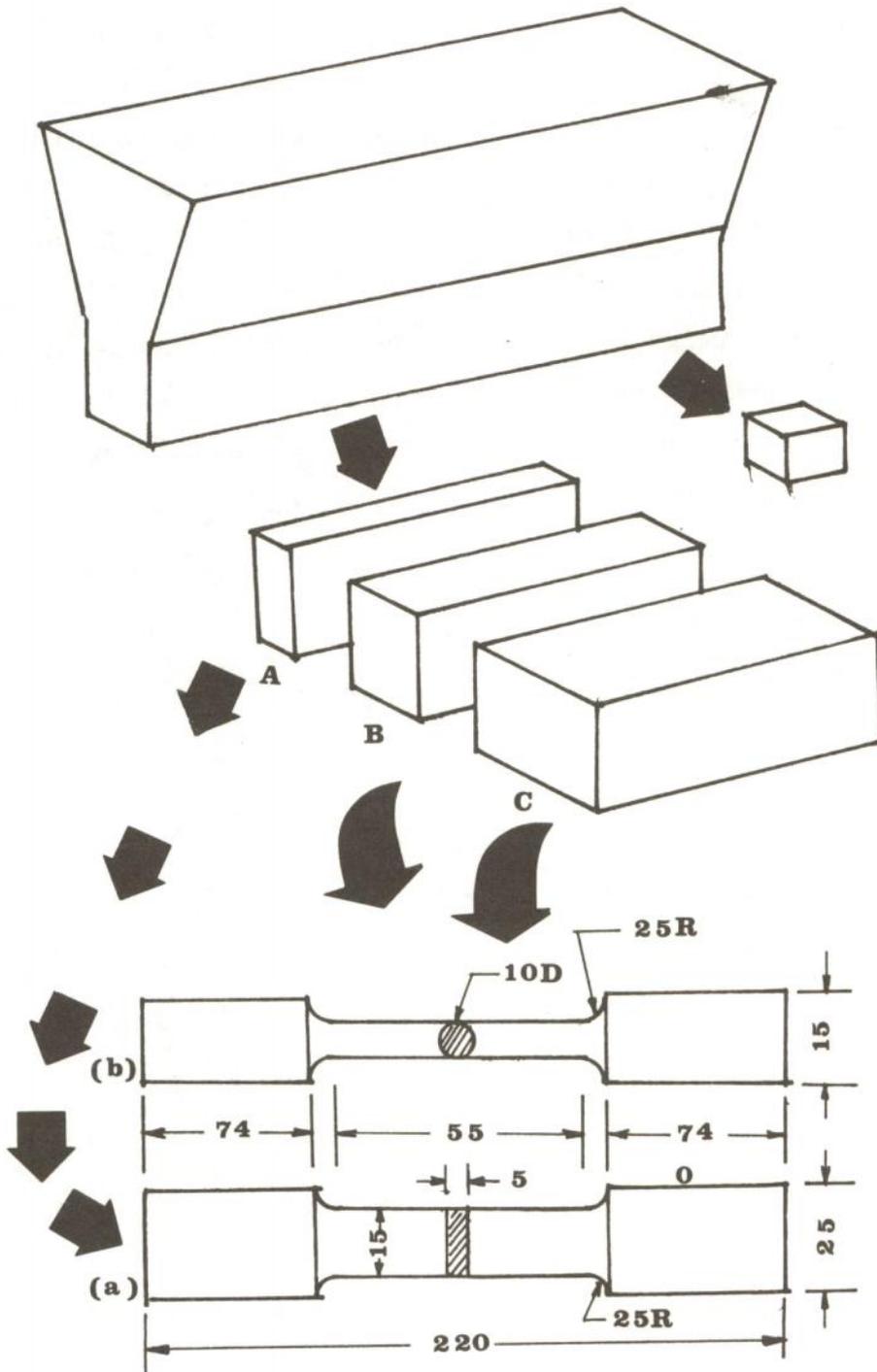
ชิ้นงานที่หล่อเป็นรูป Y-block เพื่อเตรียมงานทดสอบ



SIZE NO.	a	b	c	d	e
A	12	40	25	135	300
B	25	55	40	140	300
C	50	90	50	160	300

รูปที่ 2 ขนาดของแท่ง Y-block (หน่วย : มม.)

หน่วย : มม.

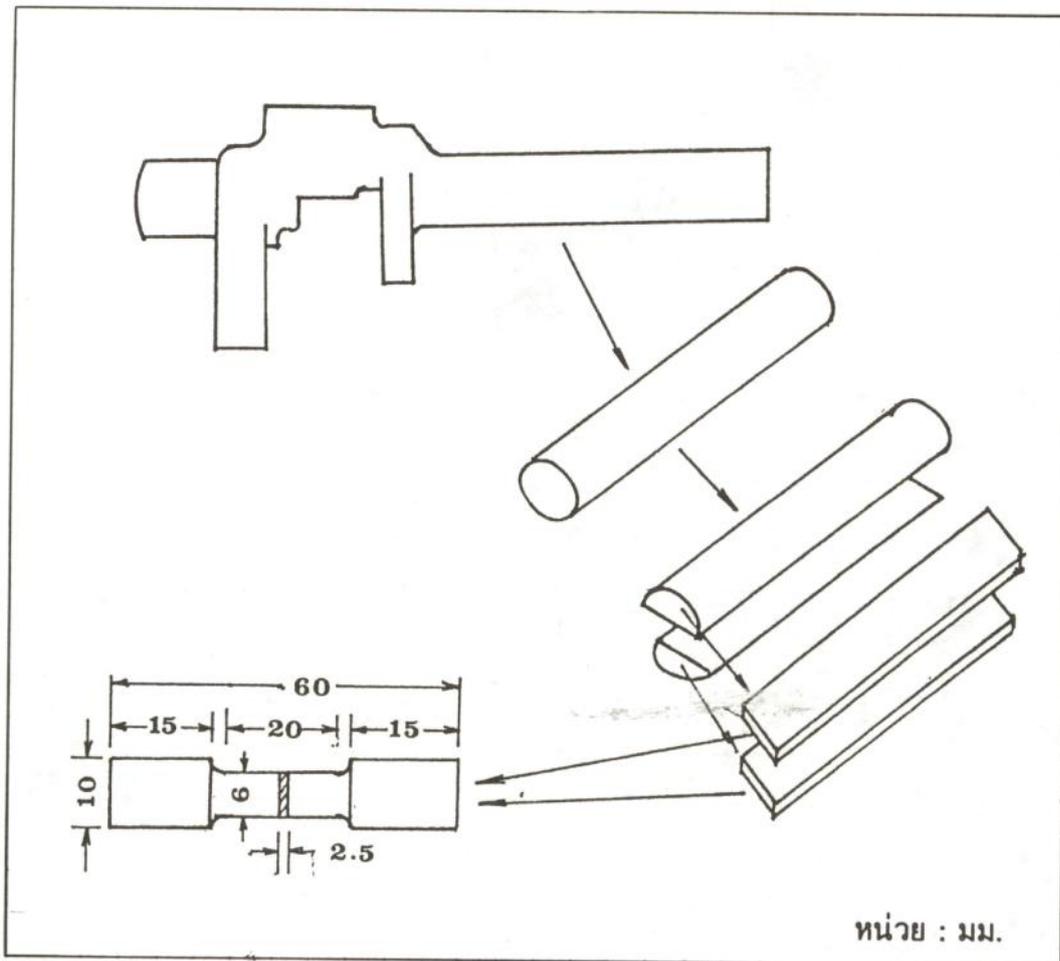


รูปที่ 3 แต่งงานเพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

การทดลองครั้งนี้ได้ใช้เตาหลอมระบบเหนียวนำความถี่สูง ขนาดความจุ 50 ก.ก. วัสดุที่ใช้ในการหลอมประกอบด้วยเหล็กดิบ เศษเหล็กเหนียว เฟอร์โรซิลิกอน (FeSi) นิกเกิล เฟอร์โรโมลิบดีนัม (FeMo) สารอินทรีย์คดูลแลนท์ สารก่อกราไฟท์กลม (nodularizer) และสารเติมปรับคาร์บอน (recarburizer) ขั้นตอนของการหลอมและการหล่อจะเห็นได้ดังในรูปที่ 1

ในการวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการหล่อเพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การผลิตต่อโครงสร้างและคุณสมบัติ จึงได้แปรส่วนผสมของชิ้นงาน (Ni และ Mo) (12) และแปรความหนาของงานโดยทำชิ้นงาน 3 ขนาด (ดูในรูปที่ 2) ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

การทดลองรวมทั้งหมด 13 ครั้ง ในการหล่อครั้งที่ 1-11 ได้หล่องานออกมาเป็นแท่ง Y-block² 3 ขนาด A, B, C ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นจึงนำ Y-block (13) มาตัดเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบความต้านแรงดึง ความแข็ง ความต้านแรงกระแทก และโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 2 ชิ้นงานสำหรับทดสอบความต้านแรงดึงนั้น ได้ทำเป็น 4 ลักษณะตามความเหมาะสม โดยจากการหลอมครั้งที่ 1-6 จากแท่ง Y-block A ได้ทำชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ 3, a จากแท่ง Y-block B, C ได้ทำชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ 3, b จากการหลอมครั้งที่ 7-11 ได้ทำชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ 3, b การหลอมครั้งที่ 11-13 เป็นการทดลองผลิตชิ้นงาน crankshaft (14) ของ compressor สำหรับเครื่องทำความเย็นต่าง ๆ และได้ทำชิ้นงานทดสอบดังที่รูป 4



รูปที่ 4 crankshaft ที่หล่อแล้วนำไปทดสอบ

2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคได้กระทำเป็น 2 ขั้นตอนคือ ตรวจสอบกราฟ (ยังไม่กัดผิว) และตรวจสอบ Matrix (กัดผิวแล้ว) โดยชิ้นงานทดสอบนั้นตัดออกจากส่วนต่าง ๆ ของ Y-block แล้วนำไปขัด-กัดผิว และถ่ายรูป ส่วนงาน crank shaft (14) นั้น ได้ตัดย่อยออกจากแต่ละส่วนเพื่อนำไปทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4

2.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

การทดสอบความแข็ง ชิ้นงานที่เตรียมไว้สำหรับวัดความแข็งเป็นชุดเดียวกับที่เตรียมไว้สำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และผ่านกระบวนการเหมือนกับชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง ความแข็งที่วัดใช้ระบบบริเวลล์ หัวกดเป็นลูกบอลล์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มม. แรงกด 187.5 ก.ก. รวมชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็งทั้งสิ้น 174 ชิ้น

การทดสอบความต้านแรงดึง งานที่ได้จากการหลอมครั้งที่ 1-6 ซึ่งยังไม่เกิดเบโนที่นั้น ได้ตัดแต่งเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบความต้านแรงดึง แล้วจึงนำไปอบชุบด้วยวิธีออสเทมเปอร์ิ่งแล้วจึงนำไปทดสอบ ส่วนงานที่ได้จากการหลอมครั้งที่ 7-13 มีความแข็งและความแข็งแรงสูงขึ้น จึงตัดแต่งให้เป็นชิ้นงานทดสอบและนำไปอบที่อุณหภูมิ $280^{\circ}\text{C} \times 2$ ชม., $280^{\circ}\text{C} \times 4$ ชม., $300^{\circ}\text{C} \times 2$ ชม., $320^{\circ}\text{C} \times 2$ ชม., $320^{\circ}\text{C} \times 4$ ชม., $340^{\circ}\text{C} \times 2$ ชม., $340^{\circ}\text{C} \times 4$ ชม., และ $350^{\circ}\text{C} \times 4$ ชม. จึงนำไปทดสอบรวมชิ้นงานสำหรับทดสอบความต้านแรงดึงทั้งสิ้น 78 ชิ้น

3. ผลการทดสอบ

3.1 โครงสร้างจุลภาค

งานทดสอบที่หล่อเป็น Y-block มี 3 ขนาด คือ A : ความหนา 12.5 มม.; B : ความหนา 25 มม. และ C : ความหนา 50 มม. จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคปรากฏว่างาน A มีกราฟท์กลมขนาดเล็กกว่างาน B และ C เนื่องจากงาน A เย็นตัว

เร็วกว่างาน B และ C เมื่อกัดผิวด้วยน้ำยา Nital 2% ปรากฏว่างานที่ได้จากการหลอมครั้งที่ 1-6 มีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยกราฟท์กลมและเฟอร์ไรท์+เฟิร์ลไลท์ โดยงาน A จะเห็นโครงสร้างเป็นแบบตาวัว (Bellseye) อย่างชัดเจน ส่วนงาน B และ C จะมีปริมาณเฟอร์ไรท์มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงาน C ซึ่งเย็นตัวช้าที่สุดนั้นจะมีโครงสร้างพื้นส่วนมากเป็นเฟอร์ไรท์

เมื่อนำงานไปอบชุบด้วยวิธีออสเทมเปอร์ิ่ง โดยอบที่ $880^{\circ}\text{C} \times 1$ ชม. และชุบในเกลือเหลวอุณหภูมิ $350^{\circ}\text{C} \times 5$ ชม. โครงสร้างพื้นเดิมซึ่งประกอบด้วยเฟอร์ไรท์และเฟิร์ลไลท์จะกลายเป็นเบโนที่โดยสมบูรณ์

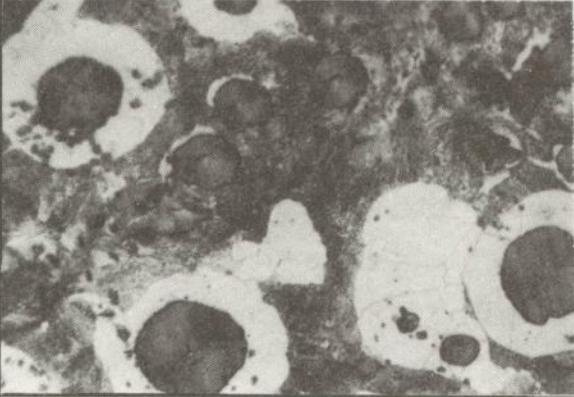
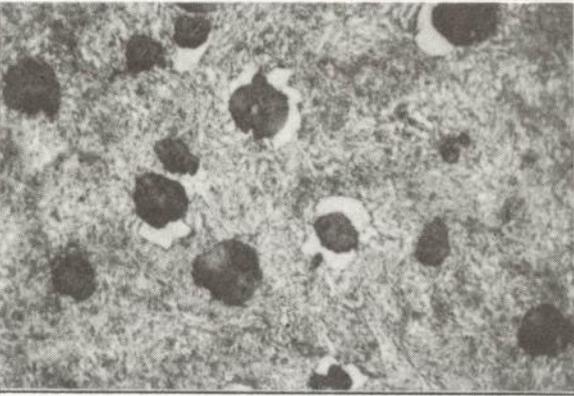
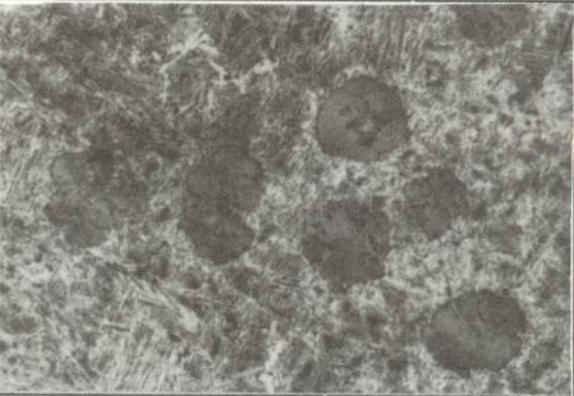
การหลอมครั้งที่ 7 ซึ่งปริมาณ Ni และ Mo ใกล้เคียงกับการหลอมครั้งที่ 6 แต่ลดปริมาณคาร์บอนลงเป็น 2.20%C ปรากฏว่ากราฟท์กลมเกิดขึ้นน้อยมาก ส่วนพื้นประกอบด้วยเฟิร์ลไลท์ละเอียดและคาร์ไบด์ แม้จะนำไปอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ โครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

การหลอมครั้งที่ 8, 9 เพิ่มปริมาณ Ni ขึ้นเป็น 2% ส่วน Mo ยังคงอยู่ที่ 1% ปรากฏว่าโครงสร้างพื้นเกิดเป็นเบโนที่เกือบจะสมบูรณ์ ยังคงมีเฟอร์ไรท์เหลืออยู่ข้าง ๆ เม็ดกราฟท์เพียงเล็กน้อยในงาน A นั้นจะเห็นโครงสร้างพื้นเป็นเบโนที่อย่างสมบูรณ์ ส่วนงาน C จะมีเฟอร์ไรท์หลงเหลืออยู่โดยเห็นได้อย่างชัดเจน

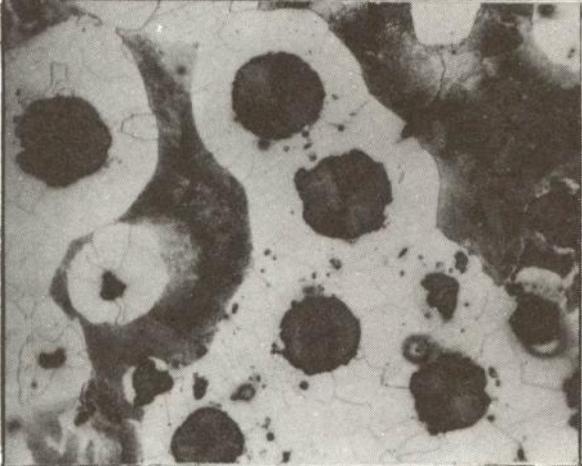
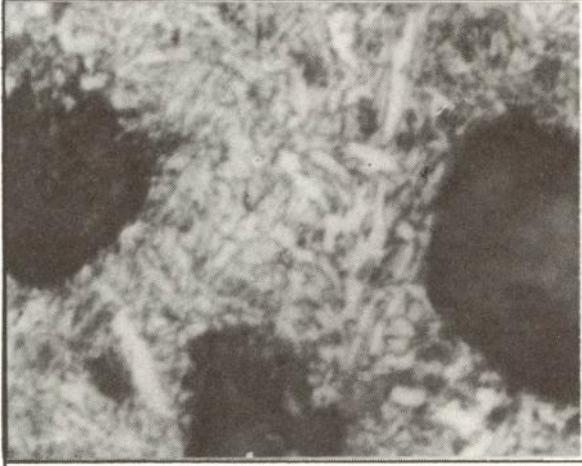
การหลอมครั้งที่ 10 ได้ลดปริมาณ Ni ลงมาเหลือเพียง 1.5% ปริมาณ Mo ยังคงอยู่ที่ 1% ปรากฏว่าได้โครงสร้างพื้นเป็นแบบ Duplex กล่าวคือ มีทั้งเบโนที่และเฟอร์ไรท์เกิดขึ้นด้วย คล้ายกับโครงสร้างตาวัว โดยเฟอร์ไรท์จะล้อมรอบเม็ดกราฟท์ถัดออกมาเป็นเบโนที่ (ถ้าเหล็กหล่อเหนียวธรรมดา) ส่วนนี้จะเป็นเฟิร์ลไลท์)

การหลอมครั้งที่ 11 ได้เพิ่มปริมาณ Ni เป็น 3% ปริมาณ Mo ยังคงอยู่ที่ 1% และปริมาณคาร์บอนเพิ่มเป็น 3.9% ปรากฏว่ากราฟท์กลมเกิดขึ้นจำนวนมาก และพื้นเป็นเบโนที่โดยสมบูรณ์ และ

รูปที่ 5 ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อจากงานวิจัย

ส่วน	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Mg	CE
ผสม	3.34	2.59	0.414	<0.042	<0.018	0.518	0.276	0.039	4.22
ลักษณะงาน : Y - block หน้า 50 มม.					Y - block หน้า 50 มม.				
									
as cast 200x					as cast 200x				
ส่วน	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Mg	CE
ผสม	3.05	2.72	0.297	0.050	0.022	1.59	1.06	0.033	3.97
									
as cast 200x					as cast 200x				
ส่วน	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Mg	CE
ผสม	3.11	2.98	0.44	0.051	0.025	2.14	0.99	0.028	4.12
									
as cast 200x					as cast 200x				

รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อ FCD , ADI , BDI

ส่วน	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Mg	CE		
ผสม	3.34	2.78	0.20	0.022	0.026	0.51	-	0.042	4.23		
ลักษณะงาน : Y - block หน้า 50 มม.											
											
FCD , as cast 200 x					FCD , austempered (ADI), 1000 x						
โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว พื้น เป็นเฟิร์ลไลท์ และเฟอร์ไรท์					หลังจําacobชุบด้วยวิธีออสเท็มเปอร์ริง โครงสร้างพื้นจะเป็นเบไนท์						
ความแข็ง 57 HB, $\sigma_u = 56.6$ กก./มม. ²					ความแข็ง 368 HB, $\sigma_u = 98.73$ กก./มม. ²						
ส่วนผสมเคมี						ส่วนผสมเคมี					
C	Si	Ni	Mo	Mg	CE	C	Si	Ni	Mo	Mg	CE
3.11	2.98	2.14	0.99	0.028	4.12	3.30	2.30	2.14	0.49	0.030	4.08
											
BDI , Y-block หน้า 12.5 มม. , 1000 x						BDI , crankshaft Ø 15 มม. , 1000 x					
โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยกราไฟท์ และ โครงสร้างพื้น ซึ่งเป็นเบไนท์						งาน crank shaft หล่อเท่านั้นจริง ได้โครงสร้าง กราไฟท์กลมและเบไนท์					
ความแข็ง 319 HB, $\sigma_u = 101.69$ กก./มม. ²						ความแข็ง 395 HB, $\sigma_u = 112.5$ กก./มม. ²					

ยังได้ผลิตเป็นงาน cranshaft เท่าของจริงออกมา ปรากฏว่าได้โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยกราฟไฟท์ กลและพื้นเบไนท์โดยสมบูรณ์

การหลอมครั้งที่ 12 ได้เพิ่มปริมาณ Ni 2% และ Mo 1% และหล่อขึ้นงานเป็นเฟืองหนา 25 ซม. เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคปรากฏว่าเกิดกราฟไฟท์กลมจำนวนมาก และพื้นเป็นเบไนท์โดยสมบูรณ์

การหลอมครั้งที่ 13 ซึ่งเป็นครั้งสุดท้ายได้ทำตัวอย่าง crankshaft ของ aircompressor ไปเป็น กระสวนทำแบบและหล่อออกมาได้ชิ้นงาน 16 ชิ้น โดยครั้งนี้ควบคุมปริมาณคาร์บอนที่ 3.3% Ni 2.14% และ Mo 1.0% นำงานที่ได้ไปผ่าตรวจสอบ และทดสอบที่บริเวณต่าง ๆ และนำไปอบที่อุณหภูมิ ต่าง ๆ คือ 280, 300, 320, 340 และ 350°C เป็นเวลา 2-4 ชั่วโมง

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่า กราฟไฟท์กลมเกิดขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอและกระจายตัว ติมาก พื้นเป็นเบไนท์โดยสมบูรณ์ หลังจากอบที่ อุณหภูมิต่าง ๆ แล้ว โครงสร้างพื้นอาจจะเปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อย โดยออกสเทินไนท์ที่อาจหลงเหลือ อยู่จะเปลี่ยนเป็นเบไนท์มากขึ้น ตัวอย่างโครงสร้าง จุลภาคของเหล็กหล่อในสภาวะต่าง ๆ จะดูได้จาก รูปที่ 5, 6

3.2 คุณสมบัติเชิงกล

งานจากการหลอมครั้งที่ 1-6 นั้นจะมีคุณสมบัติ เชิงกลค่อนข้างต่ำ เนื่องจากยังอยู่ในสภาพที่เป็นเหล็ก หล่อเหนียวธรรมดา แม้ว่าจะเติมธาตุ Ni, Mo หรือ ทั้ง 2 อย่างลงไปบ้างแล้วก็ตาม แต่โครงสร้างพื้น ยังไม่เป็นเบไนท์ จากการทดสอบงานจากการหลอม ครั้งที่ 1-6 นั้นมีค่าความแข็งตั้งแต่ 38 HB (งาน 4C) จนถึง 170 HB (งาน 1A) ความต้านแรงดึง ตั้งแต่ 28.23 กก./มม.² (งาน 1A) ความต้านแรงดึง ตั้งแต่ 28.23 กก./มม.² (งาน 4C) จนถึง 73.05 กก./มม.² (งาน 4A) หลังจากอบชุบด้วยวิธีออสเท็ม- เปรอริง ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเป็น 260 HB (งาน 3B)

จนถึง 397 HB (งาน 4B) ความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น เป็น 67.79 กก./มม.² (งาน 3C) จนถึง 125.47 กก./มม.² (งาน 5A)

งานจากการหลอมครั้งที่ 7 นั้น เนื่องจากเกิด คาร์ไบต์จำนวนมาก จึงมีความแข็งสูงตั้งแต่ 337 HB (งาน 7C) จนถึง 440 HB (งาน 7A) ความ ต้านแรงดึง 89.76 กก./มม.² (งาน 7B) จนถึง 108.90 กก./มม.² (งาน 7C) เมื่อนำไปอบ ความ แข็งและความต้านแรงดึงจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

งานจากการหลอมครั้งที่ 8, 9 ซึ่งมีโครง- สร้างจุลภาคประกอบด้วยกราฟไฟท์กลม และ เบไนท์ค่อนข้างจะสมบูรณ์นั้นมีความแข็งตั้งแต่ 309 HB (งาน 8B) จนถึง 382 HB (งาน 8C) ความต้านแรงดึง 66.3 กก./มม.² (งาน 8B) จนถึง 101.7 กก./มม.² (งาน 8A) เมื่อนำไป อบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความแข็งและความต้านแรง ดึงจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

งานที่ได้จากการหลอมครั้งที่ 10 ความแข็ง อยู่ในช่วง 261 HB (งาน 10C) ถึง 290 HB (งาน 10A) ความต้านแรงดึง 61.2 กก./มม.² (งาน 10B) ถึง 72.9 กก./มม.² (งาน 10A) ซึ่งนับว่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเติม Ni เพียง 1.5% ได้โครงสร้างพื้นเป็นแบบ Duplex เมื่อนำ ไปอบความแข็งและความต้านแรงดึงสูงขึ้น

งานจากการหลอมครั้งที่ 11 เติม Ni 3% และปริมาณคาร์บอนค่อนข้างสูง ความแข็งตั้งแต่ 302 HB (งาน 11B) ถึง 313 HB (งาน 11A) ความต้านแรงดึง 54.7 กก./มม.² (งาน 11C) ถึง 96.86 กก./มม.² (งาน 11B) เมื่อนำไปอบ ความแข็งและความต้านแรงดึงสูงขึ้น

งานจากการหลอมครั้งที่ 12- 13 นั้นเป็น งานจริง โดยครั้งที่ 12 หล่อเป็นเฟืองผสม Ni 2%, Mo 1% C ค่อนข้างสูง งานจึงมีความแข็ง เพียง 283 HB และความต้านแรงดึงเพียง 54.4 กก./มม.² แต่งานจากการหลอมครั้งที่ 13 ซึ่ง

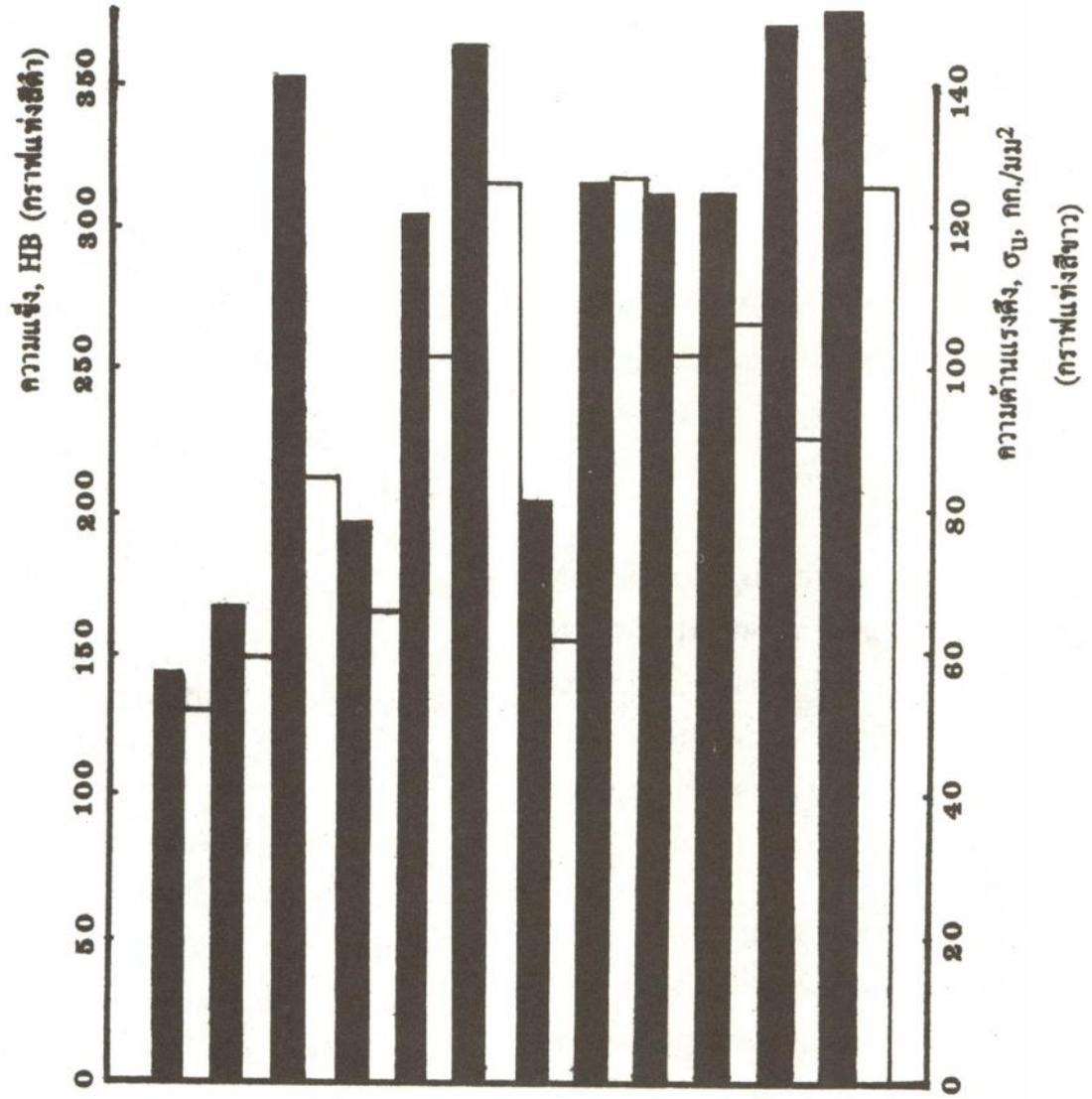
ตารางที่ 2 ตัวอย่างคุณสมบัติเชิงกลของงานวิจัย

งาน	ส่วนผสมทางเคมี				ลักษณะ ขนาดงาน	สภาวะ	ความแข็ง HB	σ _u กก./มม. ²	EL %	
	C	Ni	Mo	CE						
1	A	3.32	0.55	-	4.22	Y-block	as cast	170	61.8	5
						หนา 12.5 มม.	austempered	368	95.4	0.8
	B					Y-block	as cast	43	63.0	4
						หนา 25 มม.	austempered	351	92.0	2
	C					Y-block	as cast	57	56.6	9.4
						หนา 50 มม.	austempered	368	98.8	0.4
9	A	3.01	2.17	1.13	3.95	Y-block	as cast	313	94.6	4.3
						หนา 12.5 มม.	อบ280°Cx4ชม.	313	-	-
							อบ340°Cx4ชม.	326	95.9	4.3
	B					Y-block	as cast	310	85.3	6.43
						หนา 25 มม.	อบ280°Cx4ชม.	316	-	-
							อบ340°Cx4ชม.	319	103.4	3.05
	C					Y-block	as cast	300	95.3	4.93
						หนา 50 มม.	อบ280°Cx4ชม.	310	-	-
							อบ340°Cx4ชม.	310	100.5	2.05
13		3.30	2.14	0.97	4.08	crankshaft ขนาด ∅ 15 มม.	as cast	391	90.69	-
							อบ280°Cx2ชม.	393	92.4	-
							อบ280°Cx4ชม.	435	125.6	-
							อบ300°Cx2ชม.	432	108.2	9.50
							อบ300°Cx4ชม.	408	117.7	6.75
							อบ340°Cx2ชม.	425	120.1	7.5
							อบ340°Cx4ชม.	425	104.5	5.5
							อบ350°Cx2ชม.	410	109.5	8

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลของงานวิจัยกับเหล็กชนิดต่าง ๆ

โครงสร้าง และคุณสมบัติ	เหล็กเหนียว หล่อ	เหล็กหล่อ สีเทา	เหล็กหล่อ เหนียว	เหล็กหล่อเหนียวความแข็งแรงสูง	
				ออสเทมเปอร์	เติมธาตุผสม
สภาพ	หล่อ	หล่อ	หล่อ,อบ	หล่อ,ชุบ,อบ	หล่อ,อบ
ธาตุที่สำคัญ	C	C,Si	C,Si,Mg	C,Si,Mg	C,Si,Mg, Ni,Mo
โครงสร้าง จุลภาค	เฟอร์ไรต์ และเพอร์ไรต์	กราไฟท์เกล็ด เฟอร์ไรต์ และเพอร์ไรต์	กราไฟท์กลม เฟอร์ไรต์ และเพอร์ไรต์	กราไฟท์กลม และเบไนท์	กราไฟท์กลม และเบไนท์
ความแข็ง HB (2.5/187.5)	≈ 120	150-277	150-250	300-400	300-400
ความต้านแรง ดึง (σ_{U}) ก.ก./มม ²	≈ 50	10-35	40-80	80-130	80-125
ความสามารถ ตัดแต่ง	ยาก	ง่าย	ง่าย	ง่าย	ค่อนข้างยาก
คุณสมบัติ อื่นๆ	เหนียว, ดุด- กลืน Vibration ไม่ดี, ทนแรงอัด ไม่ดี, ทนแรง ดึงดี (ขึ้นกับ ความแข็งและ ความแข็งแรง	เปราะ, ดุด- กลืน Vibration ดี, ทน แรงอัดดี, ทน แรงดึงไม่ดี	ค่อนข้าง เหนียว ดุด- กลืน Vibration ปาน- กลาง, ทน แรงอัดดี, ทน แรงดึงดี	ค่อนข้าง เหนียว, ดุด- กลืน Vibration ปาน- กลาง, ทน แรงอัด, ทน แรงดึงดี	ค่อนข้าง เหนียว, ดุด- กลืน Vibration ปาน กลาง, ทน แรงอัดดี, ทน แรงดึงดี

ตารางที่ 4 ความแข็งและความแข็งแรงของงานวิจัยและเหล็กกล้า AISI 1040, 4140 ในสภาวะต่างๆ



งาน	ส่วนผสมเคมี			สภาพงาน
	C	Ni	Mo	
แท่งกลม Ø25 มม. (1040)	0.40	-	-	อบอ่อน
				Normalized
แท่งกลม Ø25 มม. (4140)	C	Cr	Ni	ชุบแข็ง, 425°C, 352 HB
	0.40	1.00	0.30	อบอ่อน, ความแข็ง 197 HB
Y-block หน้า 12 มม.	C	Ni	Mo	Normalized, 302 HB
	33.4	0.52	0.28	ชุบแข็ง, 425°C, 370 HB
Y-block หน้า 12 มม.	C	Ni	Mo	สภาพหลังจากหล่อ
	3.11	2.14	0.99	หล่อและอบที่ 340°C, 4 ชม.
crank	C	Ni	Mo	สภาพหลังจากหล่อ
	3.30	2.24	0.97	หล่อและอบที่ 280°C, 4 ชม.

หล่อออกมาเป็น crankshaft นั้น ได้ลดปริมาณคาร์บอนลงให้เหลือเพียง 3.3% ได้โครงสร้างจุลภาคที่ค่อนข้างสมบูรณ์แบบ กล่าวคือกราฟที่กลมขนาดเล็ก กระจายตัวสม่ำเสมอ ส่วนพื้นเป็นเบไนท์ ความแข็งในสภาพ as cast 391 HB ความต้านแรงดึง ≈ 90.5 กก./ม² เมื่อนำไปอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความแข็งจะเพิ่มขึ้นถึง 435 HB (อบที่ $280^{\circ}\text{C} \times 4$ ชม.) และความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นถึง 125.6 กก./ม² (อบที่ $280^{\circ}\text{C} \times 4$ ชม.)

ตัวอย่างผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของงานหล่อในสภาวะต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2 ตารางที่ 3 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของงานวิจัยกับเหล็กชนิดอื่น ๆ และตารางที่ 4 เป็นกราฟเปรียบเทียบความแข็งและความแข็งแรงของงานวิจัยและเหล็กกล้า 1040, 4140

4. อภิปรายผลการทดสอบ

โครงสร้างที่เกิดขึ้นในชิ้นงานบาง จะมีความละเอียดและมีความสม่ำเสมอมากกว่าโครงสร้างในชิ้นงานหนาเนื่องจากช่วงเวลาในการแข็งตัว (solidification time) ของชิ้นงานบางมีน้อยกว่า การแข็งตัวที่รวดเร็วนั้นจะทำให้เกิดซูเปอร์คูลิ่ง (supercooling) มากกว่า เป็นผลให้เกิดการก่อตัว (nucleation) ของเฟสของแข็งรวมทั้งกราฟไฟท์ได้ดีกว่า นอกจากนี้เวลาสำหรับการเติบโตของเฟสของแข็งก็จะมีน้อยเป็นผลให้โครงสร้างที่ได้มีความละเอียด กราฟไฟท์มีขนาดเล็ก และสม่ำเสมอ

ในชิ้นงานที่ 1-6 ที่ไม่เกิดโครงสร้างเบไนท์ในเนื้อเหล็กในสภาพหลังการหล่อเนื่องจากเหล็กไม่มี hardenability ที่สูงพอโครงสร้างที่ได้

จึงเป็นโครงสร้างเหล็กหล่อเหนียว (FCD) ปกติเมื่อเพิ่มปริมาณของธาตุผสมโดยเติมนิเกิล และโมลิบดีนัมมากขึ้น hardenability จะสูงขึ้น ทำให้เหล็กมีโครงสร้างในสภาพ as-cast เป็นเบไนท์โดยมีเฟสอื่นหลงเหลืออยู่น้อยมาก เมื่อนำไปอบเพิ่มเติมโครงสร้างที่หลงเหลืออยู่ก็จะกลายเป็นเบไนท์ทั้งหมด

ความแข็งแรงของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น สาเหตุหลักจะมาจากการที่โครงสร้างของเนื้อเหล็กเป็นเบไนท์ ผลของการเติมธาตุจะทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ส่วนหนึ่ง แต่เป็นส่วนน้อยเมื่อเทียบกับสาเหตุแรก ดังจะเห็นได้จากข้อมูลความแข็งแรงของชิ้นงานเมื่อเปรียบเทียบกันในสภาพต่าง ๆ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ความแข็งและความแข็งแรงที่ได้ยังมีการกระจายของข้อมูลอยู่ค่อนข้างมาก การกระจายดังกล่าวนับเป็นคุณลักษณะของชิ้นงานที่ผลิตโดยการหล่อ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างที่เกิดขึ้นในแต่ละแห่งจะไม่เหมือนกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ซึ่งอาจจะเกิด macrosegregation อันจะทำให้ส่วนผสมในแต่ละแห่งแตกต่างกันไปด้วยก็ได้

ความแข็งแรงที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานมีค่าสูงถึงกว่า 120 กก./ม² ซึ่งนับว่าสูงมากเทียบได้กับเหล็กกล้าผสมความแข็งแรงสูงที่ผ่านการชุบแข็งและอบคลายเครียดมาแล้ว ความเหนียวในรูปของการยึดตัวนับว่าอยู่ในระดับใช้ได้ เป็นที่เชื่อได้ว่าเหล็กหล่อที่มีโครงสร้างเนื้อเหล็กเป็นเบไนท์จะมีบทบาทอย่างมากในงานวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการผลิตชิ้นส่วนที่สำคัญ ๆ

5. สรุป

1. ชิ้นงานบางจะได้กราฟไฟท์ขนาดเล็ก และกระจายสม่ำเสมอ โครงสร้างโดยทั่วไปจะละเอียดกว่างานหนา

2. ชิ้นงานบางจะมีความแข็งและความแข็งแรงสูงกว่างานหนา แต่มีการกระจายของผลการทดสอบค่อนข้างมาก ซึ่งเป็นปกติของชิ้นงานหล่อ

3. การผลิตเหล็กหล่อเหนียวความแข็งแรงสูง โดยการอบชุบออสเทมเปอร์ริง จะได้โครงสร้างจุลภาคที่เป็นเบไนท์สมบูรณ์และสม่ำเสมอกว่าการผลิตโดยการเติมธาตุ อย่างไรก็ตามการผลิตทั้ง 2 วิธีจะให้คุณสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกัน

4. การผลิตเหล็กหล่อเหนียวความแข็งแรงสูงโดยไม่ต้องอบชุบนั้น จะต้องเติมธาตุ Ni และ Mo ร่วมกัน จึงจะให้ผลดีที่สุด ปริมาณธาตุที่จะทำให้เกิดโครงสร้างเบไนท์ที่สมบูรณ์คือ Ni \approx 2%, Mo \approx 1% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ความหนาของงาน

5. ถ้าปริมาณคาร์บอนมากเกินไป หรือค่า C.E. สูงเกินไป จะเกิดกราฟไฟท์จำนวนมาก และมีขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติเชิงกลต่ำลง ปริมาณคาร์บอนไม่ควรเกิน 3.5%

6. งานเหล็กหล่อเหนียวความแข็งแรงสูงจะมีคุณสมบัติเชิงกลดีขึ้นเมื่อนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 280-350°C เป็นเวลา 2-4 ชั่วโมง

7. งานที่ผลิตเป็นเหล็กหล่อความแข็งแรงสูงในสภาพหลังจากหล่อ อาจจะมีปัญหาเรื่องการตัดแต่ง เพราะความแข็งแรงค่อนข้างสูง ดังนั้น งานที่ต้องมีการตัดแต่งมากควรผลิตเป็นเหล็กหล่อเหนียว แล้วนำไปตัดแต่งก่อนทำการอบชุบ

REFERENCE

1. Lottridge N.M. and Grindal R.B., "Nodular iron hypoid gears", Proc. SAE Conference on Fatigue, Dearborn, USA, April 1982, 213-218
2. Yicheng Z et al, "Hypoid pinion and ring gears of bainitic nodular iron", Proc. International Foundry Congress, Modrid, Spain, 1979
3. Hagar F.M., "Austempered gears used for engine timing : history-development -design criteria" ASM. Conference, Chicago. USA, 1984
4. Defoirdt I.F, "R & D and Industrial Applications of ADI at Ferromatrix Foundries", AFS World Conference on ADI, Chicago, March 1991
5. Mayer H and Barbezat B, "Sulzer GGG -Austempered Ductile Iron also for heavy sections", ASME International Conference on ADI, Ann Arbor, 1986
6. Vaccari J.A., "Why the interest in ADI castings", American Machinist, September 1989
7. Hornung K, "Techniques for austempering ductile iron", Heat Treatment of Metals," 1986
8. Wilkins on G and Grupte C, "Design consideration and product applicationsj of Cas Tuf," ASME international Conference on ADI, Ann Arbor, 1986
9. Ostling.S., "Bainitic Spheroid Cast Iron G85 for axle boxes", Ball Bearing Journal, Vol. 231
10. Moore W.H., "ADI in perspectives", Casting World, 1987
11. Harding R.A. "Opening up the market for ADI," The Foundryman, 1993
12. KARSAY, S.I., Ductile Iron I, Production Q.I.T. Publication, 1976
13. JIS Handbook, Ferrous Materials and Metallurgy, Japanese Standards Association, 1980.
14. ข้อมูลจากบริษัทกุลธรเคอร์บี้จำกัด