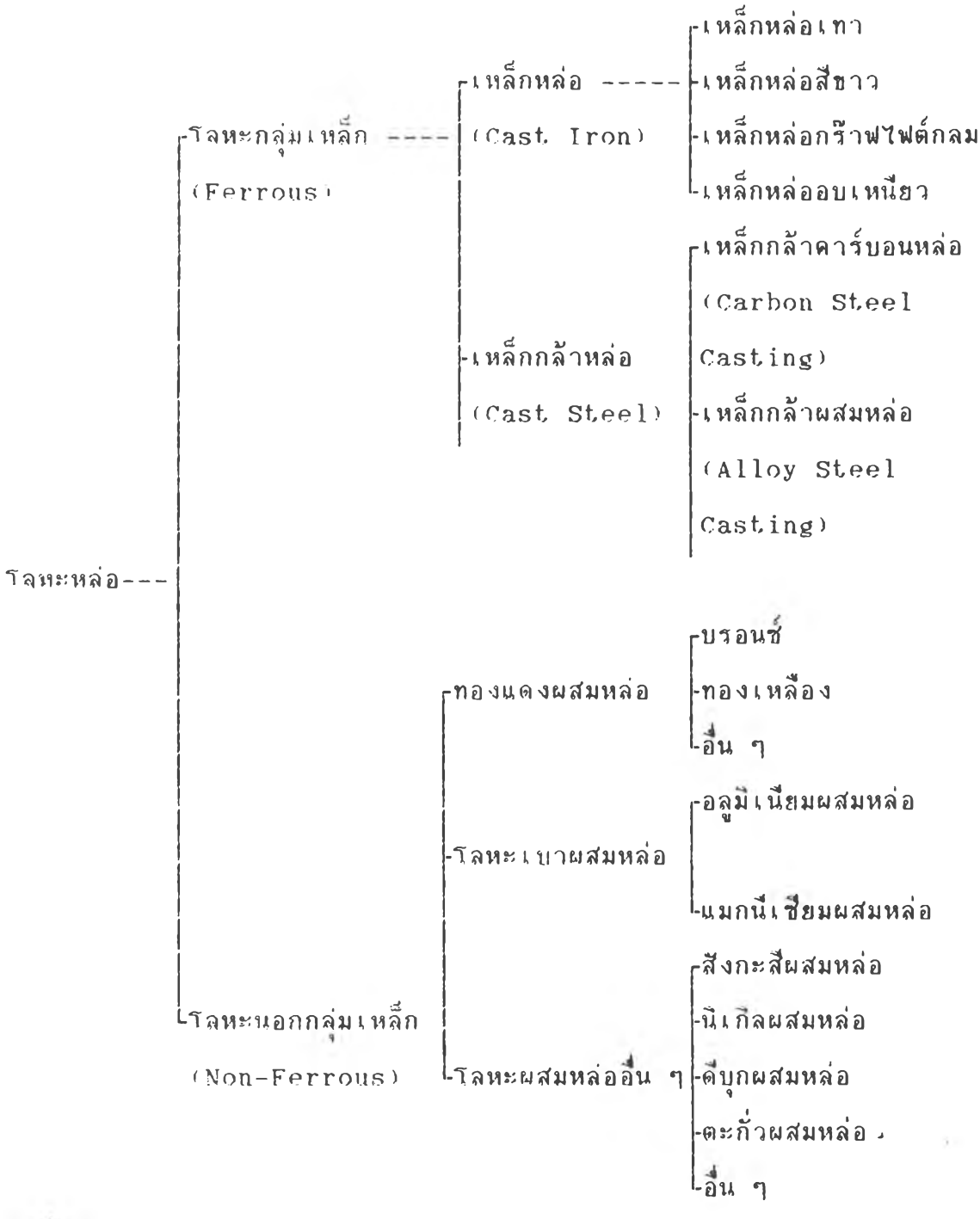
บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการหล่อโลหะ

3.1 ประเภทและคุณลักษณะของโลหะหล่อ

โลหะหล่อนับเป็นวัสดุที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรม คุณสมบัติที่แตกต่างกันของโลหะทำให้สามารถผลิตโลหะหล่อให้มีหลากหลายประเภท แต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัว สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานได้อย่างกว้างขวาง ทริส สูตะบุตร และเดนยิ จิยีอิวา ได้แบ่งโลหะหล่อออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ โลหะกลุ่มเหล็ก (Ferrous) และโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-Ferrous) แต่ละกลุ่มสามารถแบ่งย่อยออกเป็นประเภทต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงโลหะหล่อประเภทต่าง ๆ

ที่มา : หรีส สูตะบุตร และเคนยี จียีอีวา, หล่อโลหะ, (กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ดวงกมลจำกัด, 2537), หน้า 5.

3.1.1 เหล็กหล่อ

มนัส สถิรจินดา ได้รวบรวมรายละเอียดของเหล็กหล่อว่า เหล็กหล่อ (cast Iron) เป็นเหล็กที่รู้จักและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมาเป็นเวลานานแล้ว เหล็กหล่อจะคล้ายเหล็กกล้า (steel) คือเป็นเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่เช่นเดียวกัน และสามารถศึกษาโครงสร้างจากแผนภาพ phase equilibrium ระหว่างเหล็กกับคาร์บอนได้เหมือนกัน โดยปกติเหล็กหล่อที่ผลิตในอุตสาหกรรมจะมีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 1.7-4.3% นอกจากนั้นเหล็กหล่อจะมีธาตุอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย เช่น ธาตุซิลิกอน ซึ่งมีอยู่ประมาณ 0.3-4.0% ธาตุแมงกานีสมีประมาณไม่เกิน 1.5% ธาตุฟอสฟอรัสมีประมาณ 1.0% และธาตุซัลเฟอร์มีประมาณไม่เกิน 0.2%

ตามปกติแล้วปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็กหล่อจะมีมากกว่าในเหล็กเหนียว ปริมาณคาร์บอนนี้ถ้ามีอยู่มากจะทำให้เหล็กหล่อสูญเสียคุณสมบัติด้านความเหนียว (Ductility) คือจะเปราะและแตกง่ายเมื่อถูกแรงกระแทก และไม่สามารถจะฟอร์มขึ้นรูปโดยการรีดหรือดึงขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง วิธีการฟอร์มขึ้นรูปของเหล็กหล่อจะกระทำโดยการหลอมเหล็กให้ละลายแล้วเทลงแบบหล่อที่ทำด้วยทรายหรือวัสดุทนความร้อน จึงได้ชื่อตามกรรมวิธีการฟอร์มรูปร่างว่าเหล็กหล่อ หลังจากหล่อได้รูปร่างใกล้เคียงแล้วจึงนำมากลึงไสหรือเจาะให้ได้รูปร่างสุดท้ายตามต้องการ

เหล็กหล่อแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด แต่ละชนิดมีโครงสร้างพื้นฐานหรือส่วนประกอบภายในที่แตกต่างกัน ส่วนประกอบต่าง ๆ จะสามารถเห็นได้จากกล้องจุลทรรศน์ขยายดูจากชิ้นส่วนตัวอย่าง ซึ่งจะต้องผ่านการขัดเงาและทำความสะอาดโดยแช่ลงในกรดมาเป็นอย่างดีแล้ว เหล็กหล่อที่สำคัญสามารถจำแนกประเภทไว้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

เหล็กหล่อเทา (Gray cast iron) เป็นเหล็กหล่อที่ใช้งานมากประเภทหนึ่ง เนื่องจากมีราคาถูกและมีคุณสมบัติที่เหมาะสมใช้งานในอุตสาหกรรม โครงสร้างของเหล็กหล่อเทาประกอบด้วย เฟอไรท์ (ferrite) หรือเพอไลท์

(pearlite) และมีคาร์บอนอิสระซึ่งมีรูปร่างเป็นเกล็ดแทรกอยู่ในเนื้อเหล็ก คุณสมบัติของเหล็กหล่อเทาจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเหล็ก ขนาดและรูปร่างตลอดจนจำนวนเกล็ดคาร์บอน ความหนาของชิ้นงาน และอัตราการเย็นตัวของชิ้นงาน เหล็กหล่อเทามีความต้านทานแรงดึงต่ำไม่เกิน 35 กก./มม.^{2} มีความเหนียวน้อยแต่มีความต้านทานต่อแรงอัดและรับแรงสั่นสะเทือน (damping capacity) ได้ดี สามารถนำไปใช้ทำแท่นรองรับอุปกรณ์เครื่องมือกลต่าง ๆ ได้ดี

เหล็กหล่อสีขาว (White cast iron) เหล็กหล่อสีขาวคือเหล็กหล่อที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ตั้งแต่ 1.7 หรือ 2.7% ขึ้นไป การเปลี่ยนสภาวะของเหล็กหล่อชนิดนี้ จากสภาพหลอมเหลวไปสู่สภาวะของแข็งจะเป็นระบบเมตาสเตเบิล (Metastable) กล่าวคือ คาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็กทั้งหมดจะอยู่ในรูปของเหล็กคาร์ไบด์หรือซีเมนไตต์ (Fe_3C) ทำให้เหล็กมีคุณสมบัติแข็งและเปราะแตกหักได้ง่าย รอยแตกหรือรอยหักจะดูเป็นสีขาวเหมือนเนื้อเหล็กทั่ว ๆ ไป เหล็กหล่อขาวจะมีความแข็งอยู่ระหว่าง 380-550 H_B ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนและธาตุผสมบางตัว เช่น โครเมียมหรือโมลิบดินัม เหล็กหล่อขาวจึงนิยมใช้ทำชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ต้องการความคงทนเนื่องจากการเสียดสี โดยไม่มีแรงกระแทกมากนัก เช่น อุปกรณ์ที่ใช้ในการบดของแข็ง (grinding equipment) ส่วนประกอบใบพัดของเครื่องยิงทราย จานเจียรนัยเพชร อุปกรณ์ทำซีเมนต์ และอิฐ เป็นต้น

เหล็กหล่อกร๊าฟไฟต์กลม (Spheroidal graphite cast iron) เหล็กหล่อกร๊าฟไฟต์กลมมีชื่อเรียกกันหลายแบบ เช่น Nodular cast iron หรือ Ductile iron เพราะคุณสมบัติและลักษณะของกร๊าฟไฟต์ที่ตกผลึกอยู่ในเนื้อของเหล็กจะอยู่ในลักษณะกลม (Nodular หรือ spheroid) ซึ่งแตกต่างไปจากลักษณะกร๊าฟไฟต์ของเหล็กหล่อเทา ซึ่งอยู่ในรูปแถบยาว (lamellar flakes) คุณลักษณะของกร๊าฟไฟต์ที่เป็นรูปกลมนี้เองที่ทำให้เหล็กชนิดนี้มีคุณสมบัติ

เหนียวรับแรงกระแทกได้ดีกว่าเหล็กหล่อเทา การที่จะทำให้เหล็กมีโครงสร้างเกิดเป็นกร๊าฟไฟต์กลมได้นั้น ทำได้โดยการเติมแมกนีเซียม แคลเซียมหรือซีเรียมลงในน้ำโลหะ เหล็กหล่อกร๊าฟไฟต์กลมมีคุณสมบัติทนแรงดึงได้สูงและมีความเหนียวอยู่ในช่วงของ Low alloy Steel คือทนแรงดึงได้ดีประมาณ 40-70 กก./มม.^{2} และมีคุณสมบัติ ความเหนียวที่แสดงด้วยอัตราการยืดตัว 8-25% ในบางครั้ง เหล็กหล่อชนิดนี้มักจะถูกใช้งานแทนเหล็กหล่อสีเทาในกรณีที่ต้องการความแข็งแรง ความทนต่อการกระแทกและทนต่อการสึกหรอ

เหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable cast iron) เหล็กหล่ออบเหนียวจะเกิดจากการอบเหล็กหล่อขาวโดยผ่านกรรมวิธีอบความร้อนที่อุณหภูมิ 100 -150 องศาเซลเซียส ในเตาอบเป็นเวลานาน โครงสร้างซีเมนไตต์ของเหล็กหล่อขาวจะถูกเปลี่ยนเป็นเฟอไรต์หรือเพอไลท์และคาร์บอนจะแยกตัวออกมา เหล็กหล่ออบเหนียวมีความทนแรงดึงสูงกว่าเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อสีขาว แต่จะต่ำกว่าเหล็กหล่อกร๊าฟไฟต์กลมเล็กน้อย คือ มีความทนแรงดึงไม่เกิน 40 กก./มม.^{2} และจะมีความทนต่อการกระแทก (toughness) และการยืดตัว (elongation) ได้ดี แต่เหล็กหล่อชนิดนี้จะมีราคาสูงเนื่องจากต้องผ่านการอบ (anneal) และไม่เหมาะที่จะทำชิ้นงานหล่อหนา ๆ แต่เหมาะที่จะทำชิ้นงานใช้งานกรณีที่มีความหนาน้อย ๆ แต่ต้องการคุณภาพของน้ำเหล็กมีการไหลดี (castability) เช่น งานหล่อข้อต่อท่อน้ำ และชิ้นส่วนเครื่องจักรบางประเภท

3.1.2 เหล็กกล้าหล่อ (Cast steel)

เหล็กกล้าหล่อแยกออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ตามที่ มนัส สถิรจินดา กล่าวไว้ในหนังสือเหล็กกล้า STEEL คือ เหล็กกล้าคาร์บอนหล่อ (Carbon steel castings) และเหล็กกล้าผสมหล่อ (Alloy steel castings)

เหล็กกล้าคาร์บอนหล่อ (Carbon steel castings) หมายถึง เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนผสมเป็นหลักเพียงอย่างเดียว ธาตุอื่น ๆ ที่ผสมอยู่ เช่น

ซิลิกอน แมงกานีส ฟอสฟอรัส และกำมะถัน จะเป็นธาตุที่ติดมาซึ่งอาจจะจัดไว้ในรูปของสารมลทิน ยกเว้นเฉพาะแมงกานีส ซิลิกอน และอลูมิเนียม ซึ่งมีบทบาทเป็นตัวกำจัดแก๊ส (Deoxidizen) ซึ่งอาจจะเหลือตกค้างอยู่ภายหลัง เมื่อทำหน้าที่กำจัดแก๊สแล้ว สำหรับแมงกานีสนอกจากกำจัดแก๊สแล้วยังทำหน้าที่เป็นตัวไปดึงกำมะถันมารวมเพื่อลดปริมาณของกำมะถันในเหล็ก เป็นการลดบทบาทของกำมะถันที่มีต่อการเปราะที่อุณหภูมิสูง (Hot-short) ดังนั้นจึงยอมให้มีแมงกานีสได้ 0.5-1% และซิลิกอน 0.2-0.75% สำหรับกำมะถันและฟอสฟอรัสจะต้องให้มีอยู่น้อยไม่เกิน 0.05% เหล็กกล้าคาร์บอนหล่อแบ่งประเภทออกเป็น 3 ประเภท ตามปริมาณของคาร์บอนคือ

1. เหล็กกล้าหล่อคาร์บอนต่ำ มีคาร์บอนไม่เกิน 0.20%

2. เหล็กกล้าหล่อคาร์บอนปานกลาง มีคาร์บอนระหว่าง 0.20-0.5% และ

3. เหล็กกล้าหล่อคาร์บอนสูง มีคาร์บอนมากกว่า 0.5% ขึ้นไป

โดยหลักเกณฑ์ทั่ว ๆ ไปแล้ว เหล็กกล้าคาร์บอนอาจมีคาร์บอนได้สูงถึง 1.7 หรือ 2% แต่ในทางปฏิบัติเหล็กกล้าคาร์บอนหล่อจะผสมคาร์บอนเพียงประมาณไม่เกิน 0.6% เพราะถ้าเกินปริมาณนี้แล้วจะเกิดปัญหาเรื่องการแตกร้าวขณะเย็นตัวในแบบทราย และในขณะทำการตัดรูเท และรูล้นมาก ในเหล็กกล้าหล่อถ้ามีปริมาณคาร์บอนสูงเกิน 0.6% จะต้องผสมธาตุผสมอื่น ๆ ด้วย เพื่อที่จะลดอัตราการแตกร้าวขณะเย็นตัวในแบบทราย เพราะการเกิดซีเมนไตต์ตามขอบเกรนจะน้อยลง และเพื่อให้ออสเตนไนท์เปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่ำลง

ในบางแห่งการแบ่งประเภทของเหล็กกล้าคาร์บอนหล่อ จะแบ่งออกเป็นสี่ประเภท อาศัยทั้งปริมาณคาร์บอนและความแข็งเป็นเกณฑ์แบ่งประเภท ดังเช่น

ประเภทอ่อน (Soft) เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนหล่อที่มีคาร์บอนไม่เกิน 0.2%, Si 0.2-0.75%, Mn 0.5-1%, P 0.05%, S 0.05%

ประเภทครึ่งอ่อน (Semi-soft) มีคาร์บอน
Si 0.2-0.35%, Mn 0.5-1%, P 0.05%,
S 0.05%

ประเภทครึ่งแข็ง (Semi-hard) มีคาร์บอน 0.35-0.5%,
Si 0.2-0.75%, Mn 0.5-1%, P 0.05%,
S 0.05%

ประเภทแข็ง (Hard) มีคาร์บอนมากกว่า 0.5%, Si 0.2-0.75%,
Mn 0.5-1%, P 0.05%, S 0.05%

เหล็กกล้าผสมหล่อ (Alloy Steel Castings) คือ เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย เช่น โครเมี่ยม, นิเกิล, โมลิบดินั่ม, วาเนเดียม, ทังสเตน และโคบอลต์ สำหรับแมงกานีส และซิลิกอน ถ้ามีปริมาณสูงกว่าในเหล็กกล้าคาร์บอนหล่อ จัดว่าเป็นธาตุผสมเช่นเดียวกัน ดังเช่นมีแมงกานีสหรือซิลิกอน เกินกว่า 1% การผสมธาตุต่าง ๆ ลงไปในเหล็กกล้าคาร์บอน ส่วนใหญ่มุ่งที่จะปรับปรุงคุณสมบัติชุบแข็ง (Hardenability) คุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนทั้งที่อุณหภูมิปกติและอุณหภูมิสูง (Resistance to corrosion or scaling) และในบางกรณีเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติตัวนำไฟฟ้า และคุณสมบัติเกี่ยวกับแม่เหล็ก

3.1.3 ทองแดงผสมหล่อ

จากหนังสือหล่อโลหะโดย หริส สูตะบุตร และเดนยี จิยิอิวา กล่าวว่า โลหะผสมที่เรียกว่าทองแดงผสมหล่อมีหลายประเภท ได้แก่ บรอนซ์ ทองเหลือง ทองเหลืองแข็งแรงพิเศษ (high tension brass) อลูมิเนียมบรอนซ์ ฯลฯ

บรอนซ์เป็นโลหะผสมที่ประกอบด้วยทองแดงและดีบุก บรอนซ์ที่ใช้กันมักมีดีบุกน้อยกว่า 15% อุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าของเหล็กผสมและหล่อได้ดีเท่า ๆ กับเหล็กหล่อเทา ทนต่อการกัดกร่อนและการสึกหรอได้ดีจึงใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องกล แต่ราคาเป็น 5~10 เท่าของเหล็กหล่อเทา ดังนั้นจึงใช้ทำเฉพาะชิ้นส่วนที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ

บรอนซ์มี 2 ชนิด คือ ฟอสเฟอร์บรอนซ์ ซึ่งได้รับการเติมฟอสฟอรัสทำให้ทนต่อการสึกหรอได้ดีขึ้นและบรอนซ์ตะกั่ว (Lead bronze) ซึ่งมีตะกั่วผสมอยู่ ใช้ทำแบริง

ทองเหลืองประกอบด้วยทองแดงและสังกะสี และทองเหลืองแข็งแรงพิเศษประกอบด้วยทองแดง อลูมิเนียม เหล็ก แมงกานีส นิเกิล ฯลฯ โลหะต่าง ๆ ที่เข้าไปผสมนี้ทำให้มีคุณสมบัติทางกลดีขึ้น

อลูมิเนียมบรอนซ์เป็นโลหะผสมระหว่างทองแดง อลูมิเนียม ฯลฯ ทนการสึกหรอและการกัดกร่อนได้ดี นอกจากนี้ยังมีชิ้นงานหล่อที่ทำด้วยทองแดงบริสุทธิ์

3.1.4 โลหะเบาผสมหล่อ

ได้แก่มีอลูมิเนียมผสมหล่อ และแมกนีเซียมผสมหล่อ ฯลฯ

อลูมิเนียมบริสุทธิ์หล่อขึ้นรูปได้ยากและมีคุณสมบัติทางกลไม่ดี ดังนั้นจึงใช้โลหะผสมที่ทำให้มีคุณสมบัติดีขึ้น โดยการเติมทองแดง ซิลิกอน แมกนีเซียม แมงกานีส นิเกิล ฯลฯ อลูมิเนียมผสมหล่อมีน้ำหนักเบา และมีความนำความร้อน (thermal conductivity) สูง อลูมิเนียมผสมชุด Al-S, Cu-Si และ Al-Si-Mg ใช้สำหรับทำชิ้นส่วนเครื่องกล ชุด Al-Cu-Ni-Mg และ Al-Si-Cu-Ni-Mg ใช้ทำชิ้นส่วนที่ต้องทนความร้อนและชุด Al-Mg สำหรับชิ้นส่วนที่ต้องทนต่อการกัดกร่อน

แมกนีเซียมผสมเบากว่าโลหะที่ใช้กันแพร่หลายอย่างอื่น มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.8 มักใช้อลูมิเนียม แมงกานีส เบริลเลียม ฯลฯ ผสมกับแมกนีเซียมในการทำโลหะผสม

3.1.5 โลหะผสมหล่ออื่น ๆ

ได้แก่สังกะสีผสมซึ่งมีอลูมิเนียมอยู่เล็กน้อยใช้ในการหล่อแบบแม่พิมพ์ (die casting) โมเนลเมทัล (monel metal) เป็นนิเกลผสมชนิดหนึ่งที่มีทองแดงผสมอยู่ เฮสเทลลอย (hastelloy) เป็นนิเกิลผสม มีโมลิบดินั่ม โครเมียม และซิลิกอนผสมอยู่

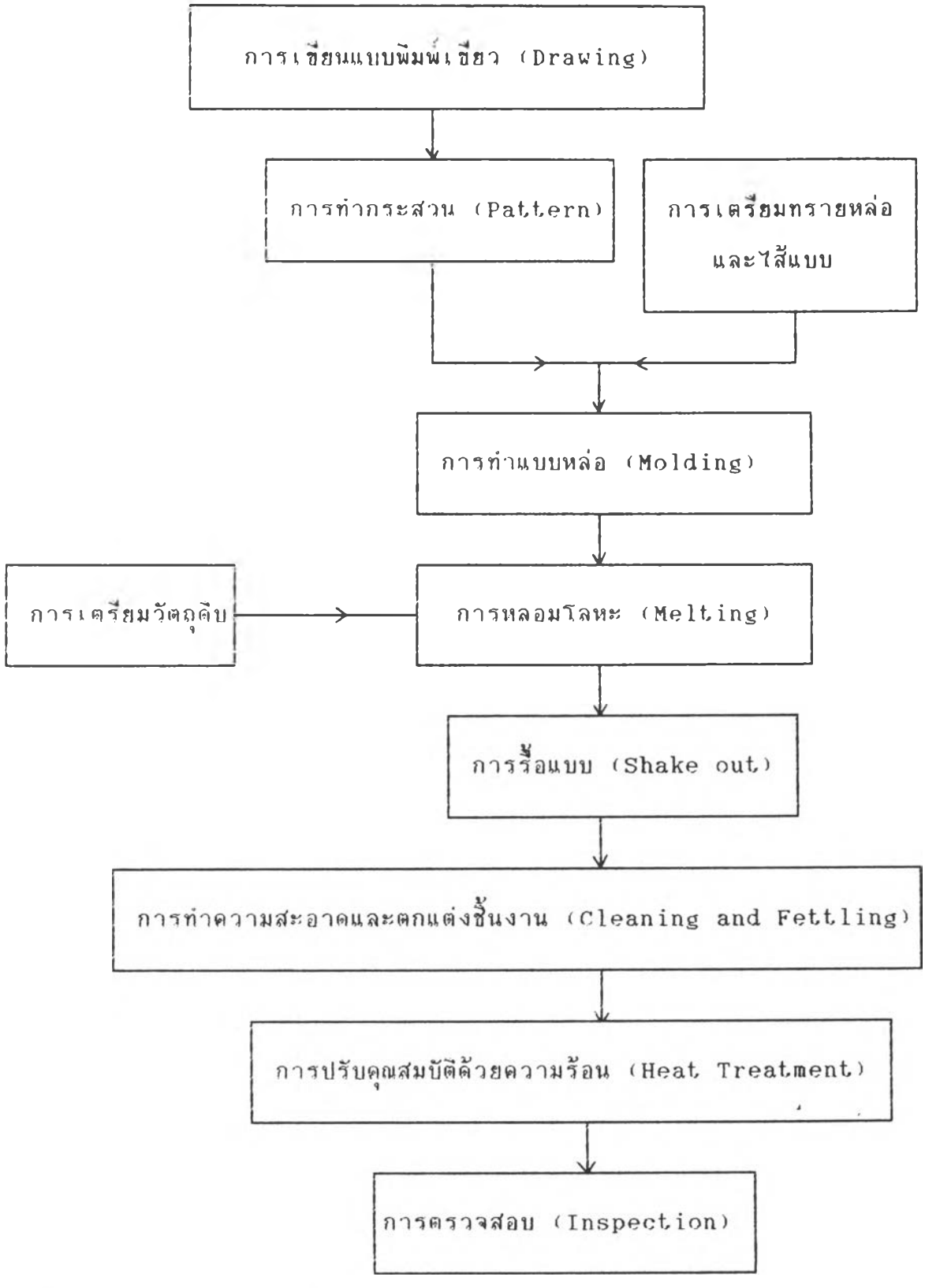
โลหะประเภทตะกั่วผสมมีโลหะใช้ทำตัวพิมพ์ ซึ่งมีตะกั่ว ทองแดง และดีบุกเป็นส่วนผสมและมีโลหะทำแบริงซึ่งมีตะกั่ว ทองแดงและพลวงเป็นส่วนผสม เป็นต้น

3.2 กระบวนการผลิตโลหะหล่อ

กระบวนการผลิตโลหะหล่อได้กำเนิดขึ้นเป็นเวลานานแล้ว ถึงแม้ว่าในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาช่วยในการผลิตเพื่อให้ได้งานหล่อที่มีคุณภาพและสามารถผลิตได้ในปริมาณสูงก็ตาม แต่หลักการที่สำคัญ ๆ ในกระบวนการผลิตโลหะหล่อยังคงไม่เปลี่ยนแปลงและปฏิบัติกันอยู่ในแนวทางเดิมซึ่งเหมือนกับในอดีต

การผลิตโลหะหล่อเริ่มจากการเตรียมแบบหล่อที่มีลักษณะเป็นโพรงให้น้ำโลหะแทรกเข้าไปได้ จากนั้นจะทำการหลอมโลหะให้กลายเป็นของเหลวและนำไปเทลงในแบบหล่อ ทิ้งไว้สักระยะหนึ่ง น้ำโลหะในแบบหล่อจะแข็งตัวและเย็นตัวลง จึงทำการรื้อแบบออกจะได้ชิ้นงานโลหะที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ

กระบวนการผลิตโลหะหล่อมีขั้นตอนและรายละเอียด สรุปเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กระบวนการผลิตโลหะหล่อโดยใช้แบบหล่อทราย

ที่มา : สำนักบริการวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, อุตสาหกรรมหล่อโลหะ, (2536), หน้า 27.

1. การเขียนแบบพิมพ์เขียว

กระบวนการผลิตงานหล่อจะเริ่มจากการเขียนแบบพิมพ์เขียว ในแบบพิมพ์เขียวจะบอกถึงรายละเอียดของขนาด รูปร่าง มาตราส่วน ชื่อชิ้นงาน น้ำหนักวัสดุ การกระทำหลังการผลิต นอกจากนั้นแบบพิมพ์เขียวจะเป็นเอกสารสำคัญที่จะใช้ในการตรวจสอบชิ้นงาน

2. การทำกระสวน (Pattern)

กระสวน คือ ต้นแบบที่จะทำให้เกิดเป็นโพรงหรือช่องว่างขึ้นภายในแบบหล่อ เพื่อให้ได้ชิ้นงานหล่อที่มีขนาดและรูปร่างเหมือนตามแบบของกระสวน การทำกระสวนจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงการเผื่อขนาดจากแบบพิมพ์เขียว (drawing) การชดเชยการหดตัวของโลหะ (shrinkage) การตกแต่งผิว (machine finish allowance) การเผื่อความลาดเอียง (Draft allowance)

วัสดุที่ใช้ในการทำกระสวนมีหลายประเภทได้แก่ ไม้ ซีเมนต์ โลหะ ปูนปลาสเตอร์ และพลาสติก เป็นต้น เกณฑ์ในการพิจารณาเลือกใช้วัสดุในการทำกระสวนจะพิจารณาจาก ขนาด รูปร่าง และจำนวนของงานหล่อ กระสวนสำหรับงานหล่อขนาดเล็กที่ผลิตเป็นจำนวนมาก จะทำด้วยโลหะผสมอลูมิเนียม โลหะผสมทองแดง และพลาสติก เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีความทนทานสามารถใช้งานได้เป็นเวลานาน ส่วนวัสดุที่นิยมใช้ในการทำกระสวนมากที่สุดคือไม้ ไม้ที่ใช้ได้แก่ Japanese cedar, สน short pine, มาฮอกกานีและไม้สัก กระสวนที่ทำจากปูนปลาสเตอร์จะมีความแข็งแรงทนต่อแรงกดได้ดี สามารถตกแต่งผิวให้เรียบได้ง่าย นิยมทำมาใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดของผิวสูง

3. การทำแบบหล่อ (Molding)

แบบหล่อ (mold) เป็นแบบที่ใช้สำหรับหล่อโลหะให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างตามต้องการ แบบหล่อจะมีลักษณะเป็นโพรงอยู่ภายในสำหรับเทโลหะเหลวลงไป เมื่อโลหะแข็งตัวจะได้ชิ้นงานหล่อตามแบบที่ทำไว้ แบบหล่อโดยทั่วไปจะทำจากทราย ทรายที่ใช้ในการทำแบบหล่อมีหลายชนิด สามารถจำแนกออก

ได้เป็นทรายที่ได้จากธรรมชาติ คือ ทรายที่ขุดหรือทำเหมืองแล้วนำมาใช้งานได้โดยไม่ต้องมีการปรุงแต่งใด ๆ และทรายจำพวกทรายซิลิก้า ซึ่งทรายประเภทนี้จำเป็นต้องนำมาผสมกับวัสดุอื่นเพื่อจะใช้ในการทำทรายหล่อ

3.1 ประเภททรายหล่อ

ก) ทรายหล่อธรรมชาติ ทรายหล่อธรรมชาติจะมีเม็ดทรายที่มีซิลิก้าหรือซิลิกอนไดออกไซด์ผสม 74-85% มีดินเหนียวผสมอยู่ระหว่าง 8-22% ส่วนผสมทางเคมีในเม็ดทรายจากทรายหล่อธรรมชาติจะแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ปริมาณของ MgO, Na_2O, CaO, Fe_2O_3 ควรจะต้องมีอยู่ต่ำเพื่อให้ทรายทนความร้อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้จะทำให้เม็ดทรายทนความร้อนได้ต่ำ ขนาดของเม็ดทรายจะเป็นเม็ดทรายละเอียดมากดังจะกล่าวต่อไป

ข) เม็ดทรายซิลิก้า เม็ดทรายซิลิก้าจะได้จากเม็ดทรายแม่น้ำ เม็ดทรายชายทะเลและเม็ดทรายที่ได้จากการบดหินควอทซ์ ซึ่งจะพิจารณาคุณสมบัติของเม็ดทรายเหล่านี้ต่อไป

1) เม็ดทรายแม่น้ำ เม็ดทรายเหล่านี้จะตกตะกอนในส่วนล่างของแม่น้ำทั่วไปโดยมีส่วนผสมทางเคมีในตารางที่ 1 มีความบริสุทธิ์ต่ำกว่า เพราะมี SiO_2 ระหว่าง 72-80% เม็ดทรายจะมีรูปร่างและขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากเม็ดทรายทนความร้อนได้ไม่ค่อยดีจึงควรเติมดินทนไฟ 10-15% เมื่อนำมาใช้ทำทรายหล่อ ไม่ควรนำเม็ดทรายแม่น้ำมาใช้งานเพราะจะทำให้เกิดตำหนิงานหล่อประเภทน้ำโลหะแทรกในผิวแบบทราย รูโพรงอากาศเม็ดทรายฝังในชิ้นงานและเกิดข้อบกพร่องอื่น ๆ ได้ง่าย

2) เม็ดทรายชายทะเล คือ เม็ดทรายที่กองรวมเป็นเนินทรายหลังจากถูกคลื่นซัดล้างให้กลิ้งไปกลิ้งมาเม็ดทรายที่ได้จะมีรูปร่างกลม ในประเทศญี่ปุ่นเม็ดทรายจะมีซิลิกอนไดออกไซด์ค่อนข้างต่ำแม้ว่าจะมี 85-96% ก็ตาม ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเม็ดทรายที่ได้จากชายทะเล

3) เม็ดทรายบด เม็ดทรายชนิดนี้ได้จากการนำหินควอทซ์มาบดด้วยเครื่องบดแบบใบพัดเพื่อให้ได้ขนาดเม็ดทรายที่พอเหมาะ

โดยแยกเป็นสองชนิดคือ หนึ่งบดหินควอทซ์ซึ่งจะให้ความบริสุทธิ์ของเม็ดทราย 96-99% สองเม็ดทรายที่ได้จากการล้างดินเหนียวเซอรามิคจะมีเม็ดทรายสีขาวขุ่นผสมอยู่ด้วย แล้วนำมาขัดให้เม็ดทรายเปลี่ยนจากทรายเม็ดเหลี่ยมเป็นทรายเม็ดกลม เม็ดทรายที่ได้จะมีคุณภาพต่ำลงเล็กน้อย เพราะมี SiO_2 ผสมอยู่ในปริมาณ 94-99% ดังตารางที่ 3.1

ค) เม็ดทรายชนิดพิเศษ (Special sands) นอกเหนือจากทรายหล่อธรรมชาติและเม็ดทรายซิลิก้าที่นำมาใช้ในงานหล่อแล้วยังมีเม็ดทรายอื่น ๆ ที่พิเศษใช้งานเนื่องจากเม็ดทรายเหล่านี้มีคุณสมบัติเฉพาะบางด้านที่เหมาะสมกับน้ำโลหะ ได้แก่ 1) เม็ดทรายโอลิวีน 2) เม็ดทรายเซอร์คอน และ 3) เม็ดทรายโครไมท์

1) เม็ดทรายโอลิวีน เม็ดทรายชนิดนี้มีองค์ประกอบของฟอสเตอร์ไรท์ ($2MgO, SiO_2$) และฟายาไลท์ ($2FeO, SiO_2$) เม็ดทรายชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่ดีในด้านการนำความร้อนเมื่อเทียบกับเม็ดทรายซิลิก้า และมีความสามารถในการทนความร้อนได้ดีกว่า เหมาะที่จะนำมาใช้ในการทำแบบหล่อเหล็กเหนียวชนิดที่มีแมงกานีสผสมในปริมาณมาก (ตารางที่ 3.2)

2) เม็ดทรายเซอร์คอน ในทางทฤษฎีแล้ว เม็ดทรายชนิดนี้ควรจะมี ZrO_2 ในปริมาณ 62.7% และมี SiO_2 32.8% ส่วนประกอบทางเคมีของเม็ดทรายเซอร์คอนที่ได้จากชายทะเลตะวันออกของออสเตรเลียแสดงไว้ในตารางที่ 3.3 เม็ดทรายเซอร์คอนมีคุณสมบัติในการนำความร้อนที่ดีมากคือสูงกว่าเม็ดทรายซิลิก้าถึงสองเท่าและมีความสามารถในการทนความร้อนได้ดีกว่าเม็ดทรายซิลิก้า นอกจากนี้ยังมีการขยายตัวน้อยกว่าเพียงหนึ่งในสามของเม็ดทรายซิลิก้า นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในด้านป้องกันไม่ให้น้ำโลหะแทรกในผิวแบบทรายอีกด้วย เม็ดทรายเซอร์คอนเหมาะที่จะนำมาใช้งานในส่วนหนาหรือส่วนที่เป็นมุมในแบบที่ใช้หล่อเหล็กหล่อหรือเหล็กเหนียว เม็ดทรายจะกลมและละเอียดมีขนาดระหว่าง 65-22 เมช. ผงทรายเซอร์คอนเหมาะจะนำมาใช้ทาเคลือบผิวแบบทรายหล่อ

3) เม็ดทรายโครไมท์ ทางทฤษฎีเม็ดทรายควรจะมีปริมาณ Cr_2O_3 68% ตารางที่ 3.4 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเม็ดทรายโครไมท์ ประเทศญี่ปุ่นนำเข้าทรายโครไมท์จากทวีปอัฟริกา เม็ดทรายโครไมท์ได้จากการแตกร้าวในธรรมชาติและตกตะกอนรวมกัน ขนาดของเม็ดทรายจึงละเอียดโดยมีขนาดระหว่าง 40-270 เมช. อย่างไรก็ตามมีเม็ดทรายโครไมท์หลายอย่างที่มีขนาดความละเอียดแตกต่างกันไป รูปร่างของเม็ดทรายจะเป็นเม็ดเหลี่ยมจนถึงเม็ดมน เม็ดทรายโครไมท์จะมีคุณสมบัติเหมือนกับเม็ดทรายเซอร์คอนจึงนิยมใช้ทำไส้แบบหล่อและทำแบบทรายหล่อในส่วนที่ชิ้นงานมีความหนามาก ๆ

เม็ดทรายโครไมท์ไม่ควรใช้ผสมร่วมกับเม็ดทรายซิลิก้า ในขณะผสมทรายหล่อเพราะจะทำให้คุณสมบัติในการทนความร้อนของเม็ดทรายโครไมท์ต่ำลง แต่สามารถใช้แยกในแต่ละตำแหน่งเฉพาะส่วนที่ติดต่อกันได้ เมื่อมีเม็ดทรายโครไมท์ปะปนในทรายหล่อควรจะแยกเม็ดทรายโครไมท์ออก โดยใช้วิธีล้างทรายให้ตกตะกอนแยกกัน ใช้แรงลบหรือใช้แม่เหล็กดูดแยกออกได้

3.2 <u>ชนิดของแบบหล่อทราย</u>

แบบหล่อทรายมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีวัตถุประสงค์ในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป

ชิ้นงานที่เทหล่อในแบบหล่อทรายจะมีคุณสมบัติทางกลและมีผิวชิ้นงานที่ด้อยกว่าชิ้นงานที่เทหล่อในแบบโลหะ แต่จุดเด่นของแบบหล่อทรายคือ สามารถผลิตชิ้นงานหล่อที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ ความหนาของชิ้นงานที่ทำจากแบบหล่อทรายจะขึ้นอยู่กับประเภทของโลหะที่หล่อ โดยทั่วไปความหนาจะประมาณ 3 ม.ม. ขึ้นไป แบบหล่อทรายมีด้วยกันหลายชนิดแต่ละชนิดจะมีวัตถุประสงค์ในการใช้งานที่แตกต่างกัน แบบหล่อทรายสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. แบบหล่อทรายชื้น (Green sand mold) เป็นแบบหล่อที่ใช้เบนโทไนท์เป็นตัวประสานและใช้น้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดแรง

ยึดเหนี่ยวกันระหว่างเม็ดทราย เป็นแบบหล่อที่นิยมใช้กันมาก เพราะราคาถูก การเตรียมทรายหล่อไม่ยุ่งยาก แต่ความแข็งแรงของแบบหล่อไม่มากนักจึงเหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ไม่ต้องการความเที่ยงตรงมากนัก สามารถทำแบบได้ด้วยมือหรือเครื่องจักร

2. แบบหล่อทรายคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 mold) เป็นแบบหล่อที่ใช้โซเดียมซิลิเกต เป็นตัวประสานเม็ดทรายและผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปเพื่อทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกตให้แข็งตัวยึดเม็ดทรายให้ติดกัน แบบหล่อทราย CO_2 นี้มีความแข็งแรงกว่าแบบหล่อทรายชื้นมาก จึงเหมาะกับชิ้นงานขนาดใหญ่ และมีความเที่ยงตรงกว่าแบบหล่อทรายชื้น

3. แบบหล่อทรายเปลือก (Shell mold) เป็นแบบหล่อที่ใช้ยางสังเคราะห์เป็นตัวประสาน ซึ่งที่นิยมใช้คือ เฟโนลิคเรซิน (Phenoric resin) วิธีการทำจะพ่นหรือเททรายหล่อที่มีตัวประสานเคลือบอยู่ให้สัมผัสกับกระสวนโลหะซึ่งถูกเผาจนร้อน เมื่อตัวประสานได้รับความร้อนก็จะหลอมยึดทรายแต่ละเม็ดให้ติดกัน เมื่อรอจนแบบหล่อมีความหนาตามต้องการแล้ว จึงเททรายที่เหลือกลับเข้าถังเก็บตามเดิม โดยทั่วไปแล้วแบบหล่อทรายเปลือกจะมีความหนาประมาณ 3-5 ม.ม. เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการผิวเรียบ และความเที่ยงตรงสูง ใช้ได้ทั้งเหล็กและโลหะเบา

4. แบบหล่อทรายฟูราน (Furan resin mold) เป็นกระบวนการทำแบบหล่อโดยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างตัวประสานฟูรานเรซินซึ่งเป็นยางสังเคราะห์เฟอร์ฟูริลแอลกอฮอล์ (Furfuryl alcohol) และกรดที่แรงมาก เช่น กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) หรือกรดพาราโทลูอีน (Paratoluene acid) เป็นตัวทำให้แข็งยึดเม็ดทรายให้ติดกัน แบบหล่อทรายฟูรานนี้มีความแข็งแรงและอัตราการระบายอากาศดีมาก จึงเหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเม็ดทราย (%)

		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	lg.loss
ทรายหล่อ	A	75.40	14.88	1.94	0.32	0.36	4.32
ธรรมชาติ	B	79.50	8.00	5.40	0.41	0.20	3.30
ทรายแม่น้ำ	A	76.60	13.50	2.19	2.20	0.78	4.30
ทรายบด	A	98.25	0.90	0.17	0.15	0.09	0.03
	B	95.65	4.40	0.14	0.25	0.09	0.15
ทรายชายหาด	A	95.48	2.29	0.44	0.03	0.20	-

ที่มา : ไอ.ทากิ, "ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการเตรียมและการควบคุมทรายหล่อ (ภาคผนวก) เพื่อการเพิ่มคุณภาพและการเพิ่มผลผลิตชิ้นงานหล่อ," เอกสารในการสัมมนาที่สนับสนุนโดยเจโทรที่ขอนแก่น, 4-5 ตุลาคม 2533 แปลโดย สุภชัย ประเสริฐสกุล, หน้า 1.

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของเม็ดทรายโอลิวีน (%)

MgO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	Alkali	lg.loss
46.00	43.08	8.90	1.02	-	1.18

ที่มา : เรื่องเดียวกัน

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมทางเคมีของเม็ดทรายเซอร์คอน (%)

ZrO_3	TiO_2	SiO_3	Fe_2O_3	Al_2O_3	P_2O_5	Cr_2O_3
65.8	0.26	33.6	0.05	0.25	0.01	0.001

ที่มา : เรื่องเดียวกัน

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมทางเคมีของเม็ดทรายโครไมท์ (%)

Zr_2O_3	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	MgO	CaO	MnO	V_2O_5	$FiTiO_2$
45.3	25.1	14.7	1.6	10.1	0.13	0.26	0.37	0.61

ที่มา : เรื่องเดียวกัน

4. การหลอมโลหะ (Melting)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการป้อนวัตถุดิบ ซึ่งได้แก่ เศษเหล็กหล่อ เหล็กพิก และสารเจือเหล็กต่าง ๆ ลงในเตาหลอม ซึ่งจะต้องมีการคำนวณอัตราส่วนของวัตถุดิบแต่ละชนิดให้เหมาะสมกับชิ้นงานหล่อ นอกจากนั้นในระหว่างการหลอมโลหะจะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ ควบคุมส่วนผสมทางเคมีของน้ำโลหะ เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานที่ต้องการ เตาหลอมโลหะที่นิยมได้แก่

1. เตาคิวโปล่า (cupola) เป็นเตาที่ใช้สำหรับหลอมเหล็กหล่อ โดยใช้ถ่านโค้กเป็นเชื้อเพลิง รูปร่างของเตามีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงตั้ง ประกอบขึ้นด้วยแผ่นเหล็กม้วนเป็นเปลือกเตา ผนังภายในเตากรุไว้ด้วยอิฐทนไฟ เตาคิวโปล่าจะต้องมีอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ ซึ่งได้แก่ เครื่องเป่าลม (Blower) กล่องลม (Wind box) และรูลม (Tuyeres) เตาคิวโปล่ามีข้อดีที่มีการใช้ง่าย สามารถหลอมติดต่อกันได้นานหลายชั่วโมงและต้นทุนในการหลอมต่ำ อย่างไรก็ตาม เตาคิวโปล่ามีข้อเสียหลายประการคือ น้ำโลหะที่หลอมด้วยเตาคิวโปล่าจะสัมผัสกับเชื้อเพลิงคือถ่านโค้กโดยตรงทำให้น้ำโลหะไม่สะอาด คาร์บอนที่อยู่ในถ่านโค้กจะละลายปนอยู่ในน้ำเหล็กได้ และเตาคิวโปล่าจะก่อให้เกิดฝุ่นและควันขึ้นในระหว่างการหลอมโลหะมาก ซึ่งส่งผลให้เกิดผลภาวะทางอากาศได้มาก

2. เตาเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction furnace) เตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าเป็นเตาซึ่งใช้ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในการหลอมโลหะ พลังงานไฟฟ้าได้จากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าปริมาณมากไหลผ่านโลหะที่ต้องการหลอม ความร้อนจะเกิดขึ้นจากความต้านทานของไฟฟ้าในโลหะมากจนกระทั่งโลหะหลอมละลาย เตาเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีจุดเด่นที่สำคัญคือ สามารถหลอมเหล็กกล้าได้ น้ำโลหะจากการหลอมในเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะสะอาด สามารถควบคุมส่วนผสมได้ง่าย โลหะมีการสูญเพลิงและเป็นตะกรันน้อย นอกจากนี้ยังสามารถปรับอุณหภูมิของน้ำโลหะได้ง่าย

3. เตาอาร์คไฟฟ้า (Arc furnace) ความร้อนของเตาอาร์คไฟฟ้าจะได้จากการอาร์คระหว่างอิเลกโทรดคาร์บอนกับโลหะที่จะทำการ

หลอม ขี้ตะกรันที่เกิดขึ้นจะป้องกันไม่ให้ก๊าซในบรรยากาศเข้าไปละลายในน้ำเหล็ก ในระหว่างที่ทำการปรับส่วนผสมของเคมีของน้ำโลหะ

5. การรื้อแบบ (Shake-out)

หลังจากที่ชิ้นงานในแบบหล่อแข็งตัวและเย็นตัวลงแล้ว ก็จะถึงขั้นตอนการแกะชิ้นงานหล่อออกจากแบบหล่อ ซึ่งวิธีในการแกะชิ้นงานออกจากแบบทรายมีอยู่หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็ต้องการเครื่องมือที่แตกต่างกันไปดังนี้

1. ใช้กำลังคนและอุปกรณ์พื้นฐาน เช่น เหล็กสกัด ชะแลง ซึ่งวิธีนี้เหมาะกับแบบหล่อที่มีความแข็งแรงไม่มากนัก เช่น แบบหล่อทรายชื้น ถ้าเป็นแบบหล่อคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องใช้สกัดลมเข้าช่วยเนื่องจากแบบหล่อคาร์บอนไดออกไซด์มีความแข็งมาก

2. เครื่องเขย่า (Shake-out machine) เครื่องที่จะนำทรายออกจากชิ้นงานโดยการเขย่า แบบหล่อซึ่งวางอยู่บนตะแกรงของเครื่องเขย่าจะถูกเขย่าการสั่นสะเทือนจะผ่านหีบบนและหีบล่างไปถึงทรายและชิ้นงานหล่อ ทำให้ทรายแตกออกและตกลงผ่านตะแกรง จะมีสายพานลำเลียงไปรับทรายที่หล่นและขนถ่ายออกไป คงเหลือแต่ชิ้นงานอยู่บนตะแกรง

3. เครื่องทลวงไส้แบบ (Core knock-out machine) เครื่องทลวงไส้แบบนี้จะใช้ในกรณีที่ไส้แบบมีน้ำมันเป็นตัวประสานหรือแบบหล่อทำด้วยทรายชนิดแข็งเอง (Self hardening) ซึ่งแบบหล่อจะแข็งและทำให้แบบทรายแตกออกได้ยาก เครื่องทลวงไส้แบบนี้จะทำงานโดยการนำชิ้นงานวางบนแท่น ซึ่งมีท่อลมกระหนาบอยู่ทั้งสองข้าง เมื่อท่อลมทำงานทรายไส้แบบจะถูกเขย่าและทลวงออกมา

4. การพ่นด้วยน้ำความดันสูง วิธีการนี้จะเป็นการทำความสะอาดชิ้นงานด้วยการพ่นน้ำที่มีความดันสูงราว 150 กก./ซม.^{2} เข้าสู่ชิ้นงานโดยปั๊มพ่นน้ำ วิธีการนี้สามารถพ่นทรายออกได้ทั้งภายในและภายนอกชิ้นงาน เครื่องมือชนิดนี้จะไม่ทำให้เกิดฝุ่น แต่จำเป็นจะต้องมีเครื่องกำจัดน้ำเสีย และต้องมีเครื่องเก็บทรายแห้งหลังจากที่แยกน้ำออกจากทรายแล้ว

6. การทำความสะอาดและตกแต่งชิ้นงาน (Cleaning and Fettling)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทำความสะอาดชิ้นงาน โดยจะกำจัดเศษทรายที่ยังคงเหลือติดค้างอยู่ในชิ้นงานออกไป ด้วยการใช้เครื่องยิงเม็ดโลหะ ซึ่งอุปกรณ์นี้มีอยู่หลายชนิดด้วยกันคือ ชนิดหมุนกวน ชนิด batch barrel type ชนิดโต๊ะ (table type) เป็นต้น จากนั้นจะนำชิ้นงานมาตัดระบบป้อนน้ำโลหะ ซึ่งได้แก่รูล้นรูเทออกไป ด้วยวิธีการการตีหัก ตัดออกด้วยแก๊ส หรือการตัดออกโดยวิธีกล และสุดท้ายของขั้นตอนจะทำการตกแต่งรอยครีบต่าง ๆ ที่ยังปรากฏอยู่ในชิ้นงานออก ด้วยการใช้ค้อนถากออกหรือตกแต่งด้วยเครื่องเจียรนัย

7. การปรับคุณสมบัติงานหล่อด้วยความร้อน (Heat treatment)

การใช้งานชิ้นงานหล่อบางประเภทต้องการความแข็งแรง ความทนทานต่อการสึกกร่อนและคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการปรับคุณสมบัติงานหล่อด้วยความร้อน โดยการให้อุณหภูมิที่เหมาะสมกับชิ้นงานหล่อชั่วระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นค่อยลดอุณหภูมิให้เย็นลงถึงระดับอุณหภูมิปานกลาง การปรับคุณสมบัติงานหล่อด้วยความร้อนมีด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ การอบปรับคุณสมบัติหรือการอบอ่อน (Annealing) การอบเพื่อคลายเครียด (Stress relieving) การอบชุบแข็ง (Hardening) และการอบเพื่อปรับปรุงผลึก หรือการอบปกติ (Normalizing)

8. การตรวจสอบชิ้นงานหล่อ

การตรวจสอบชิ้นงานหล่อมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกชิ้นงานว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธว่าเป็นชิ้นงานเสีย โดยจะต้องมีเกณฑ์มาตรฐานใช้ในการพิจารณา การตรวจสอบชิ้นงานหล่อสามารถกระทำได้ทั้งได้ทั้งการทดสอบแบบทำลาย (Destructive test) และการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non destructive test) โดยแบ่งเป็นวิธีต่าง ๆ ดังนี้

1. การตรวจสอบด้วยสายตา เป็นการตรวจสอบเพื่อหาจุดบกพร่องของชิ้นงานหล่อและตรวจสอบความเรียบร้อยทั่วไป

2. การวัดขนาดมิติต่าง ๆ เทียบกับแบบ โดยการใช้อุปกรณ์วัด เช่น ไม้บรรทัดวัด เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ เป็นต้น

3. การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี โดยใช้เครื่อง spectrometer หรือเครื่อง atomic absorption

4. การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างมาขัดและกัดด้วยสารเคมีจากนั้นจึงใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจดูโครงสร้าง

5. การตรวจสอบด้วยวิธีการไม่ทำลาย เช่น

- การถ่ายภาพด้วยรังสี (radiographic test)
- การตรวจด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (ultrasonic test)
- การตรวจด้วยวิธีผงแม่เหล็ก (magnetic particle test)
- การตรวจด้วยวิธีน้ำยาซึม (liquid penetrant test)
- การตรวจด้วยวิธีกระแสไหลวน (eddy carrent test)

6. การตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของงานหล่อ

- การทดสอบความแข็ง
- การทดสอบค่าความต้านแรงดึง
- การทดสอบค่าความต้านแรงกระแทก

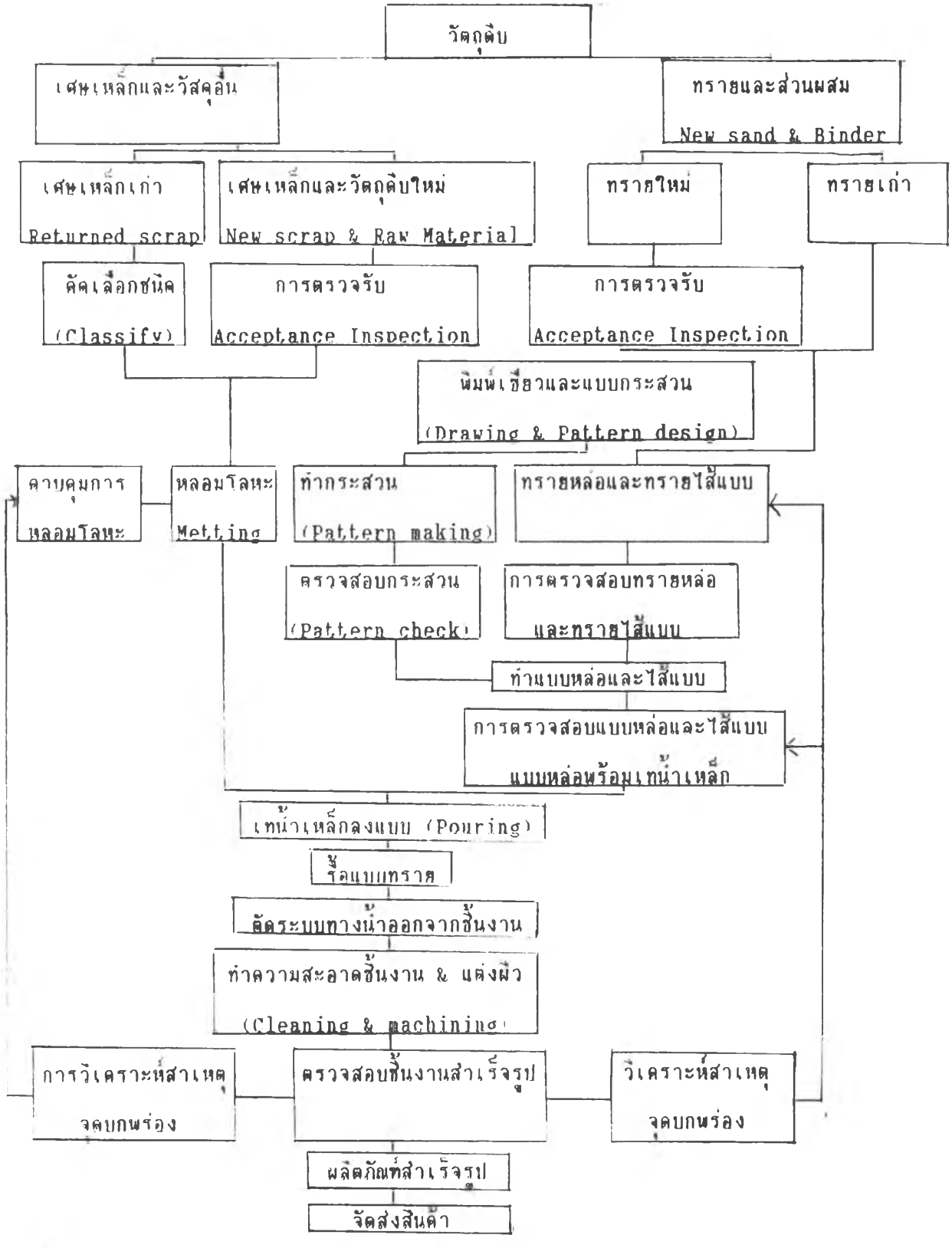
3.3 การควบคุมคุณภาพงานหล่อโลหะ

ในปัจจุบันผู้ประกอบการผลิตอยู่ในสถานะที่ต้องแข่งขันกันอย่างสูง สิ่งสำคัญที่สุดอย่างหนึ่งที่จะทำให้ผู้ประกอบการสามารถยืนหยัดอยู่ได้คือ การรักษาระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมหล่อโลหะเป็นอุตสาหกรรมที่จะต้องมีการให้ความสำคัญในเรื่องคุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างยิ่ง ผู้ผลิตงานหล่อจำเป็นจะต้องผลิตชิ้นงานให้ได้มาตรฐาน มีคุณสมบัติทางด้านโลหะที่ถูกต้อง มีขนาดเที่ยงตรง และน้ำหนักของชิ้นงาน

สวยงามและทนทาน การควบคุมคุณภาพในงานหล่อโลหะเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งในการผลิตงานหล่อโลหะและรักษาระดับการควบคุมคุณภาพจะช่วยเพิ่มมาตรฐานงานและรักษาระดับในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ช่วยให้อัตราผลผลิตมีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นและจะช่วยลดปัญหาในด้านการส่งของไม่ทันเวลาได้ ในการดำเนินงานการควบคุมคุณภาพจะกระทำโดยกำหนดมาตรฐานทุกอย่างในด้านวัตถุดิบ กระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป และการนำวิธีการทางสถิติมาช่วยเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อลดอัตราการเกิดจุดบกพร่องในการหล่อ ซึ่งจะเป็นการยกระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์และสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ด้วยต้นทุนที่น้อยที่สุด

คุณภาพของงานหล่อจะมีความแตกต่างกันโดยขึ้นกับปัจจัย 4 m ได้แก่ วัตถุดิบ เครื่องจักร วิธีการ และผู้ปฏิบัติการ โดยเฉพาะกระบวนการหล่อโลหะเป็นกระบวนการที่มีขั้นตอนในการผลิตหลายขั้นตอน แต่ละขั้นตอนมีความละเอียดอ่อนและซับซ้อน ซึ่งจะมีปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในด้านคุณภาพอยู่มาก และปัจจัยในด้านผู้ปฏิบัติงานก็เป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของชิ้นงานหล่อ

การควบคุมคุณภาพงานหล่อจะมีอยู่ในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิตคือ ตั้งแต่การทำกระสวน การเตรียมทรายหล่อ การทำแบบหล่อ การเทหล่อ การตกแต่งชิ้นงาน จนถึงผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป แผนผังแสดงการควบคุมคุณภาพในระหว่างการผลิต แสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิตโลหะหล่อ

ที่มา : กานุวัฒน์ ศรียางกรศรี และวิจักษณ์ รัตนสุวรรณ, <u>การยกระดับคุณภาพของชิ้นงานหล่อ Ferrous และ Non-ferrous</u>, กรุงเทพมหานคร : สถาบันพัฒนาเครื่องจักรกลและโลหะการ, 2534, หน้า 208.

3.3.1 การควบคุมทรายทำแบบหล่อ

ทรายหล่อนับเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำแบบทราย ทรายหล่อที่มีคุณสมบัติดีมีสภาพเหมาะสมในการทำแบบจะเป็นปัจจัยส่งเสริมให้ผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพ ลดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน ทรายหล่อที่เหมาะในการนำมาใช้ทำแบบทรายควรจะมีคุณสมบัติดังนี้

1. ทนความร้อนได้สูง
2. สามารถระบายอากาศได้ดีในขณะที่เทน้ำโลหะ
3. มีความแข็งแรงทนทานต่อแรงอัดของน้ำโลหะ
4. มีความแน่นและรักษาสภาพได้ดี
5. ทำลายหรือสลายตัวได้ง่ายหลังจากหล่อโลหะแล้วและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

การตรวจคุณสมบัติของทรายหล่อสามารถทดสอบได้หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่

1. การวัดปริมาณความชื้น (Moisture content Test) วิธีนี้กระทำโดยนำทรายที่ผสมแล้วปริมาณ 50 กรัม ใส่ในเตาอบที่อุณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งถึงสองชั่วโมง ปล่อยให้ทรายเย็นลงถึงอุณหภูมิห้องในเครื่องทำให้แห้ง (desiccator) แล้วชั่งอีกครั้งหนึ่ง เพื่อหาว่าน้ำหนักลดลงเท่าไร น้ำหนักที่ลดลงเป็นเปอร์เซนต์ของน้ำหนักเดิม หมายถึง ปริมาณความชื้นอิสระ (free moisture)

2. การวัดอัตราลมผ่าน (Permeability test) การวัดอัตราลมผ่านเป็นการทดสอบว่าช่องว่างระหว่างเม็ดทรายหล่อจะยอมให้แก๊ซผ่านออกได้สะดวกเพียงใด การทดสอบทำได้โดยการใช้เครื่องตรวจสอบคำนวณเวลาที่ให้อากาศปริมาตร 2000 ซีซี ผ่านลงไปในชิ้นงานตัวอย่างทรายที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 50 มม. โดยทำการอัดด้วยความดันคงที่

3. <u>การทดสอบค่าความทนทานต่อการอัด</u> (Compressive strength Test) ค่าความทนทานต่อการอัดวัดได้โดยเครื่องทดสอบความเค้นแรงอัดโดยเพิ่มน้ำหนักกดลงไปบนชิ้นตัวอย่างของทรายที่มีความชื้นจนกระทั่งแตกหัก ทรายที่มีค่าความทนทานต่อการอัดต่ำมากไม่ควรนำทรายนั้นมาใช้ทำแบบหล่อ ค่าที่ได้สำหรับทรายชื้นควรอยู่ระหว่าง 0.7-1.2 กก./ตร.ซม.

4. <u>การทดสอบหาลักษณะการกระจายของขนาดเม็ดทราย</u> (Sand distribution Test) การทดสอบวิธีนี้จะใช้เครื่องทดสอบซึ่งจะมีตะแกรงร่อนเป็นตะแกรงมาตรฐานสำหรับขนาดการกระจายตัวของเม็ดทราย ที่มีขนาดต่าง ๆ กัน อัน จำนวน 13 ชั้น ใช้มอเตอร์เป็นตัวเขย่าตะแกรงแต่ละชั้นจะเรียกเป็นนัมเบอร์เมช (mesh) ตะแกรงที่มีเมชน้อยรูตะแกรงจะโตกว่าตะแกรงที่มีเมชมาก หลังจากที่เครื่องเขย่าแล้วจะมีทรายตกค้างอยู่ในตะแกรง จากนั้นนำทรายไปชั่งและหาเปอร์เซนต์ของทรายแต่ละขนาด ซึ่งจะบอกถึงการกระจายของเม็ดทรายได้

5. <u>การทดสอบหาปริมาณของตัวประสาน</u> (Binder content) ทรายหล่อที่นำกลับมาใช้อีกจะต้องเติมตัวประสานลงไปเพื่อทดแทนของเดิมที่เสื่อมสภาพ เมื่อทรายหล่อนำกลับมาใช้งานหลาย ๆ ครั้ง ปริมาณของตัวประสานที่เติมลงไปจะมีมากขึ้นจนไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน จึงจำเป็นต้องตรวจสอบหาปริมาณของตัวประสานของทรายหล่อทุกครั้งก่อนปรับปรุงคุณภาพของทราย ทรายที่ใช้ทำแบบหล่อแต่ละประเภทต้องการคุณสมบัติของทรายที่แตกตัวกันเพื่อให้มีสภาพเหมาะสมต่อการใช้งานต่าง ๆ ตารางที่ 3.5 แสดงคุณสมบัติของทรายทำแบบหล่อประเภทต่าง ๆ

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของทรายทำแบบหล่อประเภทต่าง ๆ

	ชนิดของทรายทำแบบหล่อ	การใช้งาน	ปริมาณน้ำ %	อัตราลมผ่านขณะชื้น	ความทนทานต่อการอัดขณะชื้น (ก.ก./ซม.^{2})	ความทนทานต่อการอัดขณะแห้ง (ก.ก./ซม.^{2})
1	ทรายหล่อชื้น	ใช้กับแบบหล่อที่ทำด้วยมือและหล่อชิ้นงานขนาดเล็ก	6-7	75-85	0.7-1.2 (10-15 ปอนด์/นิ้ว^2)	
2	ทรายหล่อชื้น	ใช้กับแบบหล่อที่ทำด้วยเครื่องและหล่อชิ้นงานขนาดเล็ก	4-5	70-80	0.7-1.2	
3	ทรายหล่อชื้น ทรายหล่อแห้งอุณหภูมิต่ำ	ใช้กับแบบหล่อทำด้วยมือและหล่อชิ้นงานขนาดปานกลาง	4.5-6	80-120	0.7-1.2	
4	ทรายหล่อแห้งอุณหภูมิสูง	ใช้หล่อชิ้นงานขนาดใหญ่	8-10	90-130	0-8-1.4 (11-20 ปอนด์/นิ้ว^2)	
5	ทรายหล่อแห้งอุณหภูมิต่ำ	ใช้ทำไส้แบบ	6-7	90-100		10-14

ตารางที่ 3.5 (ต่อ)

	ชนิดของทรายทำแบบหล่อ	การใช้งาน	ปริมาณน้ำ %	อัตราลมผ่านขณะชื้น	ความทนทานต่อการอัดขณะชื้น (ก.ก./ซม.^{2})	ความทนทานต่อการอัดขณะ (แห้ง ก.ก./ซม.^{2})
6	ทรายCo_2	ใช้ทำไส้แบบ	1.2-2.5	90-100		15 (หลังจากผ่านแก๊ส 3 ชั่วโมง)
7	ทรายซีเมนต์	ใช้หล่อชิ้นงานขนาดใหญ่ไส้แบบ	3-3.5	100-120		14-17.5
8	ทรายฟูราน	ใช้หล่อชิ้นงานขนาดกลางและใหญ่และชิ้นงานที่ไม่สามารถหล่อด้วยแบบทรายหล่อชื้น	0			25
9	ทรายแข็งตัวเองด้วยฟีนอลเรซิน	ใช้หล่อชิ้นงานขนาดกลางและใหญ่และชิ้นงานที่ไม่สามารถหล่อด้วยแบบทรายหล่อชื้น	0			25

ตารางที่ 3.5 (ต่อ)

	ชนิดของทราย ทำแบบหล่อ	การใช้งาน	ปริมาณน้ำ %	อัตราลม ผ่านขณะชื้น	ความทนทานต่อ การอัดขณะชื้น (ก.ก./ซม.^{2})	ความทนทาน ต่อการอัดขณะ (แห้ง ก.ก./ซม.^{2})
10	ทรายแข็ง ตัวเองด้วย ฟินอลเรซิน	ใช้หล่อชิ้นงาน ขนาดกลางและ ใหญ่และชิ้นงาน ที่ไม่สามารถหล่อ ด้วยแบบทราย หล่อชื้น	0			40
11	ทรายแข็ง ตัวเองด้วยการ ผ่านแก๊สเอมีน	ใช้ทำไส้แบบ	0			13
12	ทรายแข็ง ตัวเองด้วยการ ผ่านแก๊ส SO_2	ใช้ทำไส้แบบ	0			28
13	ทรายแข็ง ตัวเองโดย การบ่มด้วย ความร้อน	ใช้ทำไส้แบบ	0			30*

หมายเหตุ *ทิ้งไว้ 10 นาที

ที่มา : ศิริชัย โพธิดาปนะ และชาญเดช นิสิษฐ์ไพบูลย์, ทรายทำแบบหล่อโลหะ (สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ), หน้า 32-33.

3.3.2 การควบคุมคุณภาพในกระบวนการหลอมโลหะ

ในกระบวนการหล่อหลอมโลหะจะมีปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้องและส่งผลกับคุณภาพของน้ำโลหะ ปัจจัยเหล่านั้นประกอบด้วยวัตถุดิบที่เป็นโลหะ สารเคมีในการปรับคุณสมบัติของน้ำโลหะ ตลอดจนวัตถุที่ใช้ในเตาหลอม ซึ่งได้แก่ ถ่านโค้ก หินปูน และอิฐทนไฟ เป็นต้น และในระหว่างการหลอมโลหะจำเป็นต้องทำการทดสอบและประเมินคุณสมบัติของน้ำโลหะอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ทราบและรักษาระดับคุณภาพของน้ำโลหะ

คุณภาพของวัตถุดิบ

1. วัสดุที่เป็นโลหะ

วัสดุหลักที่นำมาหลอมโดยทั่วไปคือ เหล็กดิบ เศษเหล็กหล่อและเศษเหล็กเหนียว

ก) เหล็กดิบหรือเหล็กพิก

เหล็กดิบแยกออกเป็นสองอย่างใหญ่ ๆ คือ เหล็กดิบสำหรับทำเหล็กหล่อและเหล็กดิบที่จะใช้ทำเหล็กเหนียว

ตารางที่ 3.6 และตารางที่ 3.7 แสดงส่วนผสมทางเคมีในเหล็กดิบที่จะนำมาใช้ทำเหล็กเหนียวและใช้ทำเหล็กหล่อตามลำดับ

ตามมาตรฐานของญี่ปุ่น (JIS) เหล็กดิบที่ใช้ทำเหล็กหล่อจะจำแนกไปตามการใช้งานที่มีสามประเภท โดยประเภทที่ 2 และประเภทที่ 3 จะทำการปรับให้มีกำมะถันและฟอสฟอรัสผสมในเนื้อเหล็กในปริมาณต่ำ รวมทั้งกำหนดปริมาณของโครเมี่ยมที่ผสมอยู่ด้วย

ในปัจจุบันปริมาณความต้องการใช้เหล็กหล่อกราฟไฟต์กลมเพิ่มขึ้นอย่างมาก และยังต้องการใช้เหล็กหล่อกราฟไฟต์กลมที่มีคุณภาพสูงเพิ่มขึ้นด้วย ผู้ผลิตเหล็กดิบจึงผลิตเหล็กดิบที่มีปริมาณคาร์บอนผสมในปริมาณมากแต่มีปริมาณแมงกานีสและกำมะถันผสมในปริมาณน้อย

ตารางที่ 3.6 มาตรฐานเหล็กดิบหรือเหล็กหิกใช้ผลิตเหล็กเหนียว (JIS G 2201-1976)

ชนิด			ส่วนผสมเคมี (%)						หมายเหตุ
			C	Si	Mn	P	S	Cu	
1st	1		3.50<	1.20>	0.40<	0.300>	0.050>	-	ใช้ผลิตเหล็กเหนียวจำแนกเป็นเบอร์ 1, 2 ตามแต่คุณภาพ
	2		3.50<	1.40>	0.40<	0.500>	0.070>	-	
3rd	1	A	3.50<	0.50>	0.40>	0.350>	0.050>	0.02>	ผลิตจากเตาไฟฟ้าโดยใช้แร่เป็นหินทรายเหล็ก จำแนกเป็น A และ B ตามปริมาณ Mn
		B	3.50<	0.50>	0.40<	0.350>	0.050>	0.02>	

ที่มา : เอ็น.ยามานะกะ, "การปฏิบัติงานเตาคิวโปล่าเพื่อการเพิ่มคุณภาพและการเพิ่มผลผลิตชิ้นงานหล่อ," เอกสารการสัมมนาที่สนับสนุนโดยเจโทรที่ขอนแก่น, 4-5 กันยายน 2533 แปลโดย สุภชัย ประเสริฐสกุล, หน้า 13.

ตารางที่ 3.7 มาตรฐานเหล็กดิบที่ใช้ผลิตเหล็กหล่อ (JIS G 2202-1976)

ชนิด			ส่วนผสมเคมี (%)						หมายเหตุ
			C	Si	Ma	P	S	Cu	
1st	1	A	3.40<	1.40 1.80	0.30 0.90	0.300>	0.050>	-	ใช้ผลิตเหล็กหล่อ จำแนกเป็นเบอร์ 1, 2 ตามคุณภาพ นอกจากนี้เบอร์ 1 ยังแยกเป็น A, B, C และ D ตามปริมาณซิลิกอนที่ผสมอยู่ด้วย
		B	3.40<	1.81 2.20	0.30< 0.90	0.300>	0.050>	-	
		C	3.30<	2.21 2.50	0.30< 0.90	0.300>	0.050>	-	
		D	3.30<	2.61 3.50	0.30< 0.90	0.300>	0.050>	-	
	2		3.30<	1.40 3.50	0.30< 1.00	0.450>	0.030>	-	
2nd	1	A	3.50<	1.00 2.00	0.40>	0.100>	0.040>	0.030>	ใช้ผลิตเหล็กหล่ออบเหนียว จำแนกเป็นเบอร์ 1 และ 2 ตามคุณภาพ เบอร์แยกเป็น A, B, C และ D, E ตามปริมาณซิลิกอนที่ผสม
		B	3.00<	2.01 3.00	0.50 1.10	0.100>	0.040>	0.030>	
		C	3.00<	3.01 4.00	0.50 1.10	0.130>	0.040>	0.030>	
		D	2.70<	4.01 5.00	0.50 1.30	0.130>	0.040>	0.030>	

ตารางที่ 3.7 (ต่อ)

ชนิด			ส่วนผสมเคมี (%)						หมายเหตุ
			C	Si	Ma	P	S	Cu	
		E	2.50<	5.01 6.00	0.50 1.30	0.150>	0.040>	0.030>	
	2		2.50<	1.00 6.00	1.35>	0.160>	0.045>	0.035>	
3rd	1	A	3.40<	1.00>	0.40>	0.100>	0.040>	0.030>	ใช้ผลิตเหล็กหล่อเหนียวหรือหล่อกร๊าฟไฟต์กลม เบอร์ 1 แยกเป็น A, B, C และ D ตามปริมาณซิลิกอนที่ผสม
		B	3.40<	1.01 1.40	0.40>	0.100>	0.040>	0.030>	
		C	3.40<	1.41 1.80	0.40>	0.100>	0.040>	0.030>	
		D	3.40<	1.81 3.80	0.40>	0.100>	0.040>	0.030>	
	2		3.40<	3.50>	0.50>	0.150>	0.045>	0.035>	

ที่มา : เรื่องเดียวกัน.

ข) เศษเหล็กหล่อ

เศษเหล็กหล่อที่นำมาใช้ในการหลอมจะมาจากหลายแหล่ง เช่น เศษซื้อ เศษคืนเตา ซึ่งได้แก่ รูเท-รูล้นภายในโรงงานและเศษเหล็กเหนียว-เศษเหล็กหล่อกลึงที่นำมาอัดก้อน ทำให้ในการผสมวัสดุที่จะบรรจุเข้าเตาจะต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ ที่จะต้องไม่ให้มีเศษเหล็กไร้สนิมและเศษโลหะไม่ใช่เหล็กติดไปกับเหล็กที่จะบรรจุลงเตา

ค) เศษเหล็กเหนียว

เศษเหล็กเหนียวที่จะนำมาหลอมทำเหล็กหล่อสามารถจำแนกออกได้ 3 ประเภท โดยใช้ประวัติในการผลิตเหล็กเหนียวนั้นคือ 1. เศษเหล็กต่อเรือ เศษเหล็กรถยนต์ หม้อไอน้ำ เป็นต้น 2. เศษปลายแท่งเหล็กที่ได้จากการตีขึ้นงานขึ้นรูป เศษเหล็กรีดและเศษเหล็กงานกดขึ้นรูป และ 3. ขี้กลึงที่นำมาอัดแท่ง เศษเหล็กเหนียวสองประเภทแรกเหมาะที่จะนำมาใช้หลอมทำเหล็กหล่อด้วยเตาคิวโปล่า เศษกลึงจะมีเหล็กหลายชนิดที่มีขายในท้องตลาด เช่น เหล็กเหนียวที่ทนแรงดึงได้สูง เหล็กเหนียวเคลือบผิวเพื่อป้องกันสนิมและเหล็กผสมหรือเหล็กกล้าผสม

ในการคัดเลือกเศษเหล็กที่จะต้องนำมาหลอมจะต้องไม่ให้มีธาตุแมงกานีส ฟอสฟอรัส โครเมียม ก่ามะถัน สังกะสี อลูมิเนียม ตะกั่ว และติตาเนียม ติดผสมไปกับเศษเหล็กที่จะบรรจุลงเตา เพราะธาตุเหล่านี้จะมีผลต่อคุณสมบัติทางกลและรูปร่างของกร๊าฟไฟต์

ง) ขนาด รูปร่างและผิวที่ปรากฏของเศษโลหะ

1) ขนาดและรูปร่าง

ขนาดของเศษเหล็กที่จะบรรจุเข้าเตาคิวโปลาควรจะเล็กกว่า 1/ 3 เส้นผ่านศูนย์กลางเตา หรือเล็กกว่า 1/6 เท่าของพื้นที่หน้าตัดของเตา

ความหนาที่เหมาะสมของเศษเหล็กหล่อควรจะเป็น 50-60 มม. เศษเหล็กแผ่นควรจะหนา 5-25 มม. ถ้าเศษเหล็กเหนียวที่ใช้บางเกินไปเศษเหล็กจะถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย ทำให้หลอมละลายเร็วเกินไป แต่ถ้าหนาเกินไปจะทำให้การหลอมจะลายเกิดขึ้นช้าไปและทำให้ส่วนผสมทางเคมีของน้ำเหล็กไม่สม่ำเสมอ

2) ลักษณะผิวที่ปรากฏ

ผิวของเศษเหล็กที่จะบรรจุเข้าเตาจะต้องสะอาดไม่เป็นสนิมและไม่มีคราบน้ำมัน เพราะจะทำให้น้ำเหล็กปนเปื้อน

2. เฟอร์โรแอลลอย

เฟอร์โรแอลลอยเป็นสารที่นำมาใช้ในการหลอมเพื่อควบคุมส่วนผสมทางเคมีของน้ำโลหะ ใช้ทำอินอกคิวเลชั่นและใช้เติมธาตุพิเศษลงในน้ำเหล็ก เช่น โครเมียม นิเกิล โมลิบดินั่ม เป็นต้น

ก. เฟอร์โรซิลิกอน และ เฟอร์โรแมงกานีส

ตารางที่ 3.8 และตารางที่ 3.9 แสดงส่วนผสมเฟอร์โรซิลิกอนและเฟอร์โรแมงกานีสตามมาตรฐานญี่ปุ่นตามลำดับ

เฟอร์โรแอลลอยทั้งสองชนิดนี้จะดูดซับความชื้นและก๊าซไฮโดรเจน ถ้าการเก็บรักษาไม่ดี การนำมาใช้งานจึงควรระมัดระวัง

ตารางที่ 3.8 เฟอร์โรซิลิกอน (JIS G 2302)

ชนิด	วิธีระบุ	ส่วนผสมทางเคมี %			
		Si	C	P	S
1	FSi1	88-93	<0.2	<0.05	<0.02
2	FSi2	75-80	<0.2	<0.05	<0.02
3	FSi3	40-45	<0.2	<0.05	<0.02
4	FSi4	25-30	<0.8	<0.10	<0.10
5	FSi5	14-20	<1.8	<0.05	<0.06

ที่มา : เรื่องเดียวกัน, หน้า 14.

ตารางที่ 3.9 เฟอร์โรแมงกานีส (JIS G 2301)

ชนิด		วิธีระบุ	ส่วนผสมทางเคมี %				
			Mn	C	Si	P	S
มีคาร์บอนมาก Fe-Mn ผสมอยู่ด้วย	0	FMn H0	78-82	<7.5	<1.2	<0.04F	<0.02
	1	FMn H1	73-78	<7.3	<1.2	<0.04	<0.02
	2	FMn H2	73-78	<7.0	<3.0	<0.04	<0.02
มีคาร์บอนผสมอยู่ Fe-Mn ปานกลาง	0	FMn M0	80-85	<1.5	<1.5	<0.04	<0.02
	2	FMn M2	75-80	<2.0	<2.0	<0.04	<0.02
มีคาร์บอนผสมอยู่ Fe-Mn น้อย	0	FMn L0	80-85	<1.0	<1.5	<0.35	<0.02
	1	FMn L1	75-80	<1.0	<1.5	<0.04	<0.02

ที่มา : เรื่องเดียวกัน.

การทดสอบคุณภาพน้ำโลหะ

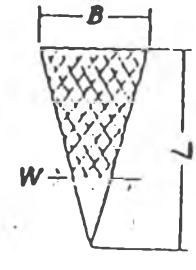
ในขั้นตอนการหลอมโลหะจะต้องทำการทดสอบคุณภาพของน้ำโลหะ เพื่อควบคุมและประเมินผลน้ำโลหะให้ได้คุณภาพตามต้องการ การทดสอบคุณภาพน้ำโลหะมีหลายวิธี ได้แก่

ก) การทดสอบชิลหรือการทดสอบแบบลิ่ม (Chill Test)

การทดสอบรูปลิ่มเป็นการทดสอบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย รูปที่ 3.4 และ 3.5 แสดงขนาดและรูปร่างการทดสอบแบบลิ่ม

ชิ้นทดสอบได้จากการเทน้ำโลหะลงในแบบทรายหลังจากการแข็งตัวแล้วจะจุ่มตัวให้เย็นแล้วตีหักกลาง ทำการวัดความกว้างหรือความลึกของผิวเหล็กหล่อขาว (chilled) ที่เกิดขึ้น ค่าที่วัดได้จะสามารถประมาณส่วนผสมทางเคมีและชั้นคุณภาพของวัสดุได้ เมื่อคาร์บอนและซิลิกอนที่ผสมอยู่ในน้ำเหล็กมีปริมาณน้อยขนาดของความกว้างหรือความลึกของผิวเหล็กหล่อจะมาก ในทางตรงข้ามถ้าปริมาณของธาตุเหล่านี้มากผิวเหล็กหล่อขาวจะน้อยหรือไม่มีเลย

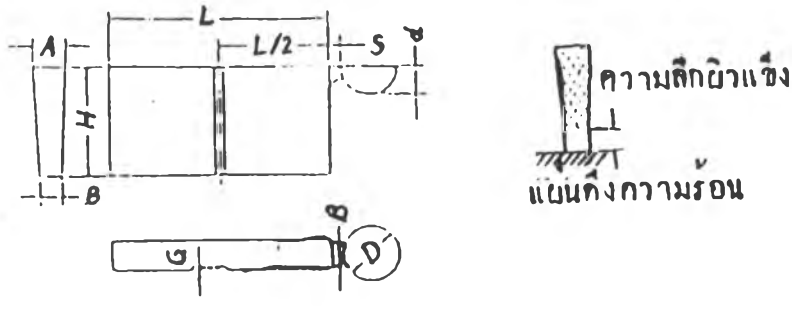
No	B	H	Length
W1	5.0	35.0	100.0
W2	10.0	30.0	100.0
W3	20.0	37.5	100.0
W4	25.0	45.0	125.0
W5	30.0	50.0	150.0



หน่วยวัดขนาดผิวแข็ง 0.1 มม.

รูปที่ 3.4 ขนาด, รูปร่างของการทดสอบรูปลิ่ม (มม.)
ที่มา : เรื่องเดียวกัน, หน้า 5.

No	A	B	H	L	D	d	G
C1	5.0	3.0	30.0	65.0	18.0	12.5	0.5
C2	5.5	5.0	37.5	75.0	22.0	12.5	0.8
C3	11.0	8.0	45.5	85.0	22.0	12.5	1.3
C4	16.5	12.0	50.0	100.0	25.0	15.0	1.3
C5	20.0	16.5	65.0	125.0	25.0	15.0	1.5



รูปที่ 3.5 ขนาดของแผ่นทดสอบวัดผิวแข็ง (มม.)
ที่มา : เรื่องเดียวกัน.

ข) การวิเคราะห์ลายผิวน้ำโลหะในเบ้า

ลายผิวหน้าน้ำโลหะ (break surface pattern) จะปรากฏขึ้นเมื่อระดับอุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงต่ำกว่า 1400 องศาเซลเซียส เพราะผิวหน้าน้ำโลหะแตกออกเนื่องจากการแยกตัวของก๊าซในน้ำเหล็กทำให้เกิดลายต่าง ๆ ขึ้น ลายเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของธาตุที่ผสมและปริมาณการเกิดออกซิไดซ์ของธาตุเหล่านั้น ลายผิวหน้าน้ำเหล็กสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ชนิดคือ ชนิด Tortoise shell, ชนิด Hemp leaf และชนิด Bamboo leaf ดังในรูปที่ 3.6

ลายชนิด Tortoise shell จะเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณคาร์บอนและซิลิกอนในน้ำเหล็กมาก แต่เมื่อปริมาณของธาตุทั้งสองลดลงลายน้ำเหล็กจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นลายชนิด Hemp leaf และชนิด Bamboo Leaf ความแข็งแรงของงานหล่อเมื่อวิเคราะห์จากลายโดยความแข็งแรงมากไปน้อยได้ดังนี้ Bamboo leaf, Hemp leaf และ Tortoise shell ตามลำดับ

Bamboo leaf type

Hemp leaf type

Tortoise shell type

รูปที่ 3.6 Break Surface Pattern ของน้ำโลหะ

ที่มา : สุนทร รุณรงค์, วิสุทธิ์ พืชมงคล, วัชรา ชนิษฐาบุตร และ วิวัฒน์ ตันศิขจรโกศล, <u>เทคโนโลยีการผลิตเหล็กหล่อเบื้องต้น</u>, (กรุงเทพมหานคร : หจก.ภาพพิมพ์, 2534), หน้า 6_25.

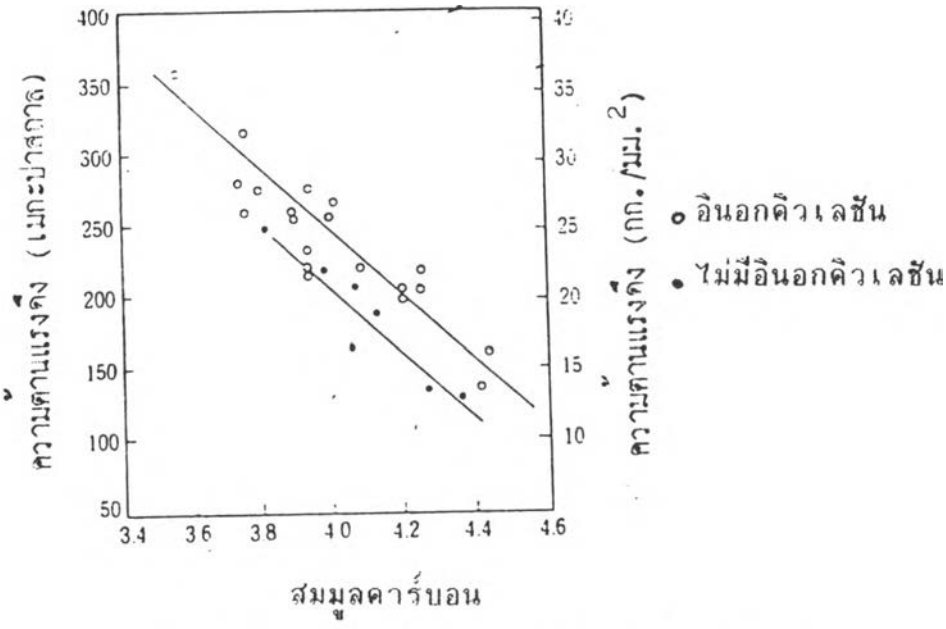
ค) การประเมินคุณภาพของน้ำโลหะโดยการวัดสมมูลคาร์บอน'

CE หมายถึง สมมูลคาร์บอนของเหล็กหล่อ การคำนวณค่า CE มีสูตรดังนี้คือ

$$CE = C\% + 1/3(Si\% + Mn\%)$$

ความต้านทานแรงดึงและปริมาณคาร์บอนในเหล็กหล่อมีความสัมพันธ์กันโดยตรง ดังนั้นโดยการวัดค่า CE จึงทำให้ประเมินคุณสมบัติของเหล็กหล่อได้

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดึงและค่า CE เป็นดังรูปที่ 3.7 รูปนี้ยังแสดงผลของอินอกคิวเลชั่น ต่อความต้านแรงดึงด้วยการวัดค่า CE จะทำการวัดโดยเครื่อง CE Meter ปัจจุบันวิธีนี้เป็นวิธีที่แม่นยำและนิยมใช้มากที่สุดในการประเมินคุณภาพน้ำโลหะ



รูปที่ 3.7 ผลของค่า CE และอินอกคิวเลชันที่มีต่อความต้านแรงดึง
ที่มา : เรื่องเดียวกัน, หน้า 6_26.

(ง) การวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กทำได้โดยการใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบจุ่มและเครื่องวัดอุณหภูมิแบบเปรียบเทียบความสว่างไส้หลอด เครื่องวัดอุณหภูมิแบบแรกจะอาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากความร้อนเป็นตัวแสดงอุณหภูมิ แบบหลังจะเร่งความสว่างของไส้หลอดให้สว่างเท่ากับความสว่างของน้ำเหล็กโดยการใช้กระแสไฟฟ้ากระแสตรงในการวัดค่าระดับอุณหภูมิ เครื่องวัดอุณหภูมิแบบแรกจะวัดได้ค่าที่ถูกต้องในขณะที่เครื่องวัดแบบหลังจะต้องมีการปรับแก้ค่าโดยใช้ตาราง ทั้งนี้เพราะสภาวะในขณะทำการวัดจะมีผลต่อระดับอุณหภูมิที่ได้ ซึ่งการวัดจะต้องใช้ผู้ที่ชำนาญจึงจะได้ค่าที่ถูกต้อง

3.3.3 การควบคุมคุณภาพชิ้นงานหล่อ

การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานหล่อ เป็นขั้นตอนสุดท้ายและเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิตงานหล่อ วิธีการตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานหล่อมีด้วยกันหลายวิธี ได้แก่

การตรวจรูปร่างลักษณะ

1) การตรวจสอบด้วยสายตา

การตรวจวิธีนี้เป็นการใช้สายตาตรวจจุดเสียที่เกิดที่ผิวงาน และตรวจพบความเรียบร้อยของชิ้นงาน จุดเสียของงานหล่อส่วนมากมักเกิดที่ผิวและสามารถตรวจพบได้ด้วยการใช้สายตาตรวจสอบ

2) การตรวจมิติหรือการวัดขนาด

การผิดพลาดในมิติของชิ้นงานอาจเกิดจากการผิดพลาดในแบบของกระสวน การสึกหรอของกระสวน การผิดพลาดในการประกอบไส้และแบบหล่อ การบิดเบี้ยวของไส้แบบและแบบหล่อหลังจากเท ฯลฯ ตามธรรมดาจะไม่สามารถตรวจมิติด้วยสายตา ดังนั้นการตรวจมิติจึงต้องใช้เครื่องมือวัด เช่น ขาจับขนาด (scribing block) หรือเครื่องวัดอื่น ถ้าตรวจงานที่ผลิตปริมาณมาก ควรใช้เกจ (gauge) พิเศษสำหรับแต่ละงานและใช้จิ๊ก (jig) ในการตรวจเพราะจะทำให้ตรวจได้รวดเร็วและแม่นยำขึ้น ในการผลิตงานชิ้นใหม่จะต้องตรวจมิติโดยละเอียดโดยใช้ขาจับขนาด มิฉะนั้นถ้างานเกิดผิดขนาดอาจต้องคัดงานหล่อทิ้งทั้งหมด ในการผลิตต่อเนื่องกันจะต้องมีการตรวจด้วยขาจับขนาดและมีการผ่าชิ้นงานออกเป็นครั้งคราวเพื่อตรวจมิติภายในซึ่งธรรมดาตรวจไม่ได้ และถ้ามีการคลาดเคลื่อนในมิติเนื่องจากกระสวนสึกหรอจะได้จัดการแก้ไขเสีย

การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing)

การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing) คือ การทดสอบวัสดุชิ้นงาน โดยไม่ทำลายชิ้นงานให้เสียหาย กล่าวคือ เป็นการทดสอบชิ้นงานที่เหมือนกับวัสดุอุปกรณ์หรือโครงสร้าง โดยไม่ก่อให้เกิดรอยชีดข่วน การแยกส่วนหรือ

การแตกหักเสียหาย การทดสอบแบบไม่ทำลายนี้จะใช้ลักษณะทางฟิสิกส์ของชิ้นงานทดสอบ เช่น แสง ความร้อน รังสี คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ไฟฟ้า หรืออำนาจแม่เหล็ก ตรวจสอบเพื่อประเมินความผิดปรกติของโครงสร้างภายในหรือรอยบกพร่องที่เกิดขึ้นที่ชิ้นงานได้

การทดสอบแบบไม่ทำลายสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

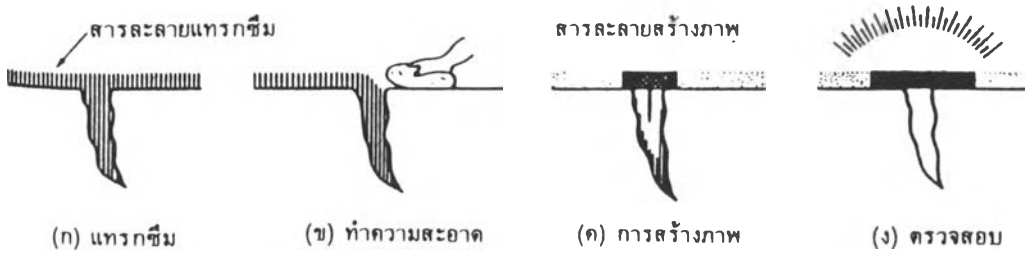
1) การเคาะตรวจ

การทดสอบวิธีนี้ใช้การฟังเสียงเคาะ เพื่อทราบว่ามีจุดเสียภายในหรือไม่และคุณภาพของเนื้อโลหะดีหรือไม่ อาจใช้หูฟังหรือออสซิลโลกราฟ (oscillograph) แล้วแต่กรณี งานที่ร้าวจะไม่ให้เสียงใสเท่างานที่ไม่เสีย นอกจากนั้นจะไม่กังวาลนานเท่า ในด้านการตรวจคุณภาพของวัสดุนั้น ถ้าชิ้นงานมีความแข็งและความแข็งแรงต่ำเสียงจะต่ำ แต่ถ้าความแข็งและความแข็งแรงสูงคลื่นเสียงจะสูงและใสขึ้น

2) การทดสอบโดยวิธีการดูดซึมของของเหลว (Liquid Penetrant Testing)

การทดสอบวิธีนี้เป็นวิธีการทดสอบหารอยบกพร่องที่มีปากเปิดออกสู่ภายนอกที่ผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบอย่างง่าย ๆ ด้วยสายตา โดยใช้การดูดซึมของของเหลว ซึ่งได้แก่ สารละลายแทรกซึมเรืองแสงสีเขียว-สีเหลือง หรือสารละลายแทรกซึมชนิดไม่เรืองแสงผสมสีแดง ช่วยขยายรูปรอยบกพร่องให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้น

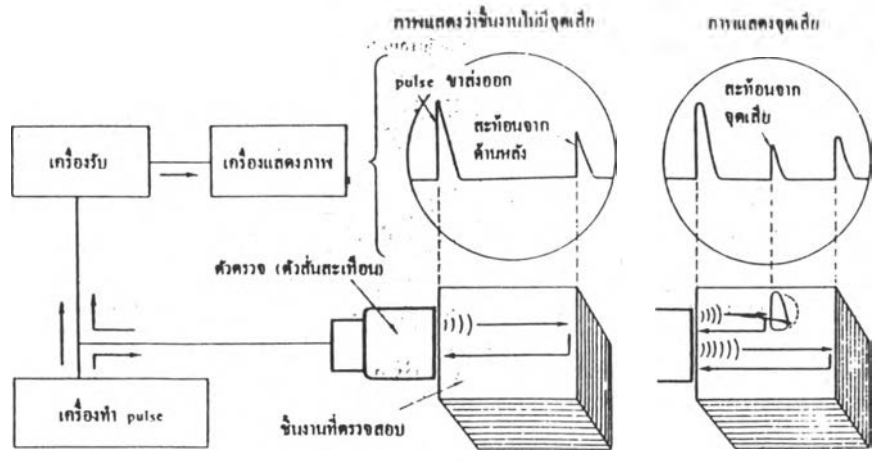
วิธีการทดสอบกระทำได้โดย ทาสารละลายตรวจสอบให้ทั่วผิวหน้าชิ้นงานทดสอบและเพื่อให้สารละลายแทรกซึมเข้าสู่ด้านในของรอยบกพร่องได้อย่างเต็มที่ ต้องทำการเช็ดสารละลายส่วนเกินที่อยู่บนผิวหน้าชิ้นงานออกไปเสียก่อน จากนั้นจึงใช้สารละลายสร้างภาพ ซึ่งจะทำหน้าที่ดูดซับสารละลายที่แทรกซึมอยู่บริเวณรอยบกพร่องออกมา ทำให้เกิดรูปร่างของรอยบกพร่องที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถตรวจสอบด้วยตาเปล่าได้ ขั้นตอนในการทดสอบรอยบกพร่องของชิ้นงานโดยวิธีการดูดซึมของของเหลว แสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การทดสอบรอยบกพร่องโดยวิธีการดูดซึมของเหลว
ที่มา : ฟูจิอิ ชาโตะ, การทดสอบแบบไม่ทำลาย (NON DESTRUCTIVE TESTING), แปลและเรียบเรียงโดย ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์, บัณฑิต โรจน์อารยานนท์, ก่อเกียรติ บุญชูกุศล และสมยศ ศรีสถิตย์ (กรุงเทพมหานคร : เอเชียเพรส, 2535), หน้า 181.

3) การทดสอบโดยใช้อัลตราโซนิก (Ultrasonic Testing)

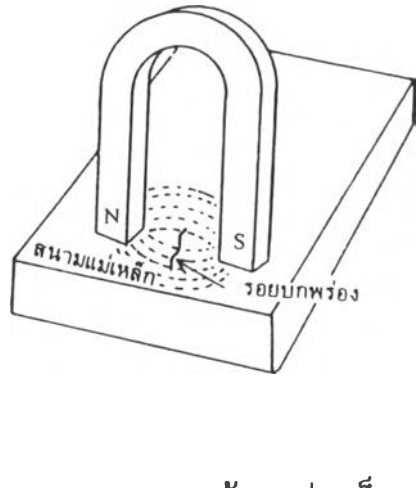
การทดสอบวิธีนี้จะใช้หลักการการผ่านคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเข้าไปในชิ้นงานทดสอบ เมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปกระทบจุดเสียภายในชิ้นงาน อาจจะได้แก่ รูโพรงที่เกิดจากก๊าซหรือโพรงที่เกิดจากการหดตัว จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพัลส์โดยผู้ตรวจสอบสามารถสังเกตเห็นได้จากจอภาพแสดงผล รูปที่ 3.9 แสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการตรวจสอบโดยใช้อัลตราโซนิก สำหรับการตรวจสอบเหล็กหล่อโดยใช้วิธีอัลตราโซนิกนี้จะกระทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากเหล็กหล่อจะมีผิวหน้าที่หยาบขรุขระและมีรูปร่างที่ซับซ้อน ในการตรวจสอบอาจจำเป็นต้องขัดผิวให้เรียบเสียก่อน นอกจากนั้นเนื้อโลหะเหล็กหล่อจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่เคลื่อบที่ผ่านเข้าไป



รูปที่ 3.9 แสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดสอบโดยใช้อัลตราโซนิก
ที่มา : หริส สูตะบุตร และเคนยิ จิยิอิวา, <u>หล่อโลหะ</u>, (กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ดวงกมล จำกัด, 2537), หน้า 186.

4) การทดสอบโดยใช้ผงแม่เหล็ก (Magnetic Particle Testing)

วิธีนี้ใช้ในการตรวจจุดเสีย เช่น รอยร้าว โพรงที่เกิดจากการหดตัว การมีสิ่งแปลกปลอมติดอยู่ในเนื้อโลหะ ฯลฯ ซึ่งเกิดที่ผิวหรือใต้ผิวเล็กน้อย ใช้ได้เฉพาะกับงานที่ทำด้วยวัสดุที่เป็นแม่เหล็กได้ เช่น เหล็กหล่อ การทดสอบวิธีนี้จะต้องทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก จากนั้นจะโรยผงเหล็กลงบนผิวงาน ถ้าชิ้นงานมีจุดเสียจะมีการจับกลุ่มของผงเหล็กรอบ ๆ จุดเสียนั้น ขนาดของจุดที่เกิดจากการจับกลุ่มของผงเหล็กจะใหญ่กว่าขนาดจุดเสียจริง ทำให้สามารถตรวจพบจุดเสียเล็ก ๆ ซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ การทดสอบโดยใช้ผงแม่เหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงการทดสอบโดยใช้ผงแม่เหล็ก
ที่มา : ฟูจิอิ ชาโตะ, หน้า 4.

5) การทดสอบโดยใช้ภาพถ่ายรังสี (Radiographic Testing)

รังสีเช่น X-ray, ɣ-ray ฯลฯ มีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็ก-ไฟฟ้า (electromagnetic) เช่นเดียวกับแสง และต่างมีความยาวคลื่นต่ำและมีพลังงานสูง สามารถผ่านทะลุโลหะได้ ปริมาณการผ่านของรังสีขึ้นกับชนิดโลหะ ความหนา ความหนาแน่น และพลังงานการแผ่รังสี การทดสอบวิธีนี้จึงใช้หลักการส่งรังสีผ่านชิ้นทดสอบที่มีจุดเสียภายในและมีความหนาไม่เท่ากัน ถ้าความหนาน้อยความเข้ม (intensity) ของรังสีที่ผ่านก็จะมาก ดังนั้นโดยการวัดความเข้มของรังสีที่ผ่านแต่ละส่วนของชิ้นงานจะตรวจพบจุดเสีย เช่น โพรงที่เกิดจากการหดตัว สิ่งแปลกปลอมที่ติดอยู่ในเนื้องาน ฯลฯ ความเข้มของรังสีที่ผ่านนั้นจะบันทึกไว้บนฟิล์มถ่ายภาพ หรือเป็นภาพอยู่บนแผ่นเรืองแสง และโดยการตรวจดูภาพดังกล่าวจะตรวจพบจุดเสียได้ การทดสอบโดยใช้ภาพถ่ายรังสีแสดงได้ดังรูปที่ 3.11

รูปที่ 3.11 แสดงการทดสอบโดยใช้ภาพถ่ายรังสี
ที่มา : เรื่องเดียวกัน.

6) การทดสอบโดยใช้ความดันน้ำและอากาศ

การทดสอบประเภทนี้ใช้ตรวจจุดเสียที่เป็นรูทะลุจากภายในถึงภายนอกชิ้นงาน ในกรณีที่ชิ้นงานต้องรับความดันในการใช้งาน มีการใช้ความดันของเหลว ความดันอากาศ การใช้สูญญากาศ ฯลฯ ทั้งนี้แล้วแต่ขนาดความดันในการใช้งาน แต่มักใช้ชนิดความดันน้ำและความดันอากาศ ในการทดสอบโดยใช้ความดันน้ำ จะต้องอุดรูทุกรูของงาน แล้วตรวจว่ามีน้ำรั่วหรือไม่เมื่อน้ำในชิ้นงานได้รับความดัน ในการทดสอบด้วยความดันอากาศ จะต้องอุดรูทุกรูของงานแล้วจุ่มลงในน้ำ แล้วจึงส่งอากาศอัดเข้าไปในชิ้นงาน งานที่มีจุดเสียจะมีฟองอากาศลอยขึ้นมาจากจุดเสีย

<u>การตรวจสอบโครงสร้างผลึกโลหะ</u>

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกโลหะ มีการตรวจสอบใน 2 ระดับ คือ ระดับมหภาคและระดับจุลภาค

1) การตรวจโครงสร้างระดับมหภาค

วิธีหนึ่งที่ใช้คือการหักชิ้นงานหรือชิ้นทดสอบ แล้วตรวจและตัดสินคุณสมบัติโดยการสังเกตขนาดเม็ดผลึก สี และความมันหรือด้าน (luster) ของรอยหัก และอีกวิธีหนึ่งคือวิธีใช้สารเคมีกัด (หลังจากขัดรอยหักแล้ว) ใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจดูโครงสร้างของผลึก การแยกตัว (segregation) และจุดเสียจุดเล็ก ๆ

2) การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค

ในการทดสอบวิธีนี้ จะตัดสินคุณภาพของวัสดุโดยการศึกษาโครงสร้างต่าง ๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์และศึกษาเหตุที่ทำให้เกิดจุดเสียหรือจุดผิดปกติ ตามปกติใช้กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้สายตามองตามธรรมดา แต่ก็มีการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนเมื่อต้องการขยายมาก ๆ นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือพิเศษ เช่น pyrometrical microscope ซึ่งทำให้สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากอุณหภูมิและ microanalyzer ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์สิ่งเจือปนขนาดเล็ก ๆ ในโครงสร้างได้ ผิวงานต้องได้รับการขัดหยาบจนกระทั่งถึงละเอียดตามลำดับ แล้วศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ วิธีการทดสอบย่อมแตกต่างกันแล้วแต่จุดประสงค์ ในบางกรณีก็ศึกษาผิวงานในสภาพหลังจากการขัด ในบางกรณีก็ใช้กรด หรือสารเคมีอื่นกัดเสียก่อนแล้วจึงศึกษาโครงสร้าง ถ้าจะใช้วิธีทดสอบโดยไม่ต้องทำลายชิ้นงานหรือในกรณีที่ชิ้นงานมีผิวโค้งมีวิธีพิเศษซึ่งใช้ได้วิธีใช้แผ่นเซลลูลอยด์อัดลงบนผิวงานที่ผ่านการขัดและกัดด้วยสารเคมี ดังนี้จะเกิดเป็นรอยของโครงสร้างบนแผ่นเซลลูลอยด์

<u>การทดสอบคุณสมบัติทางกลของโลหะ</u>

1. <u>การทดสอบความแข็ง</u> (Hardness Test)

การทดสอบความแข็งสามารถคาดคะเนความแข็งแรงของวัสดุได้ค่อนข้างแน่นอน และเป็นการทดสอบที่กระทำได้ง่าย จึงเป็นที่นิยมใช้กันมาก เครื่องทดสอบความแข็งมีอยู่หลายชนิด แต่ละชนิดมีความเหมาะสมต่อการใช้งานที่แตกต่างกัน เครื่องทดสอบความแข็งโดยทั่วไปได้แก่ เครื่องทดสอบความแข็งหน่วย

บริเนล (Brinell) รอคเวลล์ (Rockwell) วิคเกอร์ส (Vickers) และชอร์ (Shore)

2. การทดสอบความต้านทานแรงดึง

การทดสอบวิธีนี้กระทำโดยค่อย ๆ เพิ่มแรงดึงให้แก่ชิ้นทดสอบจนกระทั่งขาด จะวัดจุดคราก (yield point) ความทานแรงดึง (tensile strength) ส่วนยืด การลดลงของพื้นที่หน้าตัด ได้จากการทดสอบนี้ ใช้เครื่องทดสอบยูนิเวอร์ซัลในการทดสอบโดยการดึง เครื่องนี้ใช้ทำการทดสอบโดยการอัดและการวัด (bending) ได้ด้วย ขนาดของชิ้นทดสอบมีความสำคัญเป็นพิเศษในการทดสอบวัสดุหล่อ มีการกำหนดมาตรฐานสำหรับลักษณะการเท ขนาดของงานเมื่อหล่อเสร็จ ขนาดของงานเมื่อกลึงเสร็จ สำหรับวัสดุหล่อส่วนใหญ่ที่จำเป็นต้องกำหนดมาตรฐานก็เพื่อให้สภาพการเย็นตัวและการแข็งตัวเหมือนกัน

3.3.4 การควบคุมคุณภาพเชิงสถิติ

วิธีการทางสถิตินับว่าเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์และประสิทธิภาพมาก ในการพัฒนากระบวนการผลิต ควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์และลดอัตราการเกิดของเสีย เครื่องมือทางสถิติที่นำมาใช้วิเคราะห์และควบคุมคุณภาพมีด้วยกันหลายวิธี แต่ละวิธีจะมีจุดเด่นและลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน เครื่องมือทางสถิติได้แก่

1) การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูล คือ แนวทางสู่การแก้ปัญหา จากข้อมูลจะบอกปรากฏการณ์พฤติกรรมหรือคุณสมบัติใด ๆ ที่เราต้องการทราบ ก่อนจะลงมือเก็บข้อมูลจะต้องกำหนดวัตถุประสงค์ของการเก็บข้อมูล เก็บข้อมูลไปเพื่อทำอะไร ขั้นตอนในการเก็บข้อมูลมีดังนี้

1. กำหนดวัตถุประสงค์ให้ชัดเจน ได้แก่
   - เพื่อควบคุมและติดตามดูผลการดำเนินการผลิต
   - เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของความไม่สอดคล้อง
   - เพื่อการตรวจเช็ค

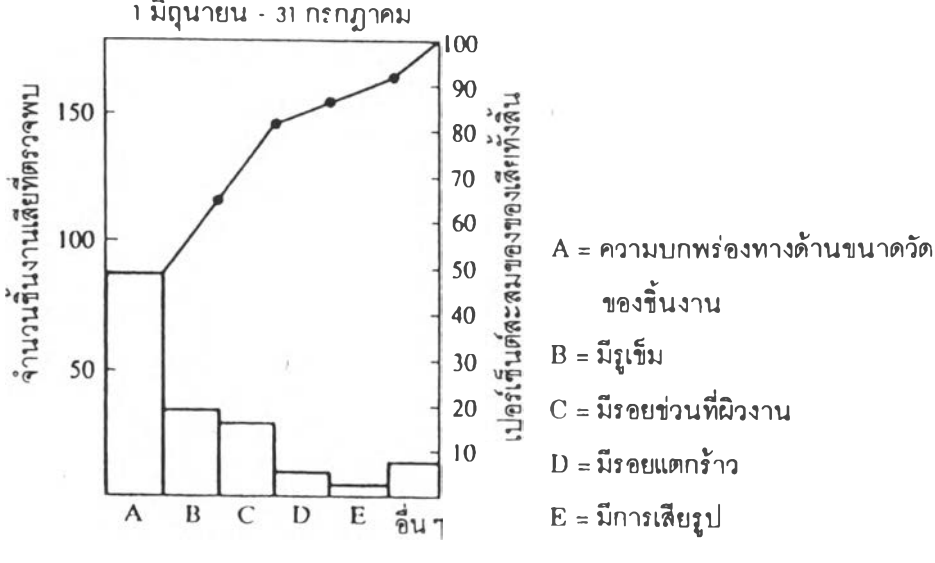
2. จัดทำแผ่นตรวจสอบ (Check sheets)

แผ่นตรวจสอบ คือ แบบฟอร์มซึ่งได้รับการออกให้มีช่องว่างต่าง ๆ เพื่อให้ผู้บันทึกสามารถบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ลงในช่องว่างได้อย่างสะดวก ถูกต้อง ไม่ยุ่งยาก ขณะเดียวกันผู้ที่อ่านข้อมูลหลังการจดบันทึกต้องเข้าใจได้ง่าย สามารถนำไปใช้งานได้เลย

2. ผังพาเรโต (Pareto Diagrams)

ผังพาเรโตเป็นเครื่องมือทางสถิติที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุของความบกพร่องกับมูลค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้น

ผังพาเรโตเกิดขึ้นจากแนวความคิดที่ว่า 80 เปอร์เซนต์ของการสูญเสียที่เกิดขึ้น จะเกิดจากจุดบกพร่องหรือปัญหาเพียง 20 เปอร์เซนต์เท่านั้น รูปที่ 3.12 ได้แสดงตัวอย่างการใช้ผังพาเรโตแสดงรายการความบกพร่องของชิ้นงาน



รูปที่ 3.12 ผังพาเรโตแสดงจำนวนรายการความบกพร่อง

ที่มา : ฮิโตชิ คุเมะ, วิธีทางสถิติเพื่อการพัฒนาคุณภาพ, แปลและเรียบเรียงโดย วีรพงษ์ เฉลิมจิระรัตน์ (กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2535), หน้า 30.

ผังพาเรโตแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. ผังพาเรโตจากปรากฏการณ์ (หรือผลของปัญหา)

ผังชนิดนี้เขียนขึ้นจากการตรวจสอบหาประเภทต่าง ๆ ของปรากฏการณ์ความบกพร่องต่าง ๆ ซึ่งเป็นสิ่งไม่พึงปรารถนาในการผลิต เพื่อการค้นหาสาเหตุต่อไป เช่น

- ด้านคุณภาพ : จุดบกพร่อง, ความผิดพลาด, ความล้มเหลว ข้อร้องเรียน จำนวนของตีคืนมา จำนวนของซ่อม
- ด้านต้นทุน : ค่าใช้จ่ายส่วนเพิ่ม มูลค่าความสูญเสียแต่ละรายการ
- ด้านการจัดส่ง : ความล่าช้าในการส่ง การส่งผิด สต็อคขาดมือ
- ด้านความปลอดภัย : จำนวนอุบัติเหตุแยกตามลักษณะความบาดเจ็บ ความเสียหาย ชำรุดของวัตถุ เครื่องจักรกล

2. ผังพาเรโตจากสาเหตุแห่งปัญหา

ผังชนิดนี้จะพบมากในการผลิตใช้บอกที่มา สถานที่เกิด หรือจุดที่เป็นต้นตอของความบกพร่องใด ๆ ที่เกิดขึ้นและตรวจพบ เช่น

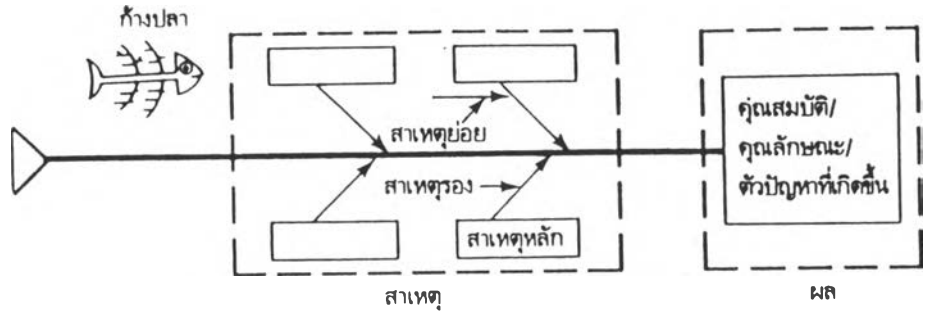
- พนักงานควบคุมเครื่อง : แบ่งตามกะ ตามกลุ่มงาน อายุ เพศ ระดับฝีมือ อายุงาน
- เครื่องจักรกล : แบ่งตามหมายเลข รุ่น ขนาด ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ เครื่องมือวัดที่ใช้
- วัตถุดิบ : แบ่งตามล็อต ชนิด ขนาด รุ่นที่รับมา ตามยี่ห้อ หรือแหล่งกำเนิด

- วิธีการทำงาน : สภาพแวดล้อม การจัดวาง วิธีปฏิบัติ ลำดับก่อนหลัง

3. ผังแสดงเหตุและผล

ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagrams) หรืออีกชื่อว่า ผังก้างปลา (Fishbone Diagrams) เป็นแผนผังใช้สำหรับกำหนดหรือวิเคราะห์ถึงสาเหตุของปัญหาหรืออาการผิดปกติ แผนผังก้างปลานิยมใช้วิเคราะห์ร่วมกับผังพาเรโตแผนผังแสดงเหตุและผลนิยมใช้สำหรับการระดมความคิด (brainstorming) เพื่อสำรวจถึงสิ่งต่าง ๆ ที่จะเป็นผลก่อให้เกิดปัญหาได้

โครงสร้างของผังแสดงเหตุและผลมีรูปร่างคล้ายกับปลา โดยจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนโครงกระดูกที่เป็นตัวปลา ซึ่งได้รวบรวมปัจจัยอันเป็นสาเหตุของปัญหาและส่วนหัวปลา เป็นข้อสรุปผลของตัวปัญหา รูปแบบทั่วไปของผังแสดงเหตุและผลแสดงได้ดังรูปที่ 3.13



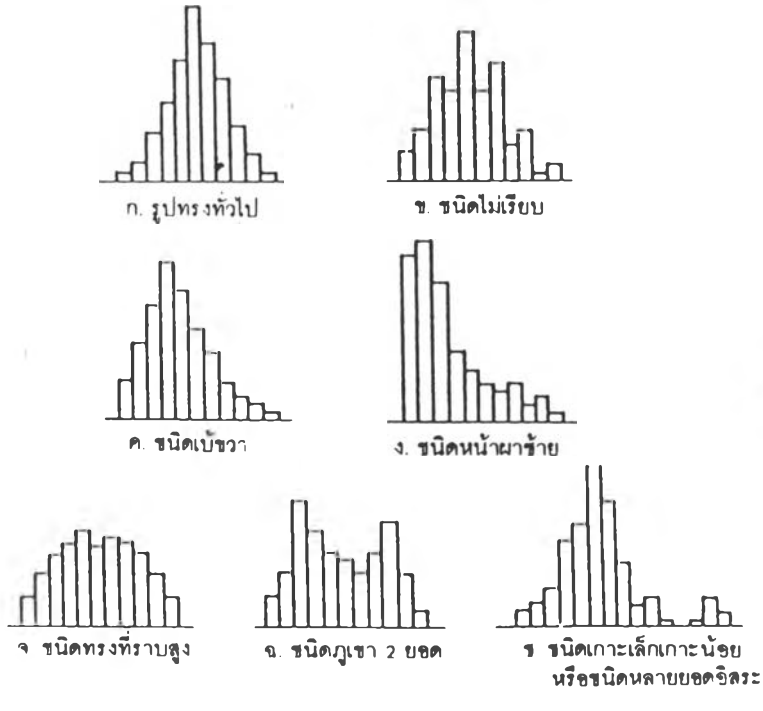
รูปที่ 3.13 รูปแบบทั่วไปของผังแสดงเหตุและผล
ที่มา : ฮิโตชิ คุเมะ, หน้า 23.

ฮิสโตแกรม (Histogram)

เมื่อได้เก็บรวบรวมข้อมูลแล้ว เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลมีด้วยกันหลายวิธี เทคนิคหรือเครื่องมือที่นิยมใช้อีกชนิดหนึ่งคือ ฮิสโตแกรม ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มในการรวมกลุ่มและการกระจายของข้อมูลในรูปของกราฟแท่ง ทำให้สะดวกต่อการวิเคราะห์และนำไปใช้งานได้ทันที

ชนิดของฮิสโตแกรม แบ่งได้เป็น 7 ประเภท ดังในรูปที่ 3.14 คือ

1. ชนิดรูปทรงทั่วไปหรือทรงระฆังคว่ำ (General Type)
2. ชนิดรูปทรงฟันหักหรือชนิดไม่เรียบ (Uneven Type)
3. ชนิดเบ้ขวา (Positively Srewed Type)
4. ชนิดหน้าผาซ้าย (Left-Hard Precipice Type)
5. ชนิดทรงที่ราบสูง (Platcan Type)
6. ชนิดภูเขา 2 ยอด (Twin-Peak Type)
7. ชนิดเกาะเล็กเกาะน้อย หรือชนิดหลายยอดอิสระ (Isolated-Peak Type)



รูปที่ 3.14 ประเภทของฮิสโตแกรม

ที่มา : ฮิโตชิ คูเมะ, หน้า 44.

5. แผนภูมิควบคุม (Control Charts)

แผนภูมิควบคุม หมายถึง แผนภูมิหรือแผ่นกราฟที่เขียนขึ้นล่วงหน้าโดยอาศัยข้อมูลจากข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) ที่ระบุคุณสมบัติทางคุณภาพข้อใดข้อหนึ่งของชิ้นงานที่ทำการผลิตและต้องการจะควบคุมนั้น เพื่อใช้เป็นแนวทางในการติดตามผลการผลิตจากกระบวนการผลิตขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง ในแผนภูมิจะมี 3 เส้น ได้แก่ เส้นค่ากลาง คือ เส้นที่แสดงขนาดหรือจำนวนที่เป็นข้อกำหนดหรือเป้าหมายของการผลิต พร้อมกับเส้นแสดงขอบเขตควบคุมค่าสูงและเส้นแสดงขอบเขตควบคุมค่าต่ำที่อนุญาตให้มีความคลาดเคลื่อนในการผลิตเกิดขึ้นได้ และหากอยู่ในขอบเขตควบคุมนี้ก็ถือว่า ผลการผลิตยอมรับได้ แต่หากว่าค่าที่ได้อยู่นอกเหนือขอบเขตควบคุม ถือว่าการผลิตในขณะนั้นยอมรับไม่ได้จะต้องมีการปรับปรุงแก้ไขจุดบกพร่องโดยทันทีต่อไป

ชนิดของแผนภูมิควบคุม แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ โดยพิจารณาจากคุณลักษณะของตัวแปรที่ใช้เขียนแผนภูมิคือ

1. แผนภูมิควบคุมชนิดข้อมูลมีค่าต่อเนื่องหรือเป็นข้อมูลจากหน่วยวัด (Continuous Value)

2. แผนภูมิควบคุมชนิดข้อมูลมีค่าเป็นค่าแจงนับ (Discrete Value)

ชนิดของแผนภูมิควบคุมแสดงได้ดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ชนิดของแผนภูมิควบคุม

ลักษณะจำเพาะของค่าที่จะควบคุม	ชื่อแผนภูมิควบคุมที่ใช้
1. ข้อมูลมีค่าต่อเนื่อง	x-R Chart (แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและพิสัย)
	x Chart (แผนภูมิควบคุมค่าวัด)
2. ข้อมูลแบบค่าแจงนับ	pn Chart (แผนภูมิควบคุมจำนวนชิ้นงานที่เป็นของเสีย)
	p Chart (แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย)
	c Chart (แผนภูมิควบคุมจำนวนตำหนิ)
	u Chart (แผนภูมิควบคุมจำนวนตำหนิต่อชิ้น)

ที่มา : ฮิโตชิ คุเมะ, หน้า 91.