Manufacturing Processes

Manufacturing Processes

กรรมวิธีการผลิต

- กระบวนการหล่อโลหะ
- กระบวนการอบชุบโลหะ
- กระบวนการตัดโลหะ
- กระบวนการเชื่อมโลหะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ยงยุทธ เสริมสุธีอนุวัฒน์
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิชา 407 101 Manufacturing Processes

ผู้บรรยาย: อ.ยงยุทธ เสริมสุธีอนุวัฒน์

เนื้อหา:-

- Metal Casting Processes
- Heat-treatment of steels
- Welding Processes
- Machining Processes

การตัดเกรด: จากคะแนนสอบกลางภาค 50% และการสอบปลายภาค 50%

ผู้มีสิทธิ์สอบ: มีเวลาเข้าเรียนไม่น้อยกว่า 80% นักศึกษาจะต้องรับผิดชอบจดบันทึกจำนวนครั้งของการเข้าเรียนด้วยตนเอง; **นักศึกษาที่มีเวลาเรียนน้อยกว่า 80% จะได้รับอนุญาตให้เข้าสอบได้ แต่จะได้เกรด F (เมื่อสำรวจภายหลังแล้วพบว่าเวลาเรียนไม่ครบ)**

หนังสืออ้างอิง: E P Degarmo, J T Black, and R A Kohser, Materials and Processes in Manufacturing, 8th Ed., Prentice-Hall, 1997.

METAL CASTING PROCESSES

1. **การหล่อโลหะ** (Metal casting or founding)

การหล่อโลหะคือกระบวนการทำให้เกิดชิ้นโลหะที่มีรูปร่างและขนาดที่ต้องการด้วยวิธีทำให้โลหะหลอมเหลว แล้วแข็งตัวภายในแบบหล่อ (mold)

กระบวนการหล่อโลหะมีข้อดีอยู่หลายอย่างเหนือกรรมวิธีการผลิตอื่นๆ เช่น

(ก) สามาผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

(ข) เป็นกระบวนการผลิตสำหรับโลหะบางอย่างที่ไม่สามารถทำให้เป็นรูปทรงได้ด้วยวิธีการอื่น เช่น เหล็กหล่อ (gray cast iron) เป็นต้น

(ค) สามารถผลิตชิ้นส่วนขนาดใหญ่ได้ (น้ำหนัก เป็นไปได้ถึง 200 ตัน)

(ง) ลดจำนวนชิ้นส่วนในผลิตภัณฑ์โลหะลงเพราะสามารถออกแบบชิ้นงานหล่อเพียงชิ้นเดียวที่รวมชิ้นส่วนหลายชิ้นเข้าด้วยกัน ทำให้ประหยัดเวลาและวัสดุในการสร้างและประกอบผลิตภัณฑ์

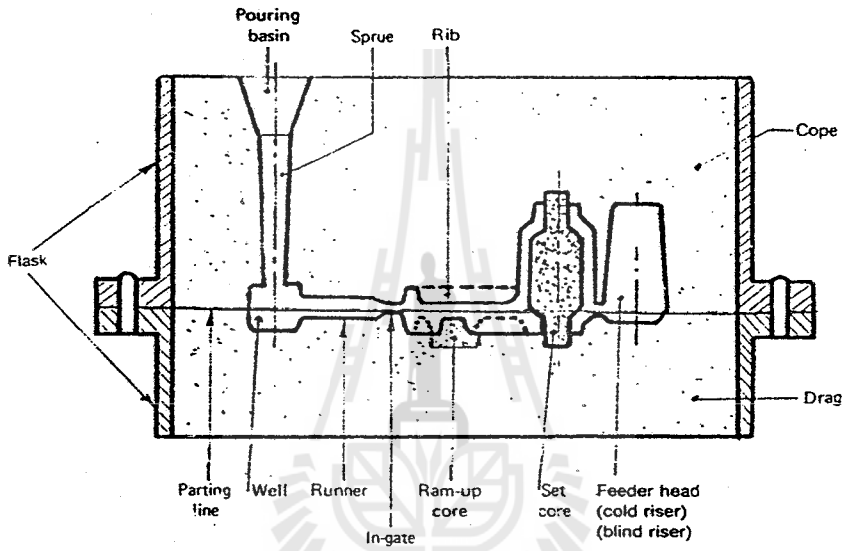
(จ) สามารถทำให้เกิดความหลากหลายในคุณสมบัติของชิ้นงานหล่อ โดยการควบคุมส่วนผสมในโลหะ และ กรรมวิธีการหล่อหลอม

2. **ความหมายของคำที่ใช้ในเรื่องของการหล่อโลหะ**

ในเบื้องต้นนี้ เราควรจะทราบความหมายของคำบางคำที่ใช้อยู่เสมอในเรื่องการหล่อโลหะ คำเหล่านี้เป็นศัพท์เทคนิคซึ่งในที่นี้ได้ให้ความหมายโดยใช้กระบวนการหล่อโลหะด้วยแบบหล่อทราย(sand casting)เป็นเกณฑ์

- Pattern: กระสวนหรือแบบที่ทำด้วยไม้, พลาสติก หรืออลูมิเนียม ใช้สำหรับทำโพรงแบบ(mold cavity)ในแบบหล่อทราย
- Flask: คือหีบหล่อ หรือกล่องสำหรับให้ทรายหล่อยึด อาจทำด้วยไม้หรือโลหะ
- Cope: (หรือแบบหล่อชั้นบน)คือหีบหล่อชั้นบนที่มีทรายหล่ออัดแน่น

- Drag: (หรือแบบหล่อชั้นล่าง) คือหีบหล่อชั้นล่างที่มีทรายหล่ออัดแน่น
- Mold: คือแบบหล่อหรือแม่พิมพ์ ในกรณีของการหล่อโลหะด้วยแบบหล่อทราย mold เป็นคำเรียกหีบหล่อที่อัดแน่นด้วยทรายหล่อซึ่งภายในมี โพรงแบบ(mold cavity) และ พร้อมที่จะรับน้ำโลหะจากเบ้าเท (ladle)
- Core: (หรือไส้แบบ)คือก้อนทรายในโพรงแบบที่ทำ ให้เกิดโพรงในชิ้นงานหล่อ
- Core print: คือส่วนของ pattern ที่ทำให้เกิดบ่า สำหรับวาง core ในโพรงแบบ(mold cavity)
- Riser: (รูล้น) คือโพรงในแบบทรายซึ่งทำหน้าที่รองรับน้ำโลหะที่มากกว่าความจุของโพรงแบบ และน้ำโลหะส่วนนี้ทำหน้าที่ชดเชยการหดตัวของโลหะในโพรงแบบ



รูป 1.1: แบบหล่อทราย (sand mold)

- Pouring cup: หรือ pouring basin คือส่วนที่รับน้ำโลหะจากเบ้าเท
- Sprue: (หรือรูเท) คือทางไหลของน้ำโลหะจาก pouring cup ลงสู่ well ซึ่งอยู่ที่ปลาย sprue
- Runner: คือช่องทางส่งน้ำโลหะ ในแนวระดับต่อจาก well
- Gate: คือช่องทางไหลของน้ำโลหะลงสู่โพรงแบบ
- Vent: (หรือรูไอ) คือรูในแบบหล่อทรายเพื่อใช้ระบายอากาศ
- Parting line: คือผิวตรงรอยต่อระหว่าง cope กับ drag

3. **ขั้นตอนพื้นฐานของการหล่อโลหะด้วยแบบหล่อทราย** (sand molding)
การหล่อโลหะด้วยแบบหล่อทรายมีขั้นตอนใหญ่ๆดังนี้:-
   (1) การทำ pattern (รวมทั้งการทำ core box): เพื่อใช้ทำโพรงแบบในแบบหล่อทราย (และ เพื่อทำ core ในกรณีของ core box)
   (2) การทำ core: core เป็นส่วนที่ทำให้เกิดโพรงในชิ้นงานหล่อ ดังนั้นในการหล่อชิ้นงานที่มีรูหรือโพรงจึงต้องมีการทำ core ก่อนที่จะทำแบบหล่อ

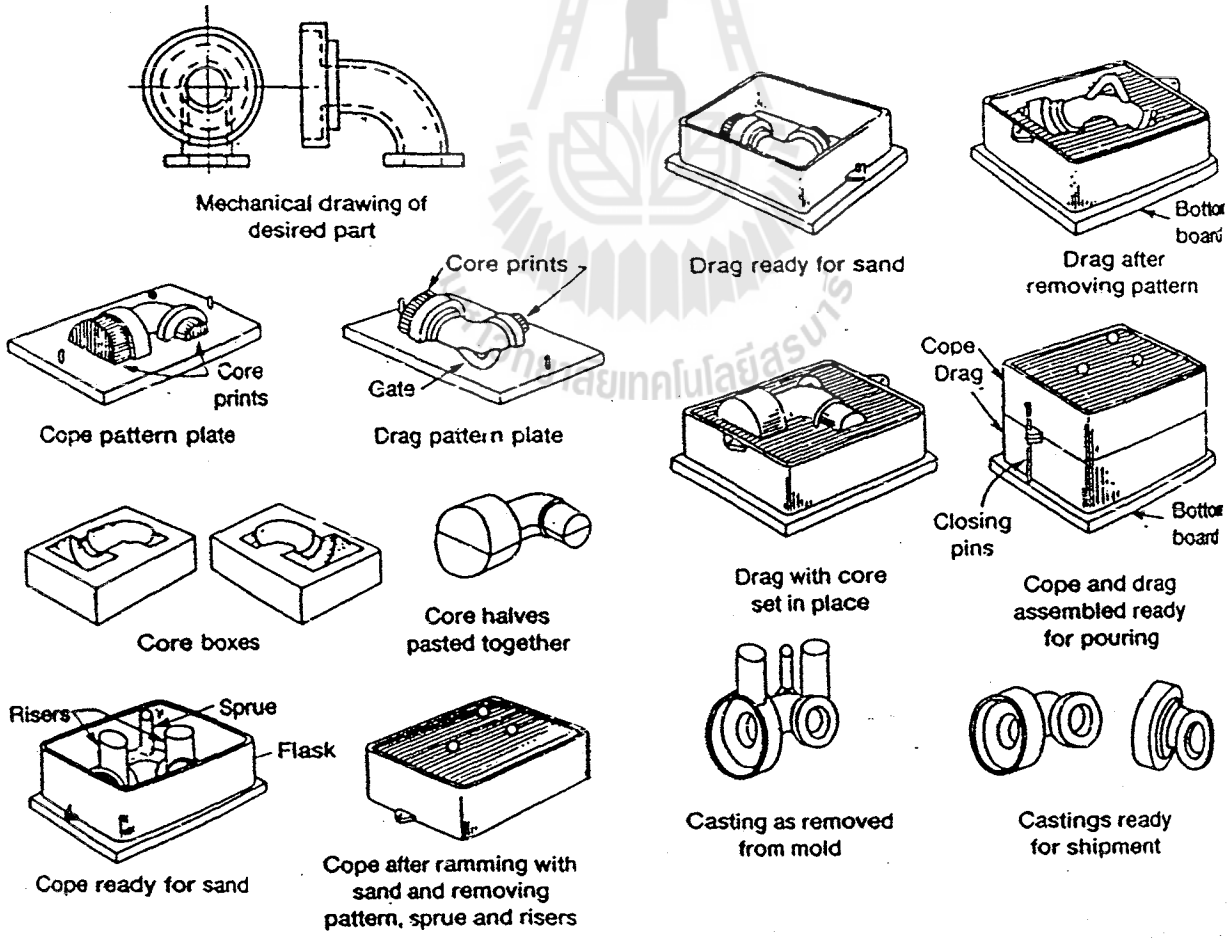
(3) **การทำแบบหล่อทราย** (molding): เป็นการทำให้เกิดเป็นแบบหล่อทรายที่มีโพรงรูปชิ้นงานอยู่ภายในและ พร้อมที่จะรับน้ำโลหะ

(4) **การหลอมโลหะและการเท** (melting and pouring): เป็นการหลอมโลหะให้เหลวในเตาหลอม (furnace) ที่เหมาะสม แล้วเทลงในแบบหล่อ

(5) **การทำความสะอาดชิ้นงานหล่อ** (cleaning): เป็นขั้นตอนของการแยกชิ้นงานหล่อ (casting) ออกจากแบบหล่อ; ตัดครีบที่เกิดจาก parting line; ตัด gatesและ risers ออกจากชิ้นงาน; และทำความสะอาดทรายที่ผิวชิ้นงาน ในขั้นตอนนี้ในบางครั้งอาจจำเป็นต้องเชื่อมเติมเนื้อโลหะหรือเชื่อมอุดตกแต่งรอยตำหนิ (defects)ที่เกิดจากการหล่อด้วย

ในรูป 1.2 แสดงขั้นตอนในการทำแบบหล่อทราย (sand molding) โดยใช้ pattern ชนิดที่ติดอยู่กับแผ่นกระดาน (cope and drag pattern plates) เริ่มต้นจากการทำ core จาก core box จากนั้นทำแบบหล่อชั้นบน (cope) ซึ่งมีการวางแบบของรูเท (sprue)และ รูล้น(riser)ด้วย แล้วจึงทำแบบหล่อชั้นล่าง(drag) และเมื่อนำแบบหล่อทั้งสองชั้นมาประกบกันจะได้แบบหล่อทราย (sand mold) ซึ่งภายหลังจากการเทน้ำโลหะ และโลหะแข็งตัวและผ่านการทำความสะอาดในขั้นสุดท้ายแล้ว จะได้ชิ้นงานหล่อ

การทำแบบหล่อทรายสามารถทำได้โดยใช้แรงงานคนงาน ทำด้วยมือ (manual molding) หรือใช้เครื่องจักร (machine molding) ซึ่งวิธีการหลังเป็นผลิตแบบสายการผลิต (line production)



รูป 1.2: แสดงลำดับขั้นการทำแบบหล่อทราย

4. ประเภทของ Patterns

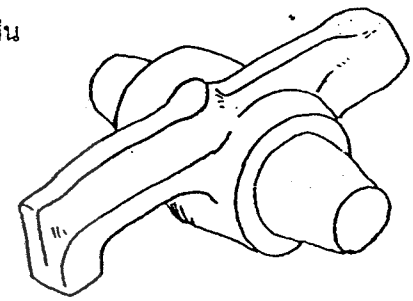
เราอาจแบ่ง Pattern ออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ:

- Pattern ถาวร หรือ non-expendable pattern ซึ่งหมายถึง pattern ที่สามารถนำมาใช้ทำแบบหล่อได้หลายครั้งก่อนที่จะชำรุดจนใช้การไม่ได้ pattern ชนิดนี้มักทำด้วย ไม้, พลาสติก, หรือ โลหะ
- Expendable pattern เป็น pattern ที่ใช้ทำแบบหล่อได้เพียงครั้งเดียว เช่น pattern ที่ทำจากขี้ผึ้ง (wax) หรือ โฟม เป็นต้น

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะ pattern ถาวรที่ใช้สำหรับการหล่อโลหะด้วยแบบหล่อทรายเท่านั้น ซึ่งมี pattern ที่ใช้กันอยู่เสมอคือ:-

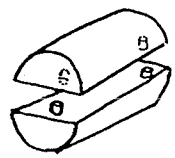
(1) Simple patterns: เป็น pattern ที่ไม่ซับซ้อน มีหลายชนิดด้วยกัน เช่น

- Single patterns หรือ loose patterns: Patternที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้เป็น pattern ชิ้นเดียว ใช้กับงานทำแบบหล่อทรายด้วยมือ และต้องมีการขยับหรือคลอน pattern ให้หลุดจากการเกาะยึดของเม็ดทราย เพื่อให้สามารถดึง pattern ออกจากทรายหล่อได้ง่าย ดังนั้นจึงมักเรียก pattern ชนิดนี้ว่า loose pattern เนื่องจากการใช้ pattern แบบนี้เสียเวลาทำแบบมาก ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการผลิตจำนวนน้อย เช่น ทำต้นแบบ (prototype) เป็นต้น (รูป1.3)



รูป 1.3: Loose pattern ของ rocker arm

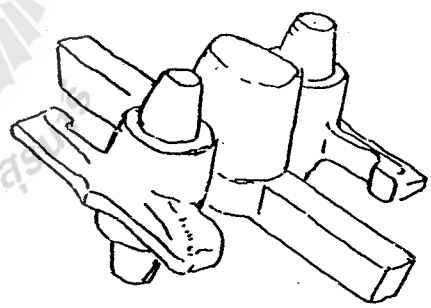
- Split patterns: (รูป 1.4) เป็น pattern ที่สามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งถูกฝังอยู่ใน cope และอีกส่วนหนึ่งอยู่ใน drag



รูป 1.4: Split pattern

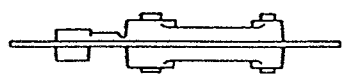
- Gated pattern: (รูป 1.5) มีลักษณะที่แตกต่างจาก pattern ที่กล่าวมาคือ มีส่วนที่เป็น gate (อาจมีทั้ง runner และriser) ติดอยู่กับ pattern ของชิ้นงานด้วย

(2) Match-plate pattern: Pattern ชนิดนี้มีลักษณะคล้ายกับการการนำ split patterns มาติดที่คนละด้านของแผ่นกระดานแผ่นหนึ่ง ส่วนมาก pattern ชนิดนี้จะมี gate ติดอยู่ด้วย (รูป 1.6)



รูป 1.5: Gated pattern ของ rocker arm

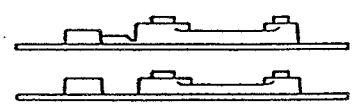
(3) Cope-and-drag pattern: แตกต่างจาก match-plate pattern ตรงที่ pattern ชนิดนี้ แยกติด pattern ของ cope และ drag บนแผ่นกระดาน 2 แผ่น (รูป 1.7)



รูป 1.6: Match-plate pattern

5. Pattern allowances

เป็นค่าเผื่อขนาดของ pattern เพื่อ (ก) ชดเชยการหดตัวที่เกิดจากการเย็นตัวของโลหะในสภาวะของแข็ง; (ข) ให้มีเนื้อโลหะมากเพียงพอสำหรับการตัดแปรรูป, และ (ค) ง่ายต่อการถอด pattern ออกจากทรายหล่อ



รูป 1.7: Cope-and-drag pattern

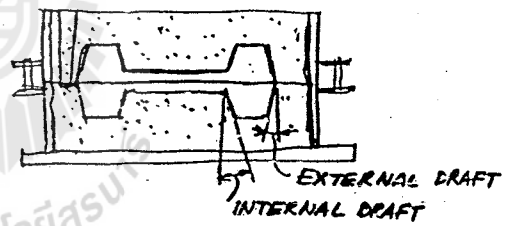
- **การเผื่อการหดตัว** (contraction allowance): ถึงแม้ว่าการหดตัวของชิ้นงานหล่อเป็นการหดตัวเชิงปริมาตร แต่การเผื่อค่าหดตัวที่ให้กับ pattern จะเป็นไปในลักษณะเชิงเส้น เช่น เหล็กหล่อ (cast iron) มีขนาดการหดตัวดังในตารางต่อไปนี้:

Dimension(mm)	Contraction(mm/m)
ยาวไม่เกิน 600	10.5
600 – 1,200	8.5
มากกว่า 1,200	7.0

- **การเผื่อสำหรับตัดตกแต่ง** (machining allowance): เป็นค่าเผื่อสำหรับตัดตกแต่งชิ้นงานหล่อให้ได้ขนาด ค่าเผื่อส่วนนี้จะอยู่ใน pattern ทำให้ pattern มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานจริง ค่า machining allowance จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น วิธีการทำแบบหล่อ, การวางตำแหน่งของชิ้นงานในแบบทราย, ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานหล่อ, และคุณสมบัติของโลหะ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น

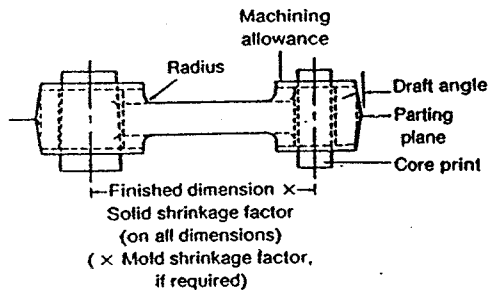
Pattern size	Allowance (mm)		
(mm)	Bore	Surface	Cope side
Cast iron			
Up to 150	3	2	4.5
150 - 300	3	3	6
300 - 500	4.5	3.5	6
Cast steel			
Up to 150	3	3	6
150 - 300	6	4.5	6
300 - 500	6	6	7.5

- **การเผื่อความลาดเอียงของผิว** pattern (Draft or taper allowance): เป็นการทำให้ผิว pattern ในแนวดิ่งมีความลาดเอียงเพื่อให้สามารถถอด pattern ออกจากแบบทรายได้ง่ายโดยไม่ทำให้โพรงแบบเสียหาย ขนาดของความลาดเอียง หรือ draft นี้ขึ้นอยู่กับ (i) ความยาวของผิวในแนวดิ่ง; (ii) ความซับซ้อนของ pattern, และ (iii) วิธีการทำแบบหล่อ



รูป 1.8: Draft allowance

โดยทั่วไปแล้ว ความลาดของผิวด้านใน(internal draft) จะมีค่ามากกว่าความลาดด้านนอก(external draft) เช่น ด้านใน = 40 – 60 mm/m และ ด้านนอก = 10 – 20 mm/m เป็นต้น ในรูป 1.8 แสดงความลาดเอียงทั้งสองชนิดนี้ และในรูป 1.9 แสดงการเผื่อขนาดของ pattern ตามที่ได้กล่าวมา



รูป 1.9: ค่าเผื่อต่างๆ

5. **การทำแบบหล่อและกระบวนการหล่อโลหะ**(Molding and casting processes)

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงวิธีการทำแบบหล่อต่างๆ ซึ่งมีทั้งแบบหล่อที่เป็นแบบถาวร (permanent molds) และไม่ถาวร(expendable molds) ความแตกต่างกันของวิธีการทำแบบหล่อนี้ทำให้เกิดกระบวนการหล่อโลหะที่แตกต่างกัน

(1) การหล่อโลหะด้วยแบบหล่อทราย (Sand Casting):

(ก) แบบหล่อทรายเปียก (Green sand mold): ทำจากทรายหล่อที่มีส่วนผสมของ ดินเหนียว (clay)และน้ำ คุณสมบัติของทรายหล่อนอกจากจะขึ้นอยู่กับ ปริมาณดินเหนียว และน้ำแล้ว ยังขึ้นอยู่กับ รูปร่าง(shape), ขนาด (size), และการกระจายของขนาดเม็ดทราย(size distribution) และวิธีการทำแบบอีกด้วย แบบหล่อทรายเปียกเป็นแบบหล่อทรายที่นิยมใช้กันมาก เพราะต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับแบบหล่อชนิดอื่น

ตำหนิ(defects)ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานจากแบบหล่อชนิดนี้มักมีสาเหตุมาจากความชื้นภายในแบบหล่อ เช่นรูพรุน(porosity) และโพรงอากาศ(blow holes) เป็นต้น

หลังจากที่น้ำโลหะไหลเต็มโพรงแบบ จะเกิดความดันกระทำที่ผิวด้านล่างของหีบหล่อชั้นบน ทำให้หีบหล่อชั้นบนลอยตัวแยกจากหีบหล่อชั้นล่าง ดังนั้นจึงต้องใช้มวลขนาดหนึ่งมาทับบนหีบหล่อชั้นบน ซึ่งเราสามารถคำนวณหาขนาดของมวลดังกล่าวได้จาก : $W = \rho .h.A$ โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำโลหะ; h คือ ความสูงของน้ำโลหะ(metallostatic head); และ A คือ พื้นที่ฉาย(projected area)ของชิ้นงานบนหีบหล่อชั้นบน ในการคำนวณนี้อาจใช้ ค่าความปลอดภัยประมาณ 1.5 – 2.0

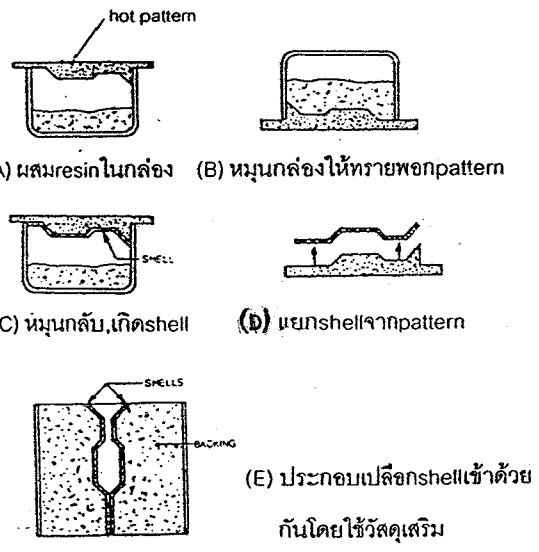
(ข) แบบหล่อทรายแห้ง (Dry sand mold): มีความแข็งแรงมากกว่าแบบทรายหล่อชื้น ทนต่อการไหลเซาะของน้ำโลหะได้ดีกว่า, ขยายตัวเนื่องจากแรงดันของน้ำโลหะได้น้อยกว่า, มี casting defects เนื่องจากความชื้นน้อยกว่า, เป็นแบบหล่อที่เหมาะกับงานขนาดใหญ่ หรือใช้หล่อโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงๆ เช่น เหล็กกล้า(steels) เป็นต้น

ทรายหล่อสำหรับทำแบบหล่อทรายแห้งมีอยู่ 2 ชนิดคือ facing sand ซึ่งเป็นทรายหล่อที่ใช้พอก pattern ชั้นแรก และ backing sand ซึ่งเป็นทรายหล่อที่ถูกเติมเข้าไปให้เต็มแบบภายหลังจากที่ใส่ facing sand แล้ว เนื่องจากก่อนการเทน้ำโลหะต้องมีการอบแบบหล่อให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 150-300 °C จึงเรียกแบบหล่อชนิดนี้ว่าแบบหล่อทรายแห้ง แต่ถ้าหากว่าการไล่ความชื้นกระทำที่ผิวหน้าของโพรงแบบเท่านั้น (โดยใช้เตาเผา(torch)) เราเรียกแบบหล่อว่า Skin dried mold ซึ่งมักใช้ในการหล่อโลหะบางชนิดที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ

(ค) Loam mold: เป็นแบบหล่อสำหรับชิ้นงานหล่อขนาดใหญ่ มีฐานเป็นอิฐก่อ เรียงเป็นรูปทรงของแบบหล่อ ผิวหน้าฉาบด้วยดินทนไฟ (loam mortar) ซึ่งประกอบด้วยทรายหล่อ 50% และ ดินเหนียว (clay) 50%

(ง) Pit mold: เป็นแบบหล่อที่ทำโพรงแบบในพื้นโรงหล่อ (คือใช้พื้นโรงหล่อเป็นส่วนของ drag) เหมาะกับแบบหล่อขนาดใหญ่

(จ) Shell mold: เป็นกระบวนการทำแบบหล่อทรายเปลือกบางโดยใช้ทรายเม็ดละเอียด (ขนาดเม็ดทรายประมาณตะแกรงเบอร์ 100 – 150) ผสมกับ thermosetting resin (ชนิด phenol – formaldehyde) แล้วปล่อยให้แข็งตัวบนผิว patternโลหะที่ร้อน(ประมาณ 200°C) Resinจะยึดเม็ดทรายให้ติดกันเป็นเปลือกบางของแบบหล่อ ซึ่งมีความหนาประมาณ 6 – 20 mm ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ pattern และ ระยะเวลาที่ทรายอยู่บนผิว pattern ในรูป 1.10 แสดงลำดับการทำ shell mold.



(A) ผสมresinในกล่อง (B) หมุนกล่องให้ทรายพอกpattern

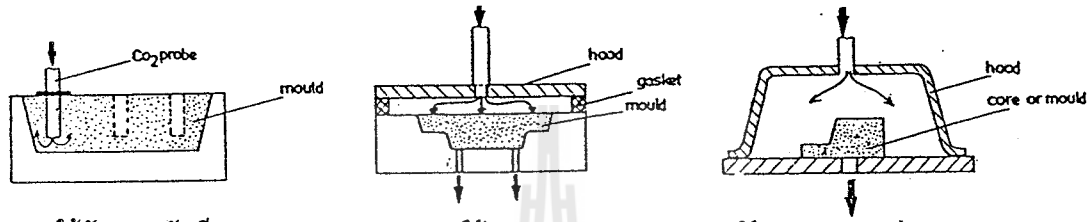
(C) หมุนกลับ,เกิดshell (D) แยกshellจากpattern

(E) ประกอบเปลือกshellเข้าด้วยกันโดยใช้วัสดุเสริม

รูป 1.10: ขั้นตอนของการทำ shell mold

(ข) Carbon-dioxide (CO_2) process: เป็นวิธีการทำแบบหล่อหรือทำ core ด้วยการนำทรายทำแบบ (หรือทรายทำcore) มาผสมกับ sodium silicate (water glass) ประมาณ 3-5% และผสมกับสารเติมแต่งอื่นๆ เช่นผงถ่านหิน, ผงไม้ละเอียด, และ iron oxide เป็นต้น แล้วจึงนำไปทำแบบหล่อ (หรือทำ core) จากนั้นผ่านก๊าซ CO_2 เข้าไปในแบบหล่อทราย ก๊าซ CO_2 จะทำปฏิกิริยากับ sodium silicate เกิดเป็น silica gel ($SiO_2.xH_2O$) ซึ่งทำให้ทรายจับตัวกัน. ทรายที่ใช้ทำแบบหล่อด้วยวิธีนี้ต้องเป็นทรายแห้งและไม่มีดินเหนียว (clay)เป็นส่วนผสม ในรูป 1.11 แสดงวิธีการผ่านก๊าซ CO_2 เข้าไปในแบบทราย

CO_2 process มีข้อดีคือ: (1) สามารถนำ mold หรือ core ไปใช้ได้ทันที โดยไม่ต้องนำไปอบหรือเผาให้แห้งเสียก่อน; (2) ชิ้นงานมีความถูกต้องของขนาดมากกว่าแบบทรายทั่วๆไป



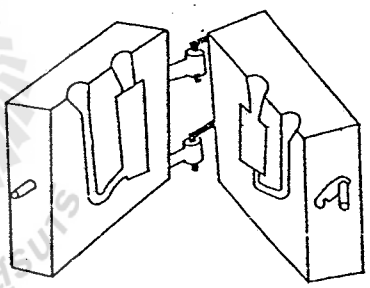
(ก) ใช้หัวprobeอันเดียว (ข) ใช้hood (ค) ใช้hoodกับcoreหรือmold

รูป 1.11: CO_2 process

(2) การหล่อโลหะด้วยแบบหล่อถาวร (Permanent mold casting)

แบบหล่อถาวรเป็นแบบหล่อที่สามารถใช้ได้หลายครั้ง มักทำด้วยเหล็กหล่อ (gray cast iron), เหล็กกล้า(steel), bronze, กราไฟต์(graphite) หรือวัสดุอื่น และใช้หล่อโลหะพวก non-ferrous เช่น อลูมิเนียม, แมกนีเซียม, และโลหะผสมของทองแดง (copper - based alloys) เป็นต้น

ในรูป 1.12 แสดงแบบหล่อถาวร(permanent mold or die) ซึ่งมีลักษณะเป็นสองส่วนยึดติดกันด้วยบานพับ น้ำโลหะไหลเข้าสู่โพรงแบบโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก ดังนั้นการหล่อโลหะด้วยแบบหล่อชนิดนี้จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า "gravity die casting" แบบหล่อชนิดนี้เมื่อถูกใช้ซ้ำๆกันหลายครั้งเป็นระยะเวลายาวนาน ก็อาจจะต้องมีการซ่อมแซมส่วนของโพรงแบบที่สึกหรอ



รูป 1.12: Permanent die

อายุการใช้งานของแบบหล่อถาวรขึ้นอยู่กับ:- (ก) ชนิดของโลหะที่หล่อหลอม, (ข) วัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อ, (ค) อุณหภูมิเทของน้ำโลหะ(pouring temperature), (ง) อุณหภูมิของแบบหล่อก่อนเทน้ำโลหะ (mold temperature), (จ) รูปร่างและความซับซ้อนของแบบหล่อ(mold configuration)

ชิ้นงานที่เกิดจากแบบหล่อถาวรจะมีขนาดเที่ยงตรงมากกว่าชิ้นงานจากการใช้แบบหล่อทราย ความคลาดเคลื่อนของมิติเชิงเส้นประมาณ $\pm$ 0.25 mm และความหนาต่ำสุดอาจทำได้ถึง 3 mm ส่วนข้อจำกัดของการหล่อแบบนี้ก็คือ ต้นทุนสูง, ไม่สามารถใช้กับชิ้นงานขนาดใหญ่หรือมีความซับซ้อนมากๆได้ และเกิดความสูญเสียในการหล่อหลอมสูง (ผลได้หรือyield ประมาณ 60%)

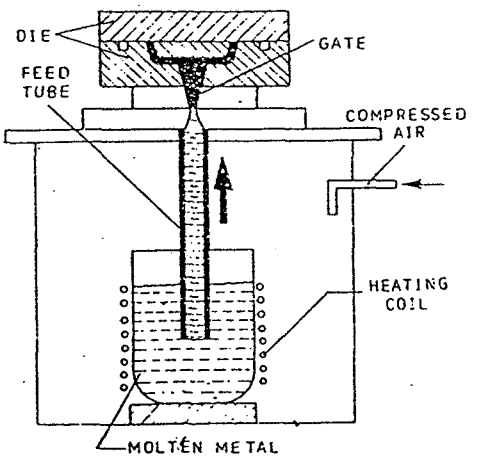
(3) การหล่อโลหะด้วยแบบหล่อถาวรใช้ความดันต่ำ(low pressure permanent mold –LPPM casting)

ในรูป 1.13 แสดงการหล่อโลหะด้วย LPPM ซึ่งน้ำโลหะที่อยู่ตอนล่างของเบ้าบรรจุ(ladle) จะถูกอัดให้ไหลเข้าสู

บรรยากาศได้ง่าย เช่น aluminium เป็นต้น ส่วนคุณลักษณะอื่นๆที่เห็นได้ชัดเจนคือ;- หล่อชิ้นงานได้บาง, ใช้ไส้แบบ(core) แบบไม่ถาวรได้, และไม่จำเป็นต้องใช้รูล้น(riser) และนอกจากนี้ผลได้จากการหล่ออาจเป็นไปได้ถึง 90%

วัสดุสำหรับทำแบบหล่อหรือแม่พิมพ์ชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นเหล็กหล่อ(cast iron), หรือ graphite

เครื่องจักรสำหรับการหล่อแบบนี้บางแบบใช้ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) ดูดอากาศออกจากโพรงแม่พิมพ์เพื่อให้น้ำโลหะไหลเข้าไปในโพรงแบบ แทนที่จะใช้แรงดันลม เราเรียกแบบหล่อชนิดนี้ว่า "vacuum permanent mold" ซึ่งทำให้เกิดผลดีคือ ได้น้ำโลหะสะอาด มีอากาศแทรกซึมอยู่น้อย ทำให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติทางกลดี



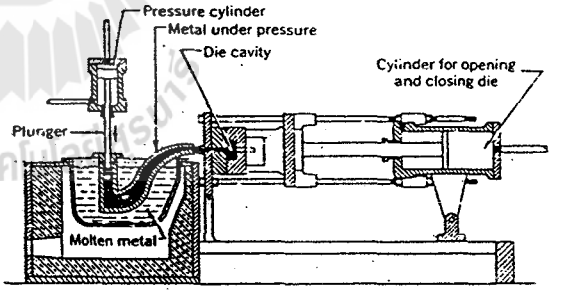
รูป 1.13: LPPM process

(4) การหล่อโลหะแบบ die casting

เป็นการหล่อหลอมโลหะด้วยแบบหล่อถาวรโดยใช้แรงดันสูงๆ (10.3-14 MPa)ดันน้ำโลหะให้ไหลเข้าสู่โพรงแบบ (die or mold cavity)

วิธีการทำ die casting มี 2 แบบ คือ:- Hot chamber method และ Cold chamber method ซึ่งมีความแตกต่างกันที่เครื่องจักรที่ใช้ กล่าวคือ ในเครื่องจักรสำหรับ hot chamber method มีอ่างสำหรับหลอมเหลวน้ำโลหะ (melting pot)อยู่ภายใน และแรงดันจากลมหรือน้ำมัน ทำให้กระบอกอัดน้ำโลหะ(injection cylinder) ซึ่งจุ่มอยู่ในอ่าง ฉีดน้ำโลหะเข้าไปในโพรงแบบ ส่วนเครื่องจักรสำหรับ cold chamber method ต้องอาศัยน้ำโลหะจากเตาหลอมภายนอกเครื่อง ป้อนเข้าสู่กระบอกฉีด แล้วจึงใช้แรงดันฉีดน้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบ

ในรูป 1.14 แสดงลักษณะการทำงานของเครื่อง hot chamber machine ซึ่งมีก้านอัด(plunger)ทำหน้าที่ส่งแรงดันให้น้ำโลหะไหลผ่านคอห่าน (gooseneck) เข้าไปในแม่พิมพ์ น้ำหนักชิ้นงานของการทำ die casting แบบนี้ อยู่ระหว่าง 0.03-40 kg เป็นโลหะหรือโลหะผสมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น โลหะผสมสังกะสี, โลหะผสมดีบุก, และโลหะผสมตะกั่ว เป็นต้น



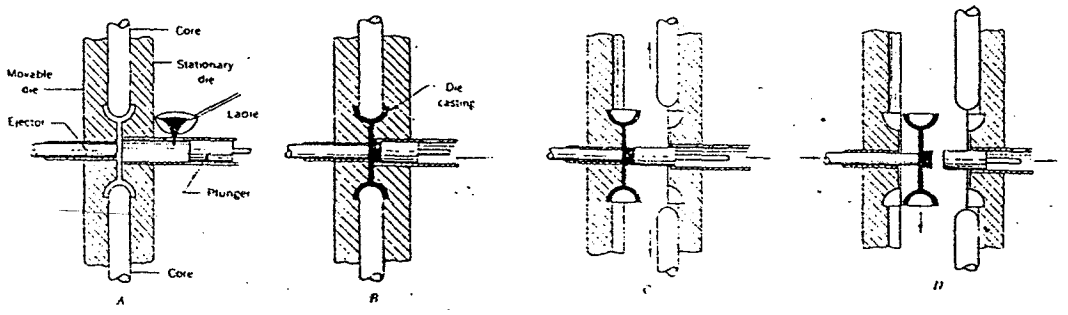
รูป 1.14: Plunger-activated hot chamber machine

สำหรับ aluminium, brass, และ magnesium มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิหลอมและความดันในการทำ die casting สูง ทำให้ไม่สามารถหลอมโลหะเหล่านี้ในตัวเครื่องได้ เพราะอุณหภูมิสูงจะทำให้อ่างหลอมละลายเสียหายได้ง่าย เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการหลอมละลายโลหะดังกล่าวในเตาหลอมนอกเครื่องจักร จากนั้นจึงถ่ายใส่เป้าเทน้ำโลหะ(ladle) แล้วนำมาป้อนใส่เครื่อง cold chamber machine เพื่ออัดเข้าไปในโพรงแบบ เนื่องจากต้องใช้ความดันในการอัดน้ำโลหะสูง cold chamber machine จึงต้องมีความมั่นคงและแข็งแรงกว่า hot chamber machine

ในรูป 1.15 แสดง การทำงานของ cold chamber machine แบบใช้ก้านอัดน้ำโลหะ(plunger) เริ่มต้นจากน้ำโลหะถูกเทลงในกระบอกอัด ในรูป A ในขณะนี้โพรงแม่พิมพ์(หรือโพรงแบบ)จะถูกปิดด้วยผิวแม่พิมพ์และผิวไส้แบบ(core) หลังจากเทน้ำโลหะในเบ้าจนหมด ก้านอัดจะเคลื่อนที่มาทางซ้ายอัดโลหะเหลวเข้าไปในโพรงแบบ (รูปB)

จากนั้น เมื่อโลหะแข็งตัวแล้ว ไส้แบบจะเคลื่อนที่ออกในแนวรัศมี แม่พิมพ์จะเปิดออก (รูปC) และตัวดันชิ้นงาน (ejector)จะออกแรงดันชิ้นงานอีกครั้งหนึ่งที่ติดอยู่กับแม่พิมพ์ออกจากโพรงแม่พิมพ์(รูป D)

ความดันที่ใช้ในการอัดน้ำโลหะ อยู่ในช่วงประมาณ 39-150 MPa ขนาดของเครื่องที่ใช้แรงดันน้ำมัน (hydraulic operated machine) อาจมีขนาดถึง 22 MN (2500 ตัน) สำหรับงานน้ำหนัก 38 kg



รูป 1.15: Horizontal plunger cold chamber machine

ลักษณะเด่นของ die casting คือ : อัตราการผลิตสูง; มีความคลาดเคลื่อนของขนาดต่ำ ($\pm$ 0.075 mm สำหรับโลหะผสมสังกะสี ถ้าขนาดไม่เกิน 25 mm , ถ้าเกิน, เพิ่มขึ้นอีก $\pm$ 0.025 mm ทุก 25 mm ที่เพิ่มขึ้น); สามารถผลิตงานบางๆได้ เช่น aluminium ทำได้บางถึง 1 mm; และ สามารถแสดงรายละเอียดของผิวงานได้ชัดเจน

(5) **การหล่อโลหะแบบ** investment casting

Investment casting process เป็นกระบวนการหล่อโลหะที่ให้ความเที่ยงตรงสูง ได้ผิวงาน-คุณภาพดี และสามารถใช้ได้กับ ferrous และnon-ferrous metals ที่ไม่ต้องการตัดตกแต่ง (machining) ภายหลัง แต่การหล่อแบบนี้เสียค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้กับชิ้นงานขนาดเล็กที่มีความซับซ้อนมากๆ และมีราคาแพง

มีขั้นตอนพื้นฐานในการทำ investment casting อยู่ 5 **ขั้นตอนคือ:**

(ก) เตรียม pattern ของชิ้นงานที่ต้องการหล่อ

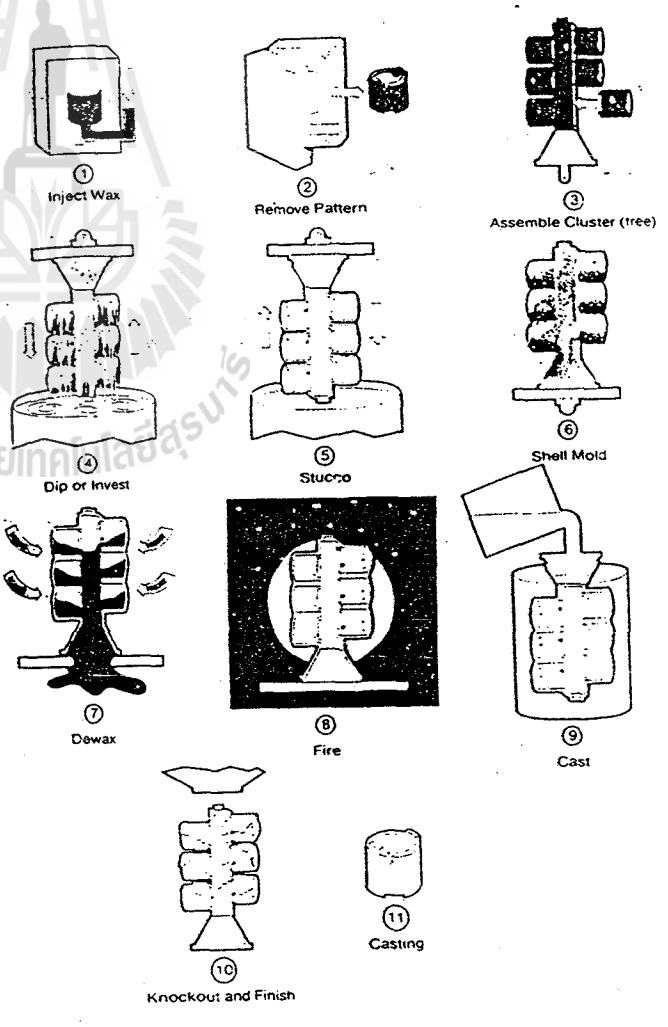
(ข) จัดวัสดุทำแบบหล่อให้ห่อหุ้ม pattern (วัสดุอาจเป็น ทราย, เซรามิค หรือ พลาสเตอร์)

(ค) ทำให้วัสดุ pattern ออกจากวัสดุทำแบบ และเกิดเป็นโพรงแบบ

(ง) เทน้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบหล่อ

(จ) แยกชิ้นงานออกจากแบบหล่อ

ขั้นตอน 3 ขั้นตอนแรกเท่านั้นที่แตกต่างจากการหล่อโดยใช้แบบทรายหล่อทั่วๆ ในรูป 1.16 แสดงการทำ investment casing ที่เรียกว่า "Lost Wax Casting"

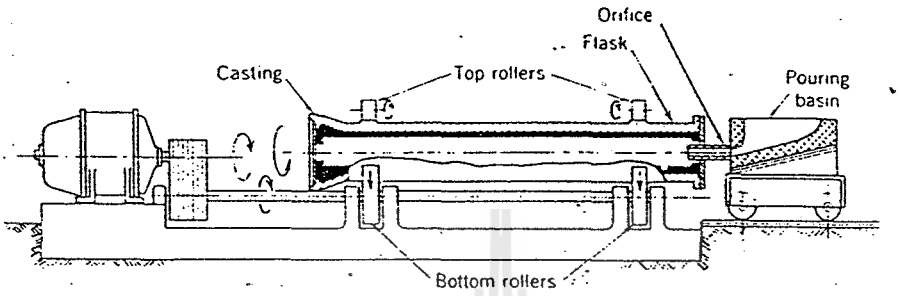


รูป 1.16: Lost wax process

(6) การหล่อโลหะแบบ Centrifugal casting

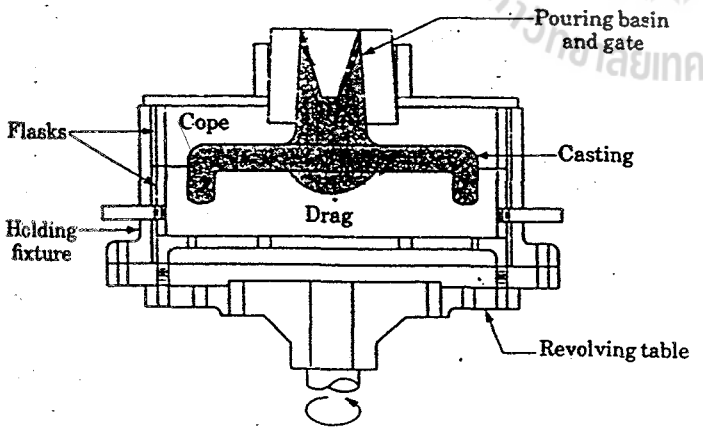
Centrifugal casting ใช้สำหรับหล่อท่อ (pipe), ปลอก(liner) หรือชิ้นงานที่สมมาตรรอบแกนกลาง ซึ่งโลหะที่หล่ออาจเป็น ferrous หรือ non-ferrous metal ก็ได้ การหล่อแบบนี้ใช้วิธีหมุนแบบหล่อทำให้เกิดแรง centrifugal force ทำให้โลหะเหลวติดกับผนังแม่พิมพ์ อย่างสม่ำเสมอ เกิดเป็นโพรงในชิ้นงานโดยไม่มีการใช้ไส้แบบ(core)

เราสามารถแบ่งวิธีการทำ centrifugal casting ได้เป็น 3 แบบคือ:- (ก) true centrifugal casting; (ข) semi centrifugal casting; และ (ค) centrifuging.

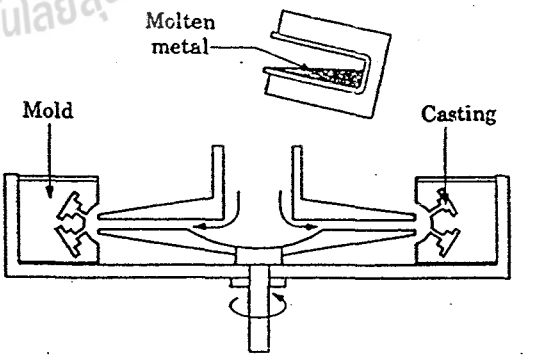


รูป 1.17: Centrifugal casting machine สำหรับหล่อท่อเหล็กหล่อ

centrifugal casting สามารถทำได้ทั้งในแนวดิ่ง (vertical) และในแนวนอน(horizontal) ในรูป 1.17 แสดง true centrifugal casting ในแนวนอนสำหรับผลิตท่อเหล็กหล่อ(cast iron pipe) ในขณะที่แบบหล่อหมุน การแข็งตัวของน้ำโลหะจะเกิดขึ้นที่ผิวแม่พิมพ์ก่อน แล้วค่อยๆกระจายเข้าสู่ภายใน ทำให้ผิวในแข็งตัวหลังสุด และ impurities ในน้ำโลหะจะสะสมกันที่ผิวส่วนนี้; ในกรณีของ Semicentrifugal casting แบบหล่อจะหมุนในแนวดิ่ง โดยมีน้ำโลหะอยู่เต็ม ภายหลังการแข็งตัวเนื้อโลหะตรงกลางจะไม่แน่นมากนัก เพราะบริเวณดังกล่าวมีความดันน้อย ส่วนใหญ่แล้วใช้วิธีการหล่อแบบนี้กับชิ้นงานมีต้องตัดหรือรูตรงกลาง ความเร็วในการหมุนต่ำกว่าแบบแรก (รูป1.18); สำหรับ Centrifuging จะมีแบบ(mold) อยู่รอบส่วนที่หมุนเหวี่ยงน้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบ(mold cavities) วิธีหล่อแบบนี้ สามารถนำไปใช้กับชิ้นงานที่มีรูปร่างไม่สมมาตรด้วย (รูป 1.19)



รูป 1.18: Semicentrifugal casting



รูป 1.19: Centrifuging

(7) Squeeze casting เป็นกระบวนการหล่อโลหะผสมกับการตีขึ้นรูปโลหะ(forging) วิธีการคือ เทน้ำโลหะเหลวในปริมาณที่เหมาะสมลงในแม่พิมพ์ ในขณะที่ของโลหะเหลวเริ่มแข็งตัวบางส่วน ใช้แรงดันอัดโลหะในแม่พิมพ์ (70-140 MPa) เป็นการขจัดรูพรุนในชิ้นงาน และทำให้มีเกรนขนาดเล็ก ความแข็งแรงสูง

ตาราง 1.1: แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการหล่อโลหะต่าง ๆ

Process	*Choice of materials*	*Maximum size or weight*	*Minimum section thickness (mm)*	*Machining allowance (mm)*	*Dimensional accuracy (mm)*	*Rate of output*
Sand casting	Ferrous, conferrous, light metals	Very large, about 200 tonnes	3	3—6	±0·75—1·5	20 to 600 pieces per hour, depending on mechanisation
Shell-mould	Some as above, not for low carbon steels	Less than 1500 mm × 1500 mm square (best for small parts)	1·5	1·5	±0·075 to 0·125 mm per 25 mm	High
Plaster mould	Aluminium, copper alloys	Upto 10 kg in most cases	0·75	1	±0·25—0·125 mm per 25 mm	High, upto 1000 per hour
Permanent mould	Aluminium, copper alloys, grey iron	About 25 kg in aluminium	2·5	1·5—3	±1·5 mm in aluminium, better in brass	100 per hour
Die casting	Zinc, aluminium, copper alloys, magnesium	Large, upto 100 kg in zinec	0·5	0·3	±0·025 mm per 25 mm	High; upto 1000 per hour
Investment casting	All metals	best for parts below 1 kg	0·75		± 0·1 mm per 25 mm	Moderate

6. ชนิดของไส้แบบ(core)และวิธีทำไส้แบบ

ไส้แบบทราย(sand core) คือ ก้อนทรายแห้งที่เกิดจากการนำทรายมาผสมกับตัวประสาน แล้วอบให้แห้ง แล้วนำไปใส่ในโพรงแบบหล่อ (mold cavity) เพื่อทำให้เกิดโพรงในชิ้นงานหล่อ(casting)

6.1 คุณลักษณะของไส้แบบและทรายทำไส้แบบ:-

(1) ไส้แบบจะต้องมีความแข็งและความแข็งแรง(hardness and strength)ทั้งในสภาพที่เปียกและแห้ง

(2) ไส้แบบจะต้องมีความโปร่งอากาศ(permeability) เพื่อให้แก๊สภายในไส้แบบไหลออกได้ง่าย

(3) ไส้แบบจะต้องทนต่ออุณหภูมิสูงของน้ำโลหะได้

(4) ทรายที่ใช้ทำไส้แบบควรเป็นชนิดที่ทำให้เกิดแก๊สน้อยเมื่อสัมผัสกับน้ำโลหะ เพราะถ้าเกิดแก๊สมาก ไส้แบบจะต้องมีความโปร่งอากาศมาก ซึ่งมีผลทำให้ความแข็งแรงของไส้แบบลดลง

(5) ไส้แบบจะต้องมีคุณสมบัติที่เรียกว่า "collapsibility" ซึ่งหมายถึงการที่ไส้แบบยุบตัวหรือแตกตัวออกจากกันภายหลังที่น้ำโลหะแข็งตัวแล้ว ทำให้สามารถแยกไส้แบบออกจากชิ้นงานได้ง่าย

ส่วนประกอบของทรายทำไส้แบบคือ ทรายซิลิกา (silica sand) กับ ตัวประสาน(binder) ทรายทำไส้แบบที่ดีไม่ควรมีดินเหนียว(clay)ผสมอยู่เลย (ถ้ามีก็ควรมีอยู่น้อยมาก) เพราะการมีดินเหนียวผสมอยู่มากจะทำให้ความโปร่งอากาศและความสามารถในการยุบตัวของไส้แบบต่ำลง

ตัวประสานมีหน้าที่ทำให้เม็ดทรายเกาะกันเป็นรูปทรงที่ต้องการ ตัวประสานที่ดีจะทำให้ไส้แบบมีความแข็งแรงสูง ยุบตัวได้ง่าย(collapsible) ไม่เกิดการบิดหรือเสียรูปของไส้แบบในระหว่างการผลิตและการทำแบบหล่อ นอกจากนี้ยังต้องระบายความร้อนได้ง่าย และทนอุณหภูมิได้สูงได้ดี ตัวประสานที่ใช้ทำไส้แบบมีหลายอย่างคือ:-

- **น้ำมัน** (oil): มีน้ำมันหลายชนิด สำหรับใช้เป็นตัวประสานไส้แบบ เช่น core oil เป็นน้ำมันที่มีน้ำมันพืช (น้ำมันลินสีด-- linseed oil) หรือน้ำมันข้าวโพด(corn coil))เป็นส่วนผสมหลัก บางชนิดอาจมีน้ำมันแร่(mineral oil)อื่นๆผสมอยู่เพื่อทำให้ไส้แบบมีคุณสมบัติพิเศษบางอย่าง

- **ซิลิเกต** (silicate-bonded): คือ CO_2 process สำหรับทำไส้แบบ ตัวประสานที่สำคัญคือ sodium silicate ซึ่งภายหลังที่ผ่าน CO_2เข้าไปในทรายแล้วทรายจะจับตัวแข็งเป็นไส้แบบ CO_2 (หรือ CO_2 core) ไส้แบบชนิดนี้จะมีความ

แข็งแรงสูง แต่มี permeability และ collapsibility ต่ำ นอกจากนั้นยังแยกชิ้นงานออกจากทรายได้ยาก เราสามารถเพิ่ม collapsibility ได้ด้วยการเติมผงไม้บด (wood flour) หรือ หรือผงถ่านหิน (coal dust) ประมาณ 1% เข้าไปในทรายทำไส้แบบ

- **เรซิน** (resins): มีใช้ทั้งชนิดที่เป็น thermoplastic และ thermosetting resins ไส้แบบที่ใช้เรซินเป็นตัวประสานจะมีความแข็งแรงสูง มีแก๊สเกิดน้อย, collapsibility ต่ำ, ทนความร้อนได้ดี แต่เสียค่าใช้จ่ายในการทำสูง
- **แป้งเปียก และ น้ำตาลเคี่ยว:** ยังคงใช้กันอยู่ ในบางครั้งอาจผสมกับ core oil ด้วย

6.2 **ชนิดของไส้แบบ:-**

(1) Stock core: เป็น core ที่มีรูปทรงมาตรฐาน ทำขึ้นเพื่อเก็บไว้ใช้เวลาต้องการ เช่น ไส้แบบทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างๆ ตั้งแต่ 10 - 80 mm

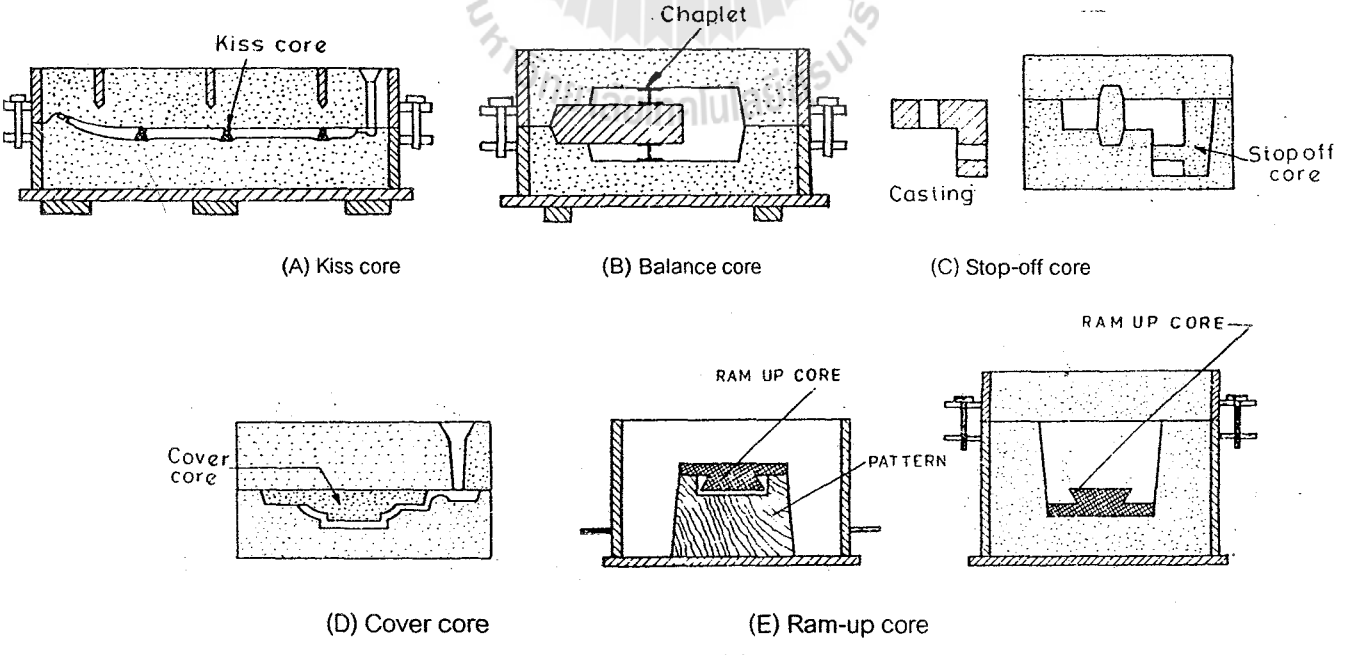
(2) Kiss core: เป็นไส้แบบที่อยู่ระหว่างผิวของ cope และ drag โดยอาศัยแรงกดของ cope ทำให้ไส้แบบไม่เคลื่อนที่ kiss core เหมาะกับชิ้นงานที่มีรูหลายรู แต่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงในตำแหน่งรูมากนัก (รูป 1.20 A)

(3) Balance core: เป็นไส้แบบชนิดที่ใช้กับบ่า core ในแนวนอนบ่าเดียว สำหรับหล่อชิ้นงานที่มี (รูตัน) ในบางครั้งอาจจำเป็นต้องใช้ชิ้นโลหะหนุนที่ปลาย (chaplet) ดังในรูป 1.20 B

(4) Stop-off core: เป็นไส้แบบที่ใช้สำหรับป้องกันการไหลของน้ำโลหะเข้าไปในบางส่วนของโพรงแบบ(รูป 1.20 C)

(5) Cover core: มีลักษณะคล้ายกับ balance core มีส่วนแตกต่างกันตรงที่ ในกรณีของ cover core ไส้แบบจะถูกยึดจากด้านบน ส่วนที่เป็นอิสระจะอยู่ในแนวดิ่ง สำหรับของ balance core จะอยู่ในแนวระดับ (รูป 1.20 D)

(6) Ram-up core: เป็นไส้แบบที่ประกอบเข้ากับแบบหล่อทรายในขณะดำทรายฝัง pattern (รูป1.20 E)



(A) Kiss core (B) Balance core (C) Stop-off core

(D) Cover core (E) Ram-up core

รูป 1.20: ประเภทของไส้แบบ

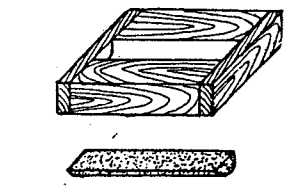
6.3 การทำไส้แบบ(core making)

การทำไส้แบบใช้แบบที่เรียกว่า core box ซึ่งทำด้วยไม้หรือโลหะ มีโพรงเป็นรูปทรงของชิ้นงาน อาจประกอบด้วยชิ้นส่วนเพียงชิ้นเดียวหรือหลายชิ้น; core box ที่เรียกว่า "dump core box" มีชิ้นเดียว สำหรับทำไส้แบบที่มีรูปทรงสมมาตรรอบแกนกลาง core box ชนิดนี้ ทำไส้แบบเพียงครึ่งเดียว แล้วนำไส้แบบ 2 ชิ้นมาประกบติดกัน ในรูป 1.21 แสดง dump core box และ core box แบบ 2 ชิ้น

การทำไส้แบบ อาจจะทำด้วยมือ หรือใช้เครื่องทำไส้แบบ (core making machine) ซึ่งในกรณีหลัง เหมาะกับการทำไส้แบบจำนวนมากเพราะเครื่องจักรทำงานได้เร็วกว่าทำด้วยมือ

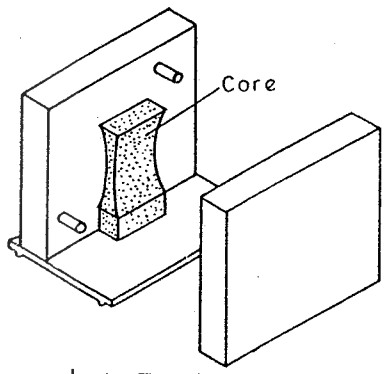
ภายหลังการขึ้นรูปเป็นไส้แบบจาก core box; ไส้แบบที่ยังเปียกอยู่จะถูกส่งเข้าเตาอบเพื่ออบไล่ความชื้นหรือทำให้ตัวประสานแข็งตัว ถ้าใช้ระยะเวลาอบนานเกินไป ตัวประสานจะไหม้ ทำให้ทรายไส้แบบไม่จับตัว แต่ถ้าอบไม่แห้ง ความชื้นที่ตกค้างอยู่จะทำให้เกิดแก๊สในน้ำโลหะ ซึ่งไล่ออกจากชิ้นงานได้ยาก

เตาอบไส้แบบ (oven) อาจเป็นแบบใช้ไฟฟ้า, ถ่าน coke, ถ่านไม้, แก๊ส, หรือ น้ำมัน และใช้อุณหภูมิอบประมาณ 150° C ถึง 400°C ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวประสาน, ขนาดของไส้แบบ, และระยะเวลาในการอบ



CORE

Dump core box



รูป 1.21: Two-piece core box

ภายในตัวไส้แบบอาจมีการเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นลวดโลหะ ถ้าไส้แบบมีขนาดใหญ่ ต้องทำรูระบายอากาศในไส้แบบ ไส้แบบขนาดเล็ก ใช้วิธีผังเส้นด้ายชุบไข ความร้อนจากเตาอบจะเผาเส้นด้าย เกิดเป็นรูระบายอากาศเล็กๆในไส้แบบ

7. ทรายหล่อ (molding sand)

ทรายเป็นวัสดุหลักของการทำแบบหล่อโลหะในโรงหล่อทั่วๆไป แบบหล่อทราย(sand mold) สามารถใช้หล่อโลหะได้หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็น ferrous หรือ non-ferrous metals เพราะว่า:-

(1) ทนความร้อนได้สูง (refractory nature)

(2) ต่อต้านปฏิกิริยาเคมี (chemical resistivity)

(3) โปร่งอากาศ (permeability)

(4) จับตัวเป็นรูปทรงได้ (cohesiveness or strength)

เราสามารถปรับคุณสมบัติต่างๆของทรายหล่อ (เช่น ความแข็งแรง, ความแข็ง, และ ความโปร่งอากาศ) ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมได้ ด้วยการปรับสัดส่วนขององค์ประกอบของทรายหล่อ ซึ่งได้แก่

(1) เม็ดทราย (silica sand – SiO_2)

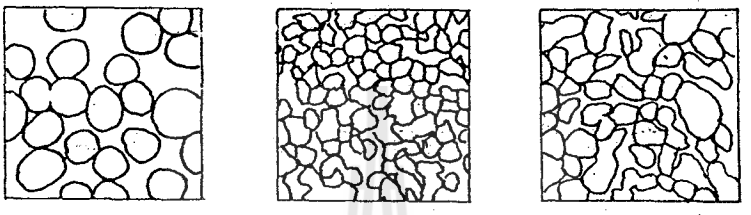
(2) ดินเหนียว (clay) และ

(3) ความชื้น (moisture)

7.1 **เม็ดทราย** (Silica sand grains): เม็ดทรายมีลักษณะแตกต่างกันอยู่ 3 อย่างคือ:- **รูปร่าง** (shape), **ขนาด** (size), **และการกระจายของขนาด** (size distribution)

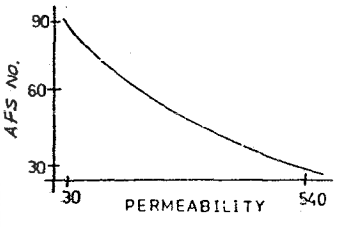
เม็ดทรายสำหรับทำแบบหล่อ (molding sand)มีขนาดตั้งแต่ 53 μm (270 mesh) ถึง 3360 μm (6 mesh) และมีรูปร่างแบ่งเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆคือ: **เม็ดกลม** (round), **เม็ดเหลี่ยม** (angular), และ **เม็ดมุมมน** (sub-angular) ดังแสดงในรูป1.22 การยึดติดกันของทรายเม็ดกลมมีช่องว่างระหว่างเม็ดทรายมากกว่าอีก 2 ชนิด เพราะฉะนั้นจึงระบายอากาศได้ดีกว่า (permeability ดี) แต่ผิวสัมผัสของทรายเม็ดกลมน้อยกว่า ความแข็งแรงของแบบหล่อจึงต่ำกว่า

ทรายเม็ดเล็กสามารถยึดกันได้แน่นกว่าทรายเม็ดใหญ่ และสามารถแทรกตัวในช่องว่างระหว่างทรายเม็ดใหญ่ได้ดี นอกจากนี้ ชนิดและปริมาณดินเหนียว และปริมาณความชื้นในทรายหล่อ ตลอดจนถึงวิธีการทำแบบหล่อ ต่างก็มีส่วนสำคัญต่อคุณสมบัติของแบบหล่อทราย

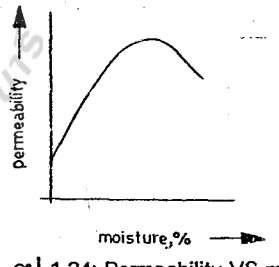


รูป 1.22: **รูปร่างของเม็ดทราย**

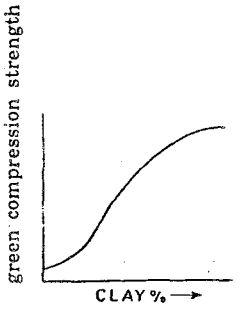
ในรูป 1.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเม็ดทรายกับความโปร่งอากาศ เม็ดทรายยิ่งมีขนาดเล็กความโปร่งอากาศก็ยิ่งต่ำ สำหรับรูป 1.24 แสดงอิทธิพลของความชื้นที่มีต่อความโปร่งอากาศของทรายหล่อ ส่วนรูป 1.25 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณดินเหนียว(clay)กับความแข็งแรงของแบบหล่อทรายเปียก (green compression strength) จะเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น ความสามารถในการทนแรงอัดของก้อนทรายจะค่อยๆสูงขึ้นจนถึงค่าๆหนึ่ง ทรายหล่อส่วนใหญ่จะผสมดินเหนียวเพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูงสุดนี้ (ขึ้นอยู่กับชนิดของดินเหนียวด้วย – เบนโทไนท์, bentonite, ใช้ 10% และ fireclay ใช้ 20%) นอกจากดินเหนียวจะมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงแล้ว ปริมาณความชื้นก็มีบทบาทสำคัญด้วย ในรูป 1.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของแบบหล่อทรายเปียกกับปริมาณความชื้นในทรายหล่อที่มีส่วนผสมของดินเหนียวต่างๆกัน



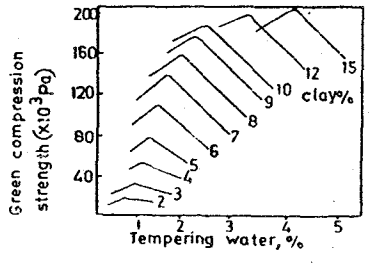
รูป 1.23: Grain size VS permeability



รูป 1.24: Permeability VS moisture



รูป 1.25: Green strength VS clay



รูป 1.26: Green strength VS clay and moisture

7.2 **ตัวประสานเม็ดทรายทำแบบหล่อ** (sand binder):

ทรายหล่อใช้ **ดินเหนียว** (clay) ซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน(binder) โดยทั่วไปดินเหนียวมีลักษณะของอนุภาคเป็นแผ่นเล็กๆ(flake-shape particles) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 20 μm และตกตะกอนในน้ำด้วยอัตราความเร็วต่ำกว่า 25 mm/min ดินเหนียวที่ใช้ผสมทรายหล่อมีอยู่หลายชนิดดังนี้:-

- เบนโทไนท์ (bentonite): เป็นตัวประสานเม็ดทรายหล่อที่เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด จัดอยู่ในแร่ธาตุดินเหนียวในกลุ่ม Montmorillonite ซึ่งมีคุณสมบัติดีในการเป็นตัวประสาน เช่น (1) ทำให้ก้อนทรายมีความแข็งแรงสูง ถึงแม้ว่ายังไม่ได้อบให้แห้งก็ตาม; (2) สามารถใช้ทรายหล่อซ้ำได้ ความเหนียวของทรายจะกลับคืนมาได้ด้วยการผสมน้ำใหม่; (3) เตรียมทรายหล่อได้ง่าย; และ (4) ถอด pattern ออกจากแบบทรายได้ง่าย
- ดินทนไฟ (fire clay): โดยเฉพะอย่างยิ่งชนิดที่เป็น kaolinite
- ดินเหนียวชนิดอื่นๆ เช่น illite และ halloysite เป็นต้น

7.3 **ส่วนผสมอื่น ๆของทรายหล่อ** (sand additives):

หมายถึงวัสดุที่ไม่ได้ทำหน้าที่ยึดเม็ดทรายหล่อให้ติดกัน แต่ผสมเข้ากับทรายหล่อเพื่อวัตถุประสงค์อื่น เช่น

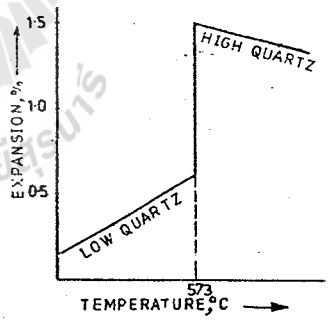
(1) Sea coal: คือถ่านหินบิทูมินัสละเอียด (finely, pulverised bituminous coal) ใช้ผสมกับ facing sand เพื่อทำให้ผิวงานเรียบ และลดเม็ดทรายติดผิวงาน (ผสมประมาณ 1-5% กับ facing sand)

(2) Wood flour: เป็นผงไม้บดละเอียด ใส่เข้าไปในทรายหล่อเพื่อทำให้ชิ้นงานหล่อมีผิวเรียบ, และลดผลเสียหายที่เกิดจากการขยายตัวของทรายหล่อเมื่อได้รับความร้อนสูงๆจากน้ำโลหะ ถ้าผสมกับทรายทำไส้แบบ จะช่วยทำให้ collapsibility ของไส้แบบดีขึ้น ตามปกติมักผสมในทรายหล่อประมาณ 0.5-1%

(3) Silica flour: เป็นทรายเม็ดละเอียด ซึ่งมีขนาดของเม็ดทรายต่ำกว่า 54 μm ทำหน้าที่แทรกตัวในช่องว่างเล็กๆ ระหว่างเม็ดทรายหล่อ เพื่อลดการแทรกซึมของน้ำโลหะเข้าไปในผิวโพรงแบบ ทำให้เกิดตำหนิ(defect)ที่เรียกว่า penetration

7.4 **การขยายตัวของเม็ดทรายเนื่องจากความร้อน:**

เราจำเป็นจะต้องเข้าใจลักษณะของการขยายตัวของเม็ดทราย (silica sand) เนื่องจากความร้อน เพราะว่า ตำหนิในชิ้นงานหล่อหลายชนิดมีสาเหตุมาจากการขยายตัวของเม็ดทรายที่อุณหภูมิสูง เม็ดทรายซิลิกาจะขยายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 573°C (รูป 1.27) ณ. อุณหภูมินี้ผลึกของซิลิกาจะเปลี่ยนจาก low quartz เป็น high quartz ซึ่งมีปริมาตรมากขึ้น ปรากฏการณ์เช่นนี้ จะเกิดขึ้นกับทรายที่อยู่ติดกับโลหะเหลว ผลก็คือ ทำให้ผิวทรายหลุดล่อน เกิดเป็นตำหนิ(defects)ที่ผิวชิ้นงาน เช่น scabs และ buckles เป็นต้น



รูป 1.27: การขยายตัวของเม็ดทราย

ตำหนิเหล่านี้สามารถลดลงได้ด้วยการผสม buffer material เช่น wood flour

7.5 **ทรายธรรมชาติและทรายสังเคราะห์** (Natural and synthetic sands):

ทรายสำหรับทำแบบหล่อทราย อาจเป็นทรายธรรมชาติหรือทรายสังเคราะห์ก็ได้ ซึ่งมีความแตกต่างหรือเหมือนกันกล่าวคือ

- **ทรายธรรมชาติ** (natural sand): หมายถึงทรายที่มีดินเหนียว (clay) ผสมอยู่ตามธรรมชาติ เมื่อนำมาผสมน้ำแล้วสามารถนำไปทำเป็นแบบหล่อได้ เนื่องจากเกิดขึ้นตามธรรมชาติ จึงมีสารปนเปื้อน(impurities)ผสมอยู่มาก ทำให้ความ

สามารถในการทนความร้อนของทรายหล่อต่ำ ดังนั้นทรายชนิดนี้จึงเหมาะกับการหล่อโลหะที่มีจุดหลอมเหลวไม่สูงมากนัก เช่น non-ferrous metals และ เหล็กหล่อเทา(gray cast iron) เป็นต้น

- **ทรายสังเคราะห์** (Synthetic sands): เป็นทรายหล่อที่เกิดจากการผสมทรายที่ปราศจากดินเหนียว กับส่วนผสมต่างๆ เพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสำหรับใช้ทำแบบหล่อทราย เช่น นำทรายแม่น้ำมาผสมกับ ตัวประสาน และน้ำ แล้วเสริมด้วย sand additives ต่างๆ ทรายหล่อแบบนี้สามารถทนความร้อนได้ถึง 1700°C จึงเหมาะกับการหล่อเหล็กกล้า (steel casting)

8. **การทดสอบทราย** (sand testing)

การทดสอบทรายหล่อ (molding sand) และทรายทำไส้แบบ (core sand) เป็นวิธีการควบคุมคุณภาพอย่างหนึ่งในโรงหล่อ (foundry) เพื่อลดจำนวนชิ้นงานเสีย (defectives)

วิธีการทดสอบทรายที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ :-

(1) การทดสอบเพื่อหาปริมาณความชื้นของทราย (moisture content)

(2) การทดสอบเพื่อหาปริมาณดินเหนียวในทรายหล่อ (clay content)

(3) การทดสอบเพื่อหาขนาดของเม็ดทราย และการกระจายของขนาด (grain fineness and size distribution)

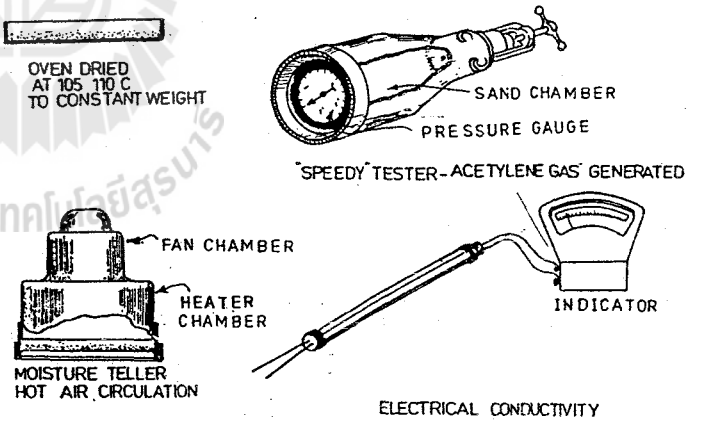
(4) การทดสอบเพื่อหาความโปร่งอากาศของทรายหล่อ (permeability)

(5) การทดสอบเพื่อหาความแข็งแรงของแบบหล่อทราย (strength tests)

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบอื่นๆอีก เช่น การทดสอบความแข็งของแบบหล่อทราย(mold hardness), การทดสอบความสามารถในการปั้นเป็นแบบหล่อทราย(mold ability), และ ความสามารถในการอัดตัว (compactability) เป็นต้น

8.1 **การหาปริมาณความชื้นของทราย** (moisture content):
ใช้ตัวอย่างทรายหล่อหนัก 50 gm ที่สุ่มจากโรงหล่อ, อบทรายหล่อที่อุณหภูมิประมาณ 105-110°C จนกระทั่งทรายแห้ง น้ำหนักของทรายที่สูญหายไปก็คือ ปริมาณความชื้นในทรายหล่อ 50 gm และเมื่อคูณค่าที่ได้ด้วย 2 จะได้ % ความชื้นของทรายหล่อ

นอกจากวิธีการทดสอบในห้องทดสอบแบบนี้แล้ว ในปัจจุบัน มีเครื่องมือวัดความชื้น(moisture teller) ที่ใช้หลักการวัดแบบต่างๆให้เลือกใช้ เครื่องมือเหล่านี้วัดความชื้นได้เร็วและให้ผลเที่ยงตรงพอควร (รูป 1.28)



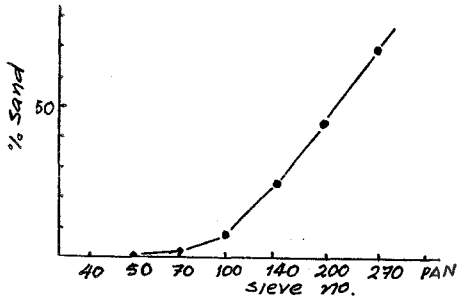
รูป 1.28: Moisture teller

8.2 **การหาปริมาณดินเหนียวในทรายหล่อ (clay content):** ปริมาณดินเหนียวในทรายหล่อคือ น้ำหนักของทรายหล่อที่หายไปหลังจากที่ล้างดินเหนียวออกจากทรายหล่อแล้ว ซึ่งหาได้จากการนำเอาตัวอย่างทรายที่แห้งแล้วจากการหาค่าความชื้น (น้ำหนัก 50 gm) ไปล้างเอาดินเหนียวออก ด้วยสารละลายของน้ำผสม sodium hydroxide โดยใช้วิธีผสมทรายกับสารละลายในเครื่องผสม (mixing device) แล้วปล่อยให้ทรายตกตะกอน อนุภาคของดินเหนียวจะตกตะกอนช้ากว่าทราย (ความเร็วต่ำกว่า 25 mm/ min) ล้างด้วยสารละลายเช่นนี้ประมาณ 2-3 ครั้ง แล้วอบให้แห้ง น้ำหนักของทรายที่หายไปคือน้ำหนักของดินเหนียว

8.3 **การหาขนาดของเม็ดทราย และการกระจายของขนาด** (grain fineness and size distribution):

การหาขนาดเม็ดทร้ายใช้ตัวอย่างทรายหล่อที่ผ่านการหาความชื้น และปริมาณดินเหนียวมาแล้ว นำทรายหล่อดังกล่าวใส่เครื่องร่อนทราย(sieve shaker) ซึ่งมีตะแกรงเรียงซ้อนกัน ตะแกรงที่มีรูใหญ่กว่าจะอยู่ตอนบน ขนาดของรูตะแกรงบอกเป็นเบอร์รูตะแกรง(mesh number): รูเล็กเบอร์สูง, รูใหญ่เบอร์ต่ำ ทรายจะถูกใส่ในตะแกรงบนสุด; หลังจากที่เครื่องทำการร่อนทรายประมาณ 15 นาที; ชั่งน้ำหนัก ทรายที่ค้างอยู่ในแต่ละตะแกรง แล้วคำนวณค่า AFS Grain Fineness Number ซึ่งเป็นหน่วยวัดขนาดเม็ดทรายหล่อหน่วยหนึ่ง (AFS = American Foundrymen's Society)

เราสามารถนำข้อมูลจากตาราง 2.2 มาสร้างเส้นกราฟสะสมของขนาดเม็ดทราย ได้ ดังในรูป 1.29 เส้นกราฟเช่นนี้แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนของเม็ดทรายที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดเม็ดทรายหนึ่งๆ ซึ่งเราสามารถนำไปใช้กำหนดการกระจายขนาดเม็ดทรายได้



รูป 1.29: Cumulative curve

ตาราง 2.2: ตัวอย่างการคำนวณค่า AFS Grain Fineness Number

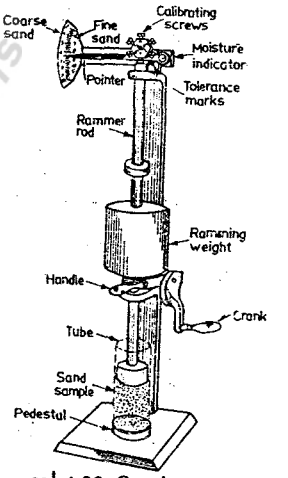
Calculation of A.F.S. Grain Fineness Number for a Typical Mould Sand

Sieve Size		*Sand retained*			
Sieve No.	*(μm)*	*Weight (g)*	*%*	*Multiplier*	*Product*
6	3360	None	0·0	3	0
12	1680	None	0·0	5	0
20	840	None	0·0	10	0
30	590	None	0·0	20	0
40	420	0.2	0·4	30	12
50	297	0.65	1·3	40	52
70	210	1.2	2·4	50	120
100	149	2.25	4·5	70	315
140	105	8.55	17·1	100	1,170
200	74	11.05	22·1	140	3,094
270	53	10.85	21·8	200	4,360
Pan	–	9.35	18·6	300	5,580
	Total	44·10	88·20		15,243
	Clay	5·9	11·8		

$$\text{AFS Grain Fineness No.} = \frac{\text{Total Product}}{\text{\% sand substance}} = \frac{15243}{88.2} = 173$$

8.4 **ชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน** (Standard test specimen):

ชิ้นงานทดสอบมาตรฐานเป็นก้อนทรายทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 mm (2") สูง 50 mm เกิดจากเครื่องมือที่เรียกว่า sand rammer ซึ่งมีลักษณะเป็นตุ้มน้ำหนัก (24 ปอนด์) ถูกปล่อยให้กระแทกบนทรายตัวอย่างในกระบอกบรรจุทรงกระบอกมาตรฐาน ชิ้นงานทดสอบที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติต่างๆของทรายหล่อ เช่น permeability และ strength เป็นต้น



รูป 1.30: Sand rammer

8.5 **การหาความโปร่งอากาศของแบบหล่อทราย** (permeability):

ความโปร่งอากาศหรือ permeability คือ ความยากหรือง่ายที่อากาศจะไหลผ่านแบบหล่อทราย ค่าที่นิยมใช้วัดความโปร่งอากาศคือ **ค่าอัตราความเร็วในการไหลของอากาศ (มิลลิเมตร/ นาที) ผ่านชิ้นงานทดสอบ ภายใต้สภาวะของการทดสอบที่เป็นมาตรฐาน**

ในการทดสอบหา permeability ใช้เครื่องมือ ที่เรียกว่า permeability tester (หรือ permmeter) ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้ (ดูรูป 1.31 ประกอบ):- อากาศ 2000 CC ถูกอัดด้วยน้ำหนักของฝาครอบ (bell jar) ทำให้เกิดความดันของอากาศที่ชิ้นงานทดสอบ(specimen)ขนาด 10 gm/cm^2

วิธีใช้เครื่องมือ จับเวลาที่อากาศไหลผ่านชิ้นงานทดสอบจนหมด แล้วนำมาคำนวณหาค่า permeability number [ปริมาตรของอากาศ (cc) ที่ไหลผ่านหน้าตัดของก้อนทรายหล่อ 1 cm^2 หนา 1 cm ด้วยความดัน 10gm/cm^2] จากสูตรดังนี้

Permeability Number = (v.h)/(p.a.t)

โดยที่ v = air volume = 2000 cc

h = specimen height = 2x2.54 = 5.08 cm

p = air pressure = 10 gm/cm^2

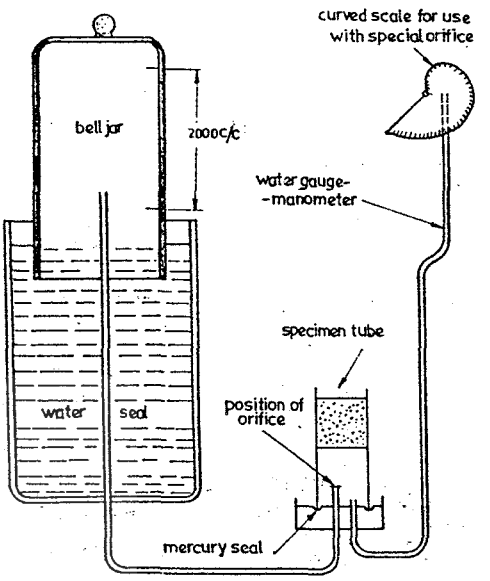
a = cross-sectional area of specimen

= (π/4).(2x2.54)^2 = 20.268

t = time in minutes

Permeability Number = (2000x5.08)/(10x20.268.t)

= 50.128/t



รูป 1.31: Permeability tester

เครื่องมือส่วนใหญ่สามารถแสดงค่า permeability number โดยไม่ต้องคำนวณจากสมการข้างบน

8.6 การหาความแข็งแรงของแบบหล่อทราย (Sand strength tests): ความแข็งแรงของทรายหล่อ(เปียก หรือแห้ง) และความแข็งแรงของไส้แบบทราย วัดด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า Sand Universal Testing Machine (Sand UTM) ค่าความแข็งแรงที่วัดได้แก่ compression strength, tension strength และ shear strength

ตาราง 1.3: ตัวอย่างคุณสมบัติของทรายหล่อ

Typical Properties of Sand Mixture

Casting	*Moisture (%)*	*Green permeability number*	*Compression strength (Psi)*	
			Green	*Dry*
Cast iron				
stove plate	9·0	10	6	20
radiators	7·0	35	5	50
cylinder blocks	6·5	80	7	45
Copper-base				
small	6·0	25	7	40
large	5·5	60	10	60
Aluminium-base				
small	7·0	20	5	20
large	7·0	35	5	30
Magnesium	4·0	80-150	8	100
Steel				
green sand	3·5	180	8	70
dry sand	7·5	120	9	150
Oil sand for cores	2—5	50—200	1/2—3	300—1000

8.7 ความแข็งของแบบหล่อทราย(mold hardness): ความแข็งของแบบหล่อทรายวัดที่ผิวแบบหล่อ เป็นค่าความต้านแรงกดที่กระทำที่ผิวแบบ เครื่องมือที่ใช้ เรียกว่า mold hardness tester ใช้แรงจากสปริงดันหัวกด กดที่ผิวทรายหล่อ ค่าที่อ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง100 (100 แข็งที่สุด)

8.9 การควบคุมคุณภาพทรายหล่อ (sand control): ในตาราง 1.3 แสดงคุณสมบัติของทรายหล่อสำหรับทำแบบหล่อโลหะต่างๆ ช่างหล่อ (foundryman) ที่ดีจะต้องคอยตรวจสอบและปรับแต่งทรายหล่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมอยู่ตลอดเวลา คุณสมบัติ 3 อย่างที่จะต้องทดสอบอยู่เสมอคือ ความชื้น, ความโปร่งอากาศ และ ความแข็งแรงของทรายหล่อ และควรทำการบันทึกผลการทดสอบทุกวัน เพื่อนำไปใช้ในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับชิ้นงานเสีย (casting defectives)

9. **การแข็งตัวของน้ำโลหะ** (solidification of molten metal)

คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อ (castings) ขึ้นอยู่กับ **โครงสร้างทางโลหะวิทยา** (metallugical structure) ซึ่งโครงสร้างชนิดนี้ มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับ ทิศทางหรือรูปแบบของการแข็งตัว (solidification pattern) ของโลหะเหลวแต่ละจุดในโพรงแบบ ที่ได้รับอิทธิพลจาก:- **แบบของชิ้นงาน**(casting design), **ส่วนผสมของโลหะ**(composition) และ **กระบวนการ หรือวิธีการหล่อหลอมโลหะ**(casting process)

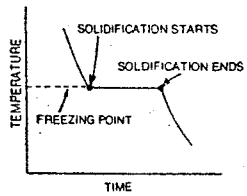
ปัจจัยทั้งสี่นี้จึงมีความสำคัญต่อคุณภาพของชิ้นงานหล่อ ความเข้าในความสัมพันธ์ของปัจจัยดังกล่าว จะนำไปสู่หลักเกณฑ์ หรือแนวปฏิบัติสำหรับหลีกเลี่ยงหรือลดความเสียหายในการหล่อโลหะ

9.1 **ธรรมชาติของการแข็งตัวของโลหะ :** โลหะทั้งหลายแข็งตัวโดยเริ่มจากการเกิดผลึกเล็กๆ ที่เรียกว่า 'nuclei' ขึ้นในโลหะเหลว จากนั้นก็จะเกิดการเติบโตของ nuclei ออกไปใน 3 ทิศทางเป็น dendrite การเติบโตเช่นนี้จะเกิดขึ้นต่อไปในขณะอุณหภูมิลดต่ำลง จนในที่สุดแขนของ dendrite ที่ยื่นออกมาจะไปชนกับแขน dendrite ที่เกิดจาก nuclei อื่นๆ ที่อยู่โดยรอบ การแข็งตัวจะสิ้นสุด และ dendrite จะกลายเป็น grain ซึ่งแต่ละgrain จะมีการเรียงตัวของอะตอมที่แตกต่างกัน

เราจะพิจารณาการแข็งตัวของโลหะเหลวเป็น 2 กรณีคือ การแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์(pure metals) และ การแข็งตัวของโลหะผสม (alloys) ดังนี้:-

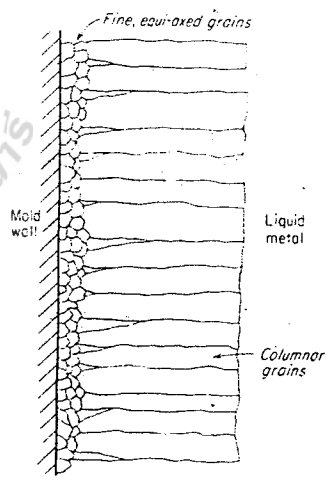
- **การแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์**(pure metals):

โลหะบริสุทธิ์แข็งตัวที่อุณหภูมิคงที่ (รูป 1.32) เมื่อโลหะเหลวถูกเทลงสู่แบบหล่อ(mold) จะกระทบกับผิวของโพรงแบบซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้เกิด nuclei ขึ้นอย่างรวดเร็วบริเวณใกล้กับผิวโพรงแบบ (**homogeneous nucleation** หรือ self-nucleation) แล้วจึงเกิดการเจริญเติบโตของ nuclei เป็น grain ละเอียด (fine equi-axed grains) เรามักเรียกว่าโครงสร้างเช่นนี้ว่า **chilled structure**



รูป 1.32: Sigle temperature freezing of pure metal

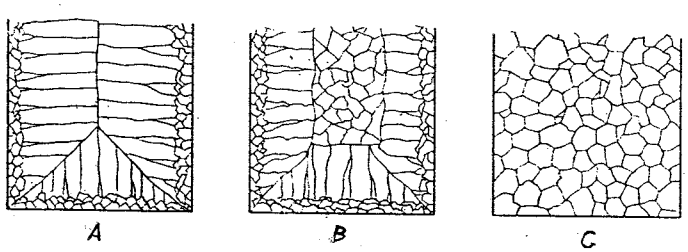
ในขณะที่เกิด grain ละเอียดที่ผิวโพรงแบบ โลหะที่แข็งตัวก่อนจะคายความร้อนแผ่งออกมา ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น การเกิด nuclei จะหยุดลง แต่การเติบโตของ grain ที่เกิดขึ้นมาก่อนยังคงดำเนินต่อไปภายได้การควบคุมของการถ่ายเทความร้อนออกจากโลหะเหลว การเติบโตของ grain ตอนนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน ดังนั้น grain จึงเติบโตเข้าสู่กึ่งกลางของโพรงแบบหล่อ ผลก็คือเกิดเป็น **columnar grains** ต่อจาก chilled structure ที่ผิวชิ้นงานหล่อ (รูป1.33)



รูป 1.33: Columnar grains

ในรูป 1.34 แสดงโครงสร้างผลึก ของโลหะบริสุทธิ์(A) เปรียบเทียบกับ solid solution alloy (B) และ กรณีของการเติมสารให้เกิด nucleation (**heterogeneous nucleation**) (C)

รูป 1.33: Crystal structure



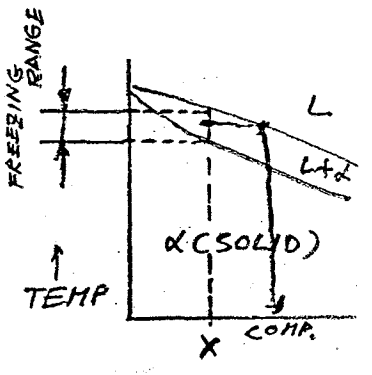
- **การแข็งตัวของโลหะผสม** (Solidification of alloys): มีรูปแบบ(pattern)ของการแข็งตัวที่ขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิของการแข็งตัว(freezing range) ถ้าหากว่าช่วงอุณหภูมินี้สั้น (ประมาณ 5-10°C) โครงสร้างผลึกจะมีลักษณะคล้ายกับโลหะบริสุทธิ์ หรือ eutectic alloys (รูป 1.34) ส่วนโลหะผสมที่มี freezing range กว้าง (รูป 1.35) เช่น โลหะผสมcopper-nickel (มี Nickel 30%) จะไม่แสดงรอยต่อระหว่างโลหะแข็งและโลหะเหลวแยกจากกันอย่างชัดเจน แต่จะเป็นผลึกของโลหะแข็งผสมกับโลหะเหลว (mushy stage) ผลที่ตามมาคือ :-

(1) เกิดความแตกต่างในส่วนผสมของโลหะผสมที่แข็งตัวก่อน นั่นคือโลหะที่ผิวชิ้นงานหล่อ จะมีส่วนผสมต่างจากโลหะที่อยู่ลึกลงไปในชิ้นงาน (ingot type of segregation)

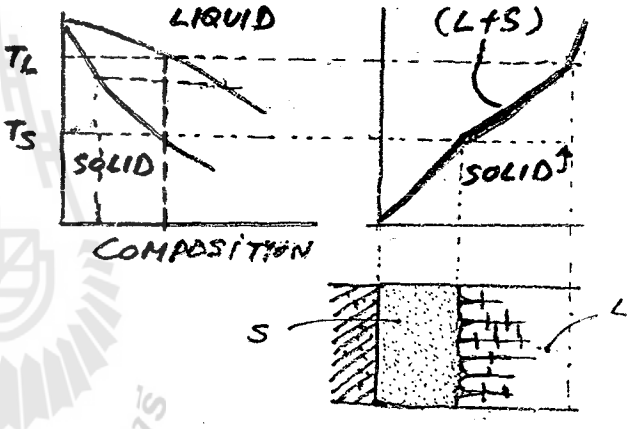
(2) เกิดความแตกต่างในส่วนของ grain เรียกว่า coring (microscopic segregation)

(3) เมื่อน้ำโลหะที่ถูกกักอยู่ในระหว่างแขนของ dendrite แข็งตัว จะทำให้เกิดเป็นรูพรุนเล็กๆกระจายอยู่ในชิ้นงาน (micro-porosity)

(4) แขนงของ dendriteที่ยื่นเข้าไปในน้ำโลหะ ขวางการการไหลของน้ำโลหะทำให้ fluidity ของน้ำโลหะลดลง



รูป 1.34: Short freezing range



รูป 1.35: Long freezing range

9.2 **ความสามารถในการไหลของโลหะเหลว** (fluidity):

วิธีวัดความสามารถในการไหลของน้ำโลหะในโพรงแบบใช้วิธีเทน้ำโลหะลงในโพรงแบบมาตรฐานที่เรียกว่า fluid spiral น้ำโลหะที่มี fluidity สูง จะไหลได้ไกลใน fluid spiral (รูป1.36)

สิ่งที่มีอิทธิพลต่อ fluidity ของน้ำโลหะได้แก่ :-

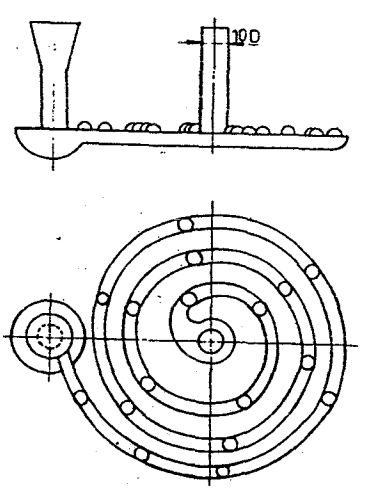
(1) ส่วนผสมของโลหะ (composition);

(2) วัสดุที่เป็นแบบหล่อ (mold material);

(3) อุณหภูมิเทที่สูงกว่าจุดหลอมเหลว (degrees of superheating)

(4) ความเร็วในการเทน้ำโลหะลงในแบบ (rate of pouring)

(5) การถ่ายเทความร้อน (heat transfer)

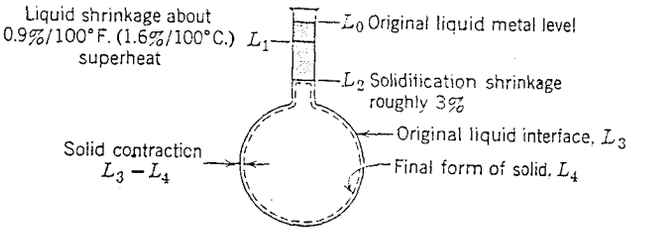


รูป 1.36: Fluid spiral

9.3 **การหดตัวของชิ้นงานหล่อ** (Volumetric shrinkage in castings)

ในขณะที่โลหะหรือโลหะผสมเย็นตัวจากอุณหภูมิเทจนถึงอุณหภูมิห้อง จะเกิดการหดตัว 3 ขั้นตอนดังนี้:-

(1) Liquid contraction: เป็นการหดตัวที่เกิดจากโลหะเหลวมีอุณหภูมิลดต่ำลงมาจนถึงจุดแข็งตัว ในรูป 1.37 แสดง liquid contraction คือส่วนของโลหะเหลวที่หดตัวจาก L_0 ถึง L_1



รูป 1.37: ภาพแสดงการหดตัวของชิ้นงาน

(2) Solidification contraction: เป็นการหดตัวที่เกิดขึ้นในขณะที่โลหะกำลังแข็งตัว สำหรับโลหะบริสุทธิ์ การแข็งตัวเกิดที่อุณหภูมิคงที่ ส่วนโลหะผสม(alloy) เกิดขึ้นที่ช่วงหนึ่งของอุณหภูมิ ในรูป 1.37 คือการหดตัวจากระดับ L_1 ถึง L_2

(3) Solid contraction: เกิดขึ้นในสภาวะของแข็ง ในขณะที่อุณหภูมิของชิ้นงานลดต่ำลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ปริมาตรที่เกิดจากการหดตัวคือผลต่างที่เกิดจาก L_3- L_4

เพื่อให้สามารถมองเห็นความแตกต่างของการหดตัวทั้ง 3 ชนิดได้ชัดเจน ในที่นี้ได้สมมุติว่าขณะที่เป็นของเหลว โลหะจะไม่แข็งตัวติดโพรงแบบ การหดตัว 2 ชนิดแรกจึงเกี่ยวข้องกับการที่ระดับโลหะเหลวลดต่ำลง ซึ่งถ้าหากไม่มีการชดเชยการหดตัวของโลหะในส่วนนี้แล้ว น้ำโลหะจะไม่เต็มโพรงแบบ และเกิดตำหนิ ในชิ้นงานหล่อ ดังนั้นจึงต้องใช้ riser (หรือ รูล้น) ทำหน้าที่คอยป้อนน้ำโลหะชดเชยการหดตัว 2 ชนิดนี้ สำหรับการชดเชยการหดตัวในสภาวะของแข็ง ใช้วิธีทำ pattern ให้มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานจริง (ได้กล่าวแล้วในข้อ 5)

โลหะเหลวที่เป็นโลหะบริสุทธิ์หรือเกือบบริสุทธิ์ เกิดการแข็งตัวเป็นเปลือกแข็งอย่างรวดเร็วเมื่อกระทบกับผนังโพรงแบบซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า จากนั้นเปลือกแข็งที่เกิดขึ้นจะค่อยๆขยายความหนาเข้าสู่ภายในโพรงแบบ ถ้าหากผนังของโพรงแบบเป็นผิวเรียบและเป็นระนาบ ความหนาของเปลือกแข็งที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการแข็งตัว ดังนี้:- $t \propto \sqrt{T}$

โดยที่ t = ความหนาของเปลือกแข็ง; และ T = เวลาหลังจากเทลงแบบหล่อ หรือ

$t = k\sqrt{T}$; ซึ่ง k คือตัวคงที่ ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุทำแบบ และความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของแบบหล่อ

เราสามารถประมาณเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวเป็นของแข็งทั้งหมด (complete solidification)ได้จาก Chvorinov's Rule ดังนี้:- Solidification time = K_2(volume/ surface area)^2

10. **โลหะสำหรับทำชิ้นงานหล่อ** (Casting metals)

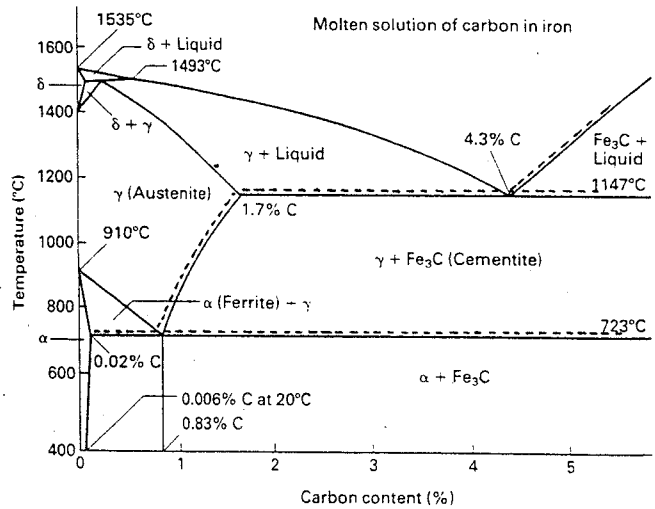
10.1 **เหล็กหล่อ** (cast iron): เหล็กหล่อเป็น ferrous metals ที่นิยมให้ทำชิ้นงานหล่อมากที่สุด เหล็กหล่อคือโลหะผสมของเหล็ก ซึ่งมีธาตุอื่นผสมอยู่คือ carbon, silicon, phosphorus, manganese, และ sulphur คุณสมบัติของเหล็กหล่อขึ้นอยู่กับส่วนผสมของ carbon และ silicon เป็นสำคัญ

ตามปกติเหล็กหล่อจะมี carbon ผสมอยู่ประมาณ 2-5 % ถ้าปริมาณ carbon ในโลหะผสมมีค่าต่ำกว่า 2 % จัดว่าเป็น " steel" เหล็กเหนียว (หรือ เหล็กกล้า).

ในรูป 1.38 เป็น Fe-C phase diagram ซึ่งแสดง ปฏิกิริยาระหว่าง carbon กับ เหล็ก (iron) แผนภาพเช่นนี้คล้ายกับ Fe-Fe_3C diagram มีส่วนแตกต่างกันคือ Fe-C ใช้เส้นประแสดงการจุดแยกตัวของ graphite

อัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกันทำให้คุณสมบัติของเหล็กหล่อไม่เหมือนกัน และเกิดเป็นเหล็กหล่อชนิดต่างๆดังนี้:- พิจารณาการแข็งตัวของเหล็กหล่อที่มีส่วนผสม 3%C เย็นตัวจากสภาวะของเหลว

(1) **อัตราการเย็นตัวสูง** (rapid rate): เช่นการเย็นตัวของชิ้นงานบางๆในแบบหล่อทราย ในกรณีนี้ เมื่ออุณหภูมิของโลหะผสมเหลวลดลงมาถึงเส้น liquidus จะเริ่มเกิด dendrite ของ austenite (γ - iron) และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงมาถึง eutectic temperature ของเหลวจะกลายเป็น โครงสร้างสลับกันระหว่าง cementite(Fe_3C) กับ austenite เรียกว่า **ledebufite** หลังจากนี้ Fe_3C จะเติบโตเพราะ carbon แยกตัวออกมาจาก austenite ทำให้ส่วนผสมของ austenite เปลี่ยนไปตามเส้น on (รูป 1.39) และในที่สุดที่อุณหภูมิ eutectoid ส่วนของ austenite จะกลายเป็น โครงสร้างจุลภาพสลับกันระหว่าง cementite กับ ferrite(α - iron) เรียกว่า pearlite

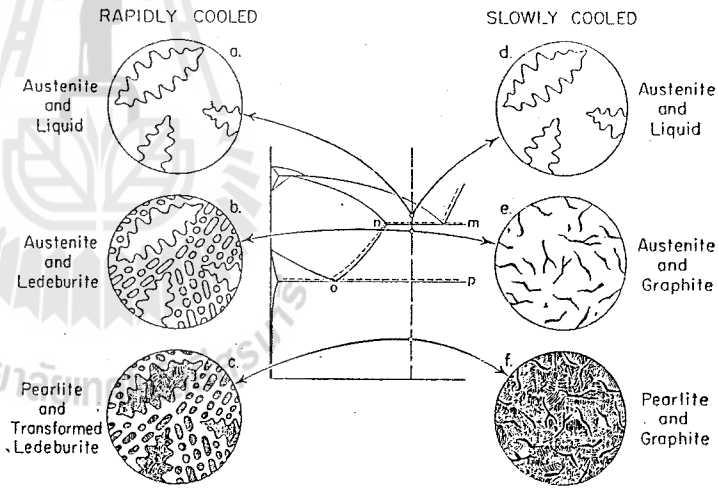


รูป 1.38: Iron-carbon equilibrium diagram

เนื่องจากรอยแตกหักของเหล็กหล่อชนิดนี้มีสีขาว ดังนั้นจึงเรียกว่าเหล็กหล่อขาว (white cast iron)

(2) **อัตราการเย็นตัวต่ำ** (slow rate): เมื่ออุณหภูมิของโลหะต่ำว่า liquidus ผลึกของ austenite จะเกิดขึ้นก่อน จากนั้นจะเกิดโครงสร้าง austenite สลับกับ graphite (ตามเส้นประ nm) หลังจากนี้ carbon จะแยกตัวออกมาจาก austenite เรื่อยๆ และเมื่อถึง eutectoid temperature เฟสของ austenite จะกลายเป็นโครงสร้าง pearlite

รอยหักของเหล็กหล่อมีสีเทา จึงเรียกว่าเหล็กหล่อเทา (gray cast iron)



รูป 1.39: Microstructures of white iron and gray iron

(3) **อัตราการเย็นตัวต่ำมาก**(very slow rate): มีขั้นตอนในการเปลี่ยนแปลงเฟสคล้ายกับในกรณีของ เหล็กหล่อเทามาก มีส่วนที่ต่างคือ หลังจากที่เย็นตัวลงจนอุณหภูมิต่ำกว่า eutectoid temperature แล้ว โครงสร้างจุลภาพที่ได้จะเป็น ferrite กับ graphite ทั้งนี้เพราะว่าการเย็นตัวเกิดขึ้นช้ามากพอที่ carbon ที่แยกตัวออกมาจาก austenite แล้วไปรวมกับ graphite flakeที่เกิดก่อนหน้านั้น ทำให้เกิดเป็น "ferritic gray iron" แต่ในทางปฏิบัติ เหล็กหล่อชนิดนี้เกิดขึ้นได้ยาก ส่วนใหญ่จะเกิดเป็น เหล็กหล่อเทา เพราะอัตราการเย็นตัวไม่ต่ำมากพอที่จะเกิด

ในชิ้นงานบางส่วนจะมีโครงสร้างของเหล็กหล่อขาวผสมกับโครงสร้างของเหล็กหล่อเทา เราเรียกเหล็กหล่อแบบนี้ว่า "mottled iron"

นอกจาก graphite จะมีรูปร่างเป็นแผ่น(flake)แล้ว ยังมีรูปรางอื่นในเหล็กหล่อ ทำให้คุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อดีกว่าเหล็กหล่อเทา ตัวอย่างเช่น

- Malleable cast iron: มีgraphite รวมกันเป็นก้อนๆ (nodules) ทำให้เหล็กหล่อชนิดนี้มีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นสูง
- Ductile cast iron (SG iron): เกิดจากการหล่อหลอมเหล็กหล่อ แล้วบังคับให้ graphite มีรูปร่างกลม (spheroidal graphie) ด้วยการเติมธาตุบางอย่างลงไปในน้ำโลหะก่อนเทลงแบบ ธาตุที่ใช้เติมได้แก่ magnesium หรือ cerium เหล็กหล่อเอสจี (spheroidal graphite cast iron –SG iron) มีความแข็งแรงสูงและทนต่อแรงกระแทกได้ดี

10.2 **เหล็กกล้า (steels):** มีcarbon ผสมอยู่ไม่เกิน 2%; ถ้ามี carbon ผสมอยู่เท่ากับ 0.8%, เรียกว่า eutectoid steel; ต่ำกว่า, เรียกว่า hypo-eutectoid steel; และสูงกว่า, เรียกว่า hyper-eutectoid steel.

เหล็กกล้าคาร์บอน (plain-carbon steels) หมายถึงเหล็กล้าที่มี carbon เป็นส่วนผสมหลัก คุณสมบัติทางกลขึ้นอยู่กับปริมาณ carbon ที่ผสม โดยทั่วไป มีการแบ่งประเภทของเหล็กกล้าชนิดนี้ออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆคือ:-

- Low-carbon steel: มี carbon ผสมอยู่ไม่เกิน 0.3%;
- Medium-carbon steel: มี carbon ผสมอยู่ประมาณ 0.3% ถึง 0.5%;
- Low-carbon steel: มี carbon ผสมอยู่มากกว่า 0.5%.

ตามปกติเหล็กกล้าที่ใช้หล่อมักเป็นเหล็กกล้าที่มี carbon ผสมอยู่ในเกณฑ์ของ medium carbon steel

ในตาราง 1.4 แสดงการบอก specifications ของเหล็กกล้าตามมาตรฐานอเมริกัน (American Iron and Steel Institute - AISI และ Society of Automobile Engineers – SAE) ส่วนในตาราง 1.5 เปรียบเทียบ spec. ของเหล็กกล้าตามระบบต่างๆ

ตาราง1.4: American specification

American specification

This designation has been standardised by Society of Automobile Engineers (SAE) and American Iron and Steel Institute (AISI). A 2 or 3 digit number signifies the composition range of alloying elements followed by a 2-digit number referring to average carbon content in hundredths of a per cent. Some of the most generally used steels are as follows:

10XX — Plain carbon
13XX — Manganese 1.75
25XX — Nickel 5.0
31XX — Nickel 1.25; chromium 0.65
40XX — Molybdenum 0.25
41XX — Chromium 0.50 or 0.95; molybdenum 0.12 or 0.20
43XX — Nickel 1.80; chromium 0.50 or 0.80; molybdenum 0.25
44XX — Manganese 0.80; molybdenum 0.40
46XX — Nickel 1.85; molybdenum 0.25
51XX — Chromium 0.80, 0.88, 0.93, 0.95 or 1.00
61XX — Chromium 0.60, 0.80 or 0.95; vanadium 0.12 or 0.10 min or 0.15 min
81XX — Nickel 0.30, chromium 0.40; molybdenum 0.12
92XX — Manganese 0.85; silicon 2.00
93XX — Nickel 3.25; chromium 1.20; molybdenum 0.12

ตาราง 1.5: เปรียบเทียบ specifications ของ steel ตามมาตรฐานต่างๆ

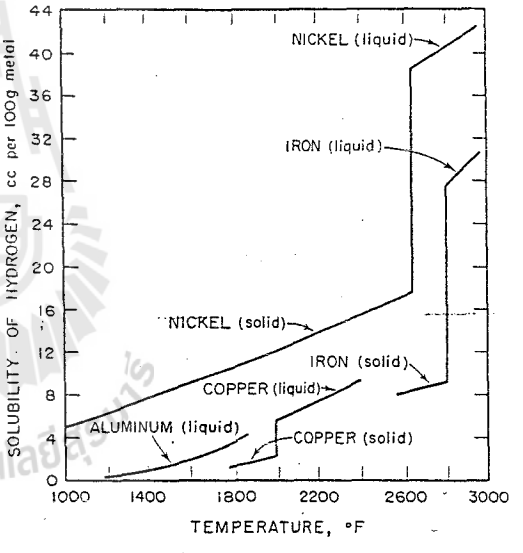
Usual description	*IS Designation*	*British (1955) Designation*	*American Designation*	*German Designation*
Mild steel	C20	En 3A	AISI 1020	C22
Medium carbon steel	C35	En 5	AISI 1035	C35
	C45	En 8D	AISI 1045	Ck45
	C55	En 9	AISI 1055	C55
	C60	En 43D	AISI 1060	C60
	C75	En 42	AISI 1078	C75
High carbon steel	C100	En 44	AISI 1095	
Low alloy steel	40Cr90Mo15	En 19c	AISI 4142	42CrMo4
	40Ni2Cr1Mo25	En 24	AISI 4340	36CrNiMo4
	30Ni4Cr1	En 30A	—	35NiCr18
	55Si2Mn90	En 45	AISI 9260	
	50Cr1V23	En 47	AISI 6150	50CrV4
	17Mn1Cr95	En 207	AISI 5115	16MnCr5
	13Ni3Cr80	En 36	AISI 9310	14NiCr14
		En 111	AISI 3120	
		En 18 A	AISI 5140	41Cr4

10.3 Non-ferrous casting alloys: โลหะผสม non-ferrous ที่นิยมใช้กับกระบวนการหล่อหลอมโลหะ มีอยู่หลายชนิด และ สามารถกับกระบวนการหล่อได้หลายอย่าง ตั้งแต่ การหล่อด้วยแบบหล่อทราย จนถึงการหล่อด้วยแบบหล่อถาวร เช่น die casting โลหะผสมเหล่านี้ได้แก่ ทองแดง และโลหะผสมของทองแดง, อลูมิเนียม และโลหะผสม อลูมิเนียม เป็นต้น

11. แก๊สในชิ้นงานหล่อ

ในสภาวะของเหลว โลหะสามารถละลายแก๊สได้ดีกว่าในสภาวะของแข็ง ดังนั้นเมื่อโลหะแข็งตัว แก๊สจะถูกขับออกมาและตกค้างอยู่ในชิ้นงานที่แข็งตัวแล้วในรูปของรูอากาศขนาดต่างๆ เช่น blow holes, pinholes, และ micro-porosity เป็นต้น

ไฮโดรเจน (hydrogen) เป็นธาตุที่สามารถละลายในโลหะส่วนใหญ่ได้ และทำให้เกิดผลเสียต่อชิ้นงานหล่อได้มาก จึงได้มีการศึกษาพฤติกรรมของไฮโดรเจน ซึ่ง-ความสามารถในการละลายไฮโดรเจนของโลหะหลาย



รูป 1.40: ความสามารถในการละลายไฮโดรเจนของโลหะต่างๆ

อย่างแสดงได้ดังรูป 1.40 จะเห็นได้ความสามารถในการละลายไฮโดรเจนจะลดลงตามอุณหภูมิ ในกรณีของเหล็ก ความสามารถในการละลายจะลดลงทันที ถ้าโลหะผสมมีอุณหภูมิต่ำกว่าว่า 2800°F

วิธีป้องกันการดูดซึมแก๊สของน้ำโลหะ:-

(1) หลอมโลหะภายใต้บรรยากาศควบคุม เช่น หลอมใน vacuum;

(2) ขจัดความชื้นออกไปจากทุกส่วนที่สัมผัสน้ำโลหะ;

(3) หลอมและเทน้ำโลหะที่อุณหภูมิต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้;

(4) คน(stir)น้ำโลหะให้น้อยที่สุด

12. **รูล้น** (riser)

รูล้นหรือ riser ทำหน้าที่ป้อนน้ำโลหะเข้าไปในโพรงแบบเพื่อชดเชยการหดตัวของน้ำโลหะ ในรูป 1.41 แสดงการเกิดโพรงอากาศภายในชิ้นงานหล่อสมมุติ เมื่อไม่มีการป้อนน้ำโลหะไปชดเชยการหดตัว

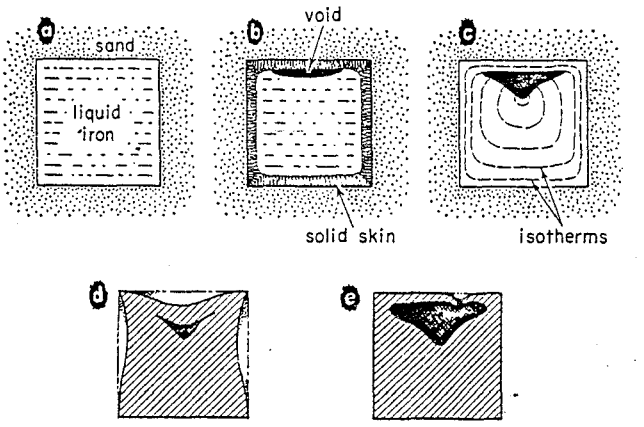
ในรูป 1.42 ผลของการใช้ riser และ chill ทำให้โพรงที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะไปอยู่ในตำแหน่งที่สามารถตัดออกไปจากชิ้นงานได้ภายหลัง

การออกแบบ riser จะต้องคำนึงถึงปัจจัย 2 อย่างคือ

- โลหะเหลวใน riser จะต้องแข็งตัวหลังสุด นั่นคือต้องทำให้เกิดการแข็งตัวอย่างมีทิศทาง(directional solidification)เข้าหา riser
- ปริมาตรของ riser จะต้องมากเพียงพอที่จะชดเชยการหดตัวของน้ำโลหะในโพรงแบบ

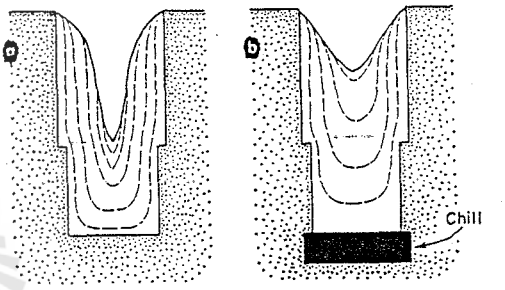
โดยทั่วไป มีการแบ่งประเภทของ riser ออกเป็น

- ❑ Top riser: มีปลายเปิดสู่บรรยากาศภายนอก
- ❑ Blind riser: อยู่ภายในแบบหล่อ
- ❑ Internal riser : อยู่ตรงกลางชิ้นงาน



Solidification shrinkage of an iron cube. (*a*) Initial liquid metal. (*b*) Solid skin and formation of shrinkage void. (*c*) Internal shrinkage. (*d*) Internal shrinkage plus dishing. (*e*) Surface puncture.

รูป 1.41: แสดงการหดตัวของน้ำโลหะในโพรงแบบสมมุติ



รูป 1.42: การทำหน้าที่ของ riser และ chill

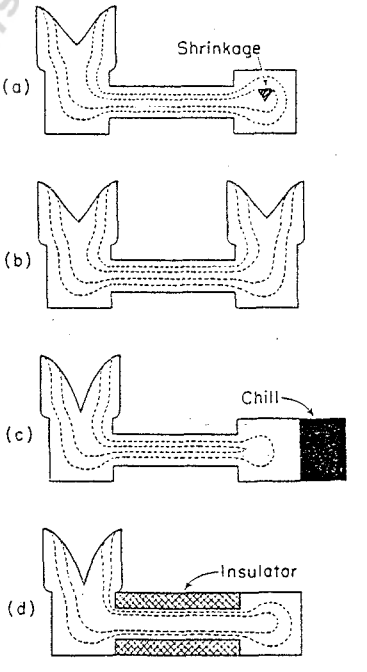
13. **การแข็งตัวอย่างมีทิศทาง** (directional solidification):

การแข็งตัวอย่างมีทิศทางของโลหะ หมายถึงการบังคับให้น้ำโลหะเกิดการแข็งตัวในส่วนที่บางสุดก่อน แล้วเคลื่อนที่ไปยังส่วนที่หนากว่าเข้าหา riser เพื่อให้ตำหนิ(defects) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหดตัวของโลหะเกิดขึ้นใน riser

ตัวอย่างเช่น ในรูป 1.43 (a) ชิ้นงานมีส่วนหนาอยู่ 2 ส่วน แยกจากกัน และมี riser อยู่ด้านเดียว ผลที่เกิดขึ้นก็คือ จะเกิดรูอากาศ ในส่วนหนาที่ไม่มี riser เพราะโลหะตรงกลางของชิ้นงานเกิดการแข็งตัวก่อน ขวางทางไหลป้อนน้ำโลหะจาก riser วิธีแก้คือ

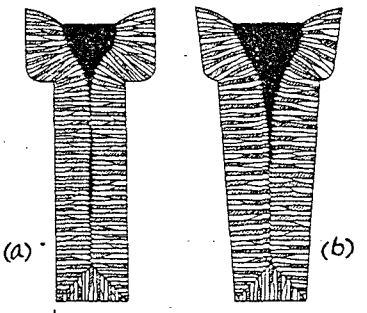
- ➢ ใส่ riser ทั้งสองด้าน
- ➢ ใส่ chill เพื่อให้โลหะเหลวที่สัมผัสกับ chill แข็งตัวก่อน
- ➢ ใส่ฉนวน(insulator)ในส่วนที่บางเพื่อให้แข็งตัวช้า.

รูหรือโพรงที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะ อาจเกิดขึ้นภายในชิ้นงานที่มีหน้าตัดสม่ำเสมอกันก็ได้ ดังในรูป 1.44(a) เราเรียกโพรงลักษณะนี้ว่า "bridging" ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วย



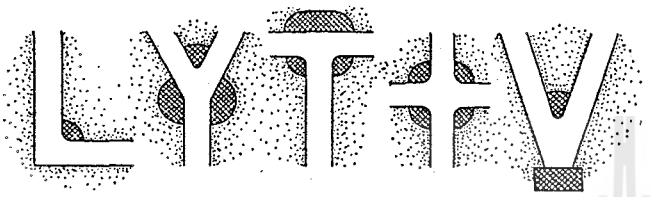
รูป 1.43: การบังคับการแข็งตัว

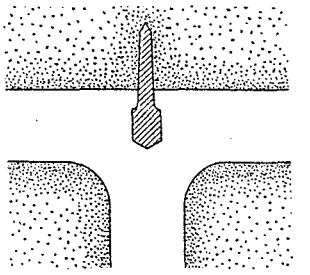
การออกแบบชิ้นงานให้มีความเรียว ดังในรูป(b) ซึ่งเรียกว่า "padding" หรือ "tapering"



รูป 1.44: Bridging และ padding

Chill และ chaplet: Chill เป็นโลหะที่ผังในแบบทราย external chill) หรือผังในโพรงแบบ (internal chill) อย่างหลังหลอมไปกับน้ำโลหะ, อย่างแรกไม่หลอม ส่วน chaplet ทำหน้าที่หนุนไส้แบบ(core) อุปกรณ์เหล่านี้ทำให้น้ำโลหะที่สัมผัสเกิดการแข็งตัวก่อนส่วนอื่น (รูป 1.45)

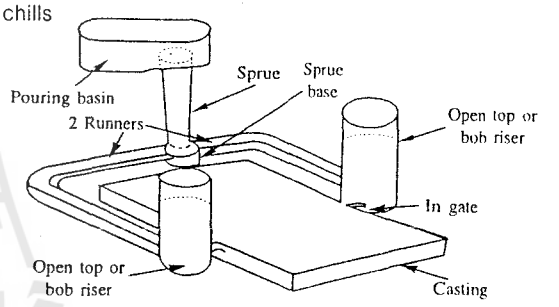

(a) External chills


(b) Internal chill

รูป 1.45: External and internal chills

15. Gating system

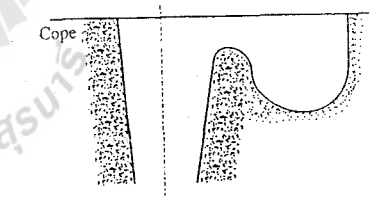
Gating system หมายถึงส่วนต่างๆของโพรงในแบบหล่อที่เกี่ยวข้องกับการไหลของน้ำโลหะลงสู่โพรงแบบ(mold cavity) ดังในรูป 1.46 ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้



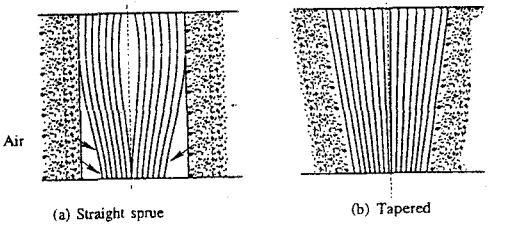
รูป 1.46: Gating system

- Pouring basin: ทำหน้าที่รับน้ำโลหะจากเบ้าเท ในบางครั้งถูกออกแบบให้กัก slag ด้วย (รูป1.47)
- Sprue: มีลักษณะเป็นรูเรียว(taper) เพื่อให้อัตราการไหลของน้ำโลหะตอนบนและตอนล่างเท่าๆกัน ถ้าหากว่ารู เท หรือ sprueเป็นรูทรงกระบอก ตอนล่างของรู จะมีน้ำโลหะไม่เต็มรู ผลก็คือมีบริเวณช่องว่างใน sprue ที่มีความดันอากาศต่ำ จึงดูดอากาศที่ในแบบทรายเข้าไปผสมกับน้ำโลหะได้ (รูป1.48)

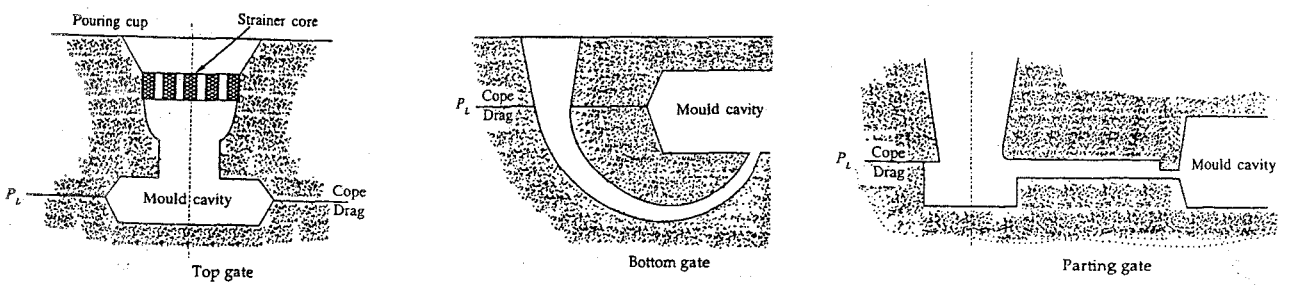
  Sprue base: ลดแรงกระแทกของน้ำโลหะ
- Runner: ทางวิ่งของน้ำโลหะลงสู่แบบ
- Gates: มีหลายแบบ เช่น top gate, bottom gate, Parting gate, และ step gate
- Riser: (ได้กล่าวแล้ว)



รูป 1.47: Pouring basin



รูป 1.48: Sprues



รูป 1.49: Gate ต่างๆ

15. **ตำหนิในชิ้นงานหล่อ** (casting defects)

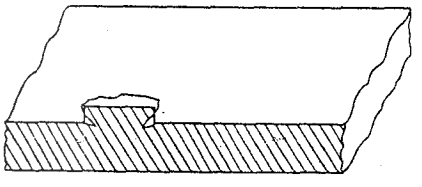
(1) **ตำหนิที่เกิดจากแก๊ส** (gas defects): เช่น

- **Blow holes และ open holes:** เป็นโพรงอากาศภายใต้ผิวงานหล่อ(blow holes) หรืออยู่บนผิวงานหล่อ (open holes) เกิดจากความชื้นในแบบหล่อ หรือในไส้แบบ
- **Air inclusions:** เกิดจากการที่อากาศจากบรรยากาศเข้าไปผสมกับน้ำโลหะ แล้วตกค้างอยู่ภายหลังจากการแข็งตัวของโลหะ สาเหตุหลักคือ ใช้อุณหภูมิเทสูงเกินไป และออกแบบ gating system ไม่ดี
- **Pin holes และ porosity:** เกิดจากไฮโดรเจนผสมกับน้ำโลหะ

(2) **ตำหนิที่เกิดจากการหดตัวของโลหะในระหว่างการแข็งตัว** ส่วนใหญ่มักเกิดจากการออกแบบชิ้นงานไม่เหมาะสมทำให้ไม่สามารถบังคับทิศทางการแข็งตัวได้ และเกิดเป็นโพรงอากาศในชิ้นงานในที่สุด

(3) **ตำหนิที่เกิดจากวัสดุทำแบบหล่อ:**

- **Cuts และ washes:** มีลักษณะเป็นผิวหยาบ หรือมีเนื้อโลหะพอกอยู่มากเกินไป เกิดจากการที่ผิวของโพรงแบบถูกน้ำโลหะไหลชะจนผิวบางส่วนหลุดออกไป
- **Metal penetration:** ทำให้ผิวงานหยาบ เนื่องจากน้ำโลหะแทรกในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่ผิวโพรงแบบ
- **Fusion:** เกิดจากการหลอมของเม็ดทรายกับน้ำโลหะที่ผิวโพรงแบบ ทำให้ชิ้นงานมีผิวมันวาว



รูป 1.50: Rat tail

- **Run out:** น้ำโลหะไหลออกจากโพรงแบบ
- **Rat tail และ buckling:** เกิดจากการขยายตัวของเม็ดทรายในโพรงแบบ (รูป 1.50)

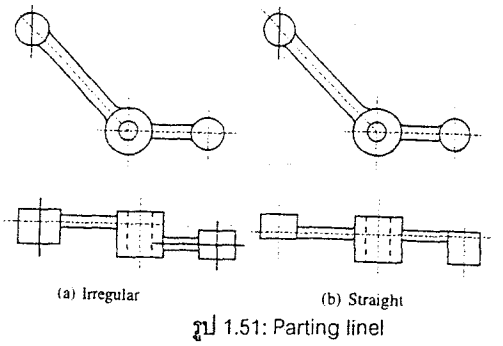
(4) **ตำหนิที่เกิดจากการเทน้ำโลหะ** :

- **Mis-run และ cold shuts:** mis-run คือน้ำโลหะไหลไม่เต็มโพรงแบบ ส่วน cold shut คือ ปลายที่น้ำโลหะไหลมาชนกัน ไม่ต่อติดเป็นเนื้อเดียวกัน ตำหนิเหล่านี้เกิดจาก fluidity ของน้ำโลหะไม่ดี
- **Slag inclusion:** คือ slag หรือ oxide หรือสิ่งเจือปนอื่นๆที่ตกค้างอยู่ในเนื้อโลหะ เกิดจากการกัน slag ออกจากน้ำโลหะไม่หมด
- **Hot tear:** เป็นรอยแตกของชิ้นงานตรงบริเวณที่กำลังแข็งตัว เนื่องจากการหดตัวของโลหะส่วนที่แข็งตัวก่อนทำให้เกิดแรงดึงในส่วนที่กำลังแข็งตัวซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ ผลก็คือเกิดรอยแตก สาเหตุเนื่องจาก ตัวประสานในแบบทราย หรือในไส้แบบ มีความสามารถในการยุบตัวต่ำ
- **Hot spot:** เป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่นๆของชิ้นงาน โลหะแข็งตัวล่าสุด และเกิดเป็นโพรงอากาศ

16. **หลักเกณฑ์การออกแบบชิ้นงานหล่อด้วยแบบหล่อทราย** มีจุดที่ต้องคำนึงถึงคือ:-

(1) ออกแบบเพื่อให้ง่ายต่อการทำแบบหล่อ (molding):

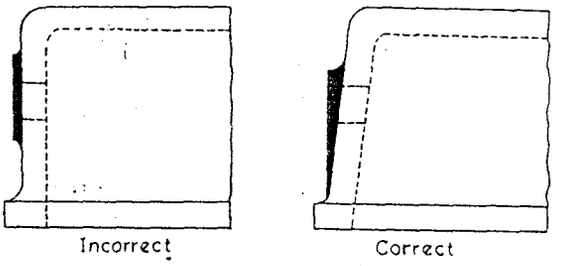
- จัด parting line ให้เป็นระนาบ (รูป1.51)
- ให้สามารถถอดแบบได้ง่าย (รูป 1.52)
- ทำไส้แบบได้ง่าย (รูป 1.53)



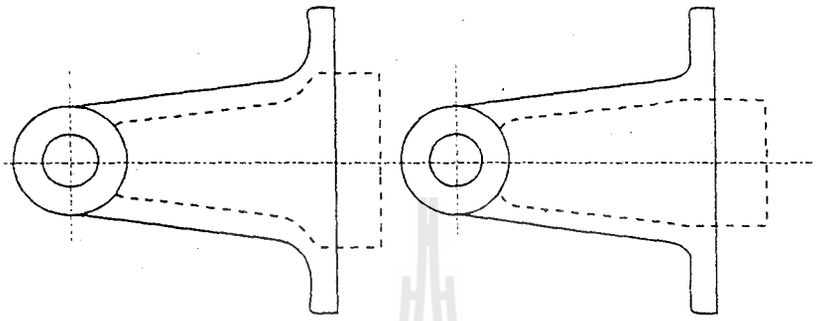
รูป 1.51: Parting linel

(2) ออกแบบเพื่อลดตำหนิ (defects): เช่น

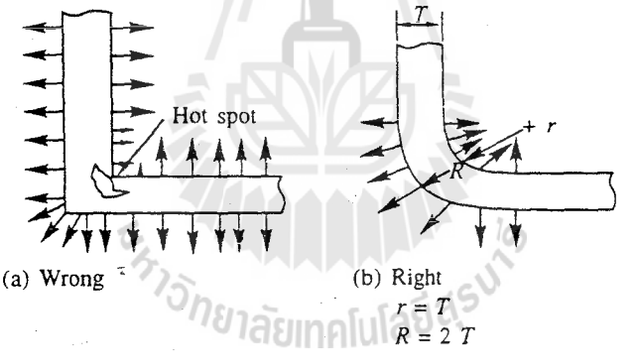
- ตำหนิจากการหดตัว เช่นลด hot spot (รูป 1.54)
- ลดการบิดงอของชิ้นงาน โดยพยายามให้ชิ้นงานมีความหนาที่ใกล้เคียงกัน



รูป 1.52: Eliminate undercut



รูป 1.53: Simple core shape



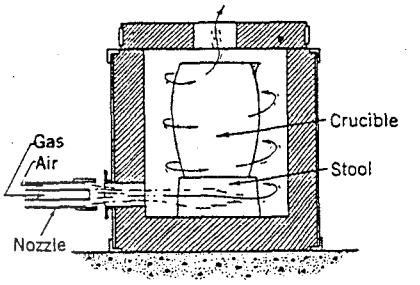
รูป 1.54: Re-entrance angle at junctions

17. **เตาหล่อหลอมโลหะ** (melting furnace)

เตาที่ใช้สำหรับหลอมโลหะมีหลายแบบ การเลือกใช้เตาขึ้นอยู่กับ : (1) ราคาเตา, (2) ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง และการบำรุงรักษา, (3) ค่าใช้จ่ายในการใช้เตา, (4) ชนิดของเชื้อเพลิงที่หาได้, (5) ความเร็วในการหล่อหลอมโลหะ, (6) ความสะอาดและระดับเสียง, (7) ความมาก-น้อยของการควบคุม(ให้บริสุทธิ์), (8) ส่วนผสมและอุณหภูมิของการหลอมโลหะ, และ (9) เหตุผลส่วนตัวและคำแนะนำของตัวแทนจำหน่าย

เตาหล่อที่ใช้สำหรับหล่อโลหะได้แก่

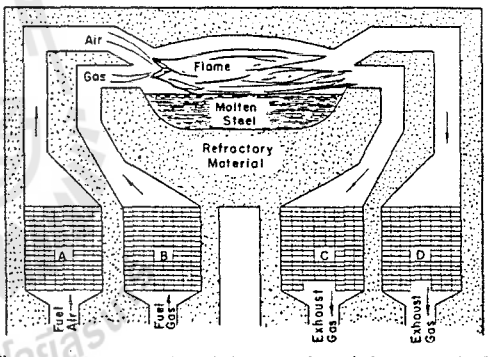
17.1 Crucible furnace: เดิมเคยเป็นเตาสำหรับหล่อเหล็กหล่อและเหล็กกล้า แต่ในปัจจุบันนิยมใช้หล่อหลอมโลหะพวก non-ferrous metal ครั้งละไม่เกิน 200 กิโลกรัม การหลอมโลหะเกิดขึ้นภายในเบ้าหลอมรูปถ้วย(crucible) ทำด้วยดินทนไฟ (เช่น ดินเหนียวผสมกับกราไฟต์และซิลิกอน คาร์ไบด์) เบ้าหลอมจะอยู่ภายในตัวเตาซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ทำด้วยอิฐทนไฟ มีทั้งชนิดที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง (oil-fired furnace), ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง(gas-fired furnace) และ ใช้ถ่านโค๊กเป็นเชื้อเพลิง(coke-fired furnace) ดูรูป 1.55



(c) Gas fired crucible furnace

รูป 1.55: Crucible furnaces

17.2 Open-hearth furnace: ใช้ในการหล่อแท่ง อินกอต(ingot)เหล็กกล้า (ingot มีรูปร่างเป็นแท่ง ใช้เป็นวัตถุดิบของกระบวนการแปรรูปอื่นๆต่อไป เช่น หล่อ, รีด หรือ ตีขึ้นรูปเป็นต้น) ปัจจุบันถือได้ว่าเป็นเตาที่ล้าสมัยสำหรับผลิตเหล็กกล้า



Elementary cross section of the open-hearth furnace. *A*, *B*, *C*, and *D* are checkerworks for storing heat. When the flame is in the direction shown, *C* and *D* are being heated by the burned gases. Every 15 min the direction is reversed; i.e., air and gas will enter through *C* and *D*, which are hot; the flame will burn from the right side, and *A* and *B* will be heated by the burned gases. As time goes on, the system becomes hotter and the flame gradually grows more intense. This is known as the regenerative principle.

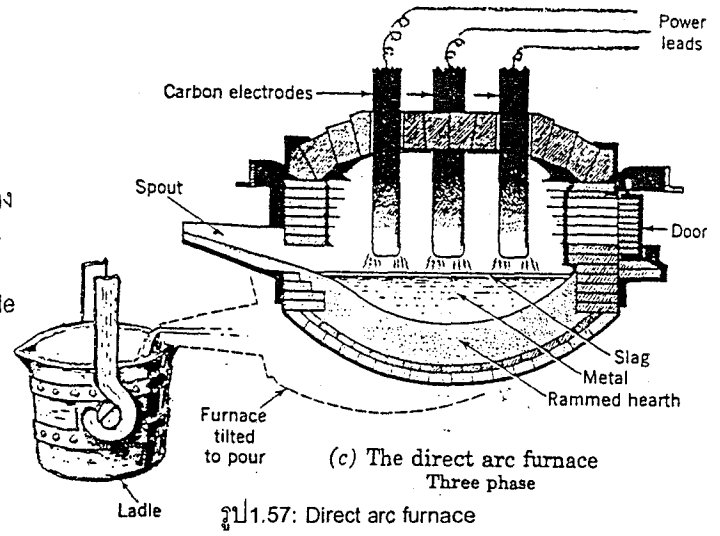
รูป 1.56: Open-hearth furnace

ในรูป 1.56 แสดง หลักการทำงานของเตา open-hearth ใช้ความร้อนของเปลวไฟจากการเผาแก๊สเชื้อเพลิงผสมกับอากาศ หลอมละลายเหล็กปิก(pig iron), เศษเหล็กเหนียว(steel scrap), เศษเหล็กหล่อ(cast iron scrap) และ flux ในอ่างหลอม(hearth) ซึ่งในขณะที่เกิดการหลอมละลายของวัตถุดิบ(charge)เหล่านี้ slag ที่เกิดจากการรวมตัวของoxide ของธาตุต่างๆ และถูกแยกออกจากน้ำโลหะก่อนเท

กระบวนการทำเหล็กกล้ามีอยู่ 2 ชนิดคือ (1) Basic process: หมายถึงกระบวนการที่ใช้เตาหลอมที่มีผนังเตาเป็นวัสดุทนความร้อนที่เป็นด่าง (basic refractory) เช่น MgO และ CaO เป็นต้น (ที่รู้จักกันแพร่หลายคือ MgO) กระบวนการชนิดนี้ ใช้กับการหล่อหลอมวัตถุดิบที่มี phosphorus และ sulphur ผสมอยู่มาก และต้องการลดธาตุเหล่านี้ให้ต่ำลง ทั้งนี้เพราะ oxides ของธาตุทั้งสองทำให้เกิด slag ที่เป็นด่าง ; (2) Acid process: ใช้ผนังเตาหลอมเป็นวัสดุทนความร้อนที่เป็นกรด(acid lining) วัสดุที่เป็นที่ใช้กันมากก็คือ SiO_2 กระบวนการผลิตเหล็กกล้าแบบนี้ไม่สามารถขจัด P และ S ออกไปจากเหล็กได้ จึงต้องใช้กับวัตถุดิบที่มี ธาตุทั้งสองอยู่น้อย เหตุที่ต้องใช้ผนังเตาเป็นกรดก็เพราะว่า slag ที่เกิดขึ้นเป็นกรด

17.3 **เตาอาร์คไฟฟ้า** (induction arc furnace):
ความร้อนสำหรับหลอมละลายโลหะเกิดจากการอาร์คไฟฟ้าระหว่าง carbon electrode กับโลหะวัตถุดิบของเตา (รูป 1.57) วัตถุดิบในเตาอาจเป็นเศษเหล็กกล้าอย่างเดียวหรือผสมกับเหล็กหล่อชนิดอื่น แต่เดิมเป็นเตาที่ใช้สำหรับผลิตเหล็กกล้าโลหะผสมคุณภาพสูง (high-grade alloy steels) แต่ในปัจจุบัน ใช้สำหรับผลิต เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาด้วย

เตาอาร์คมีใช้กันทั้งชนิดที่เป็น basic process และ acid process

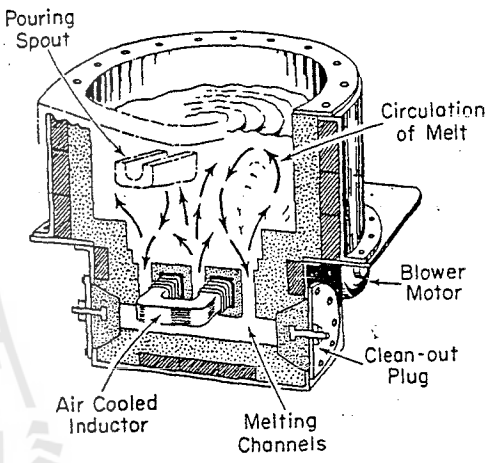


รูป1.57: Direct arc furnace

17.4 **เตาเหนี่ยวนำไฟฟ้า**(induction furnace):
เตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าเป็นเตาหลอมโลหะที่เกิดหลังเตาอื่นๆที่กล่าวมามีให้เลือกใช้หลายขนาด ใช้ความถี่ของกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 50 ถึงมากกว่า 100,000 cycles ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้เตาได้เหมาะสมกับปริมาณหล่อหลอมแต่ละครั้ง นอกจากนั้นยังเป็นเตาที่สามารถหลอมโลหะได้ทุกชนิด

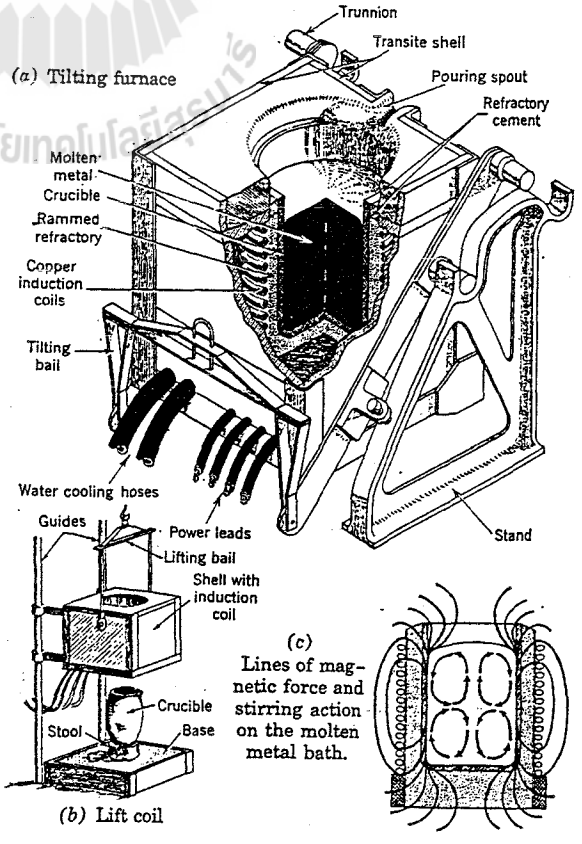
เตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่มี 2 ชนิดคือ

- **Low frequency cored induction furnace:**
เป็นเตาที่ใช้กะแสไฟฟ้าความถี่ ประมาณ 60 cycles (รูป1.58) ใช้หลักการเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า เตาชนิดนี้มีข้อด้อยตรงที่ต้องใช้โลหะเหลวตอน "เริ่มต้น" ส่วนใหญ่ใช้สำหรับการหล่อหลอมโลหะ non-ferrous และสามารถใช้หล่อแบบต่อเนื่อง (continuous process)



รูป1.58: Cored induction furnace

- **High frequency coreless furnace:**
ใช้กระแสไฟฟ้าความถี่สูง (1,000-30,000 Hz) ผ่านขดลวดทองแดงที่มีน้ำหล่อเย็นรอบเบ้าทนไฟที่บรรจุโลหะวัตถุดิบของเตา กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในโลหะภายในเบ้าจะทำให้เกิดความร้อนและทำให้โลหะหลอมละลาย (รูป 1.59)



รูป 1.59: Coreless induction furnace

17.5 **เตาคิวโพลา**(cupola furnace): เป็นเตาสำหรับหลอมเหล็กหล่อ(cast iron) ใช้ถ่านโค๊ก(coke)เป็นเชื้อเพลิง และใช้ลมจากพัดลมทำให้โค๊กลุกไหม้หลอมละลายโลหะ เตาคิวโพลาที่ใช้กันอยู่มีหลายชนิด เช่น ชนิดที่ใช้ลมธรรมดา เรียกว่า "cold-blast cupola"; ถ้าใช้ลมร้อน, เรียกว่า "hot-blast cupola; ถ้ามีน้ำหล่อเย็นที่เปลือกเตา, เรียกว่า "water-cooled cupola"

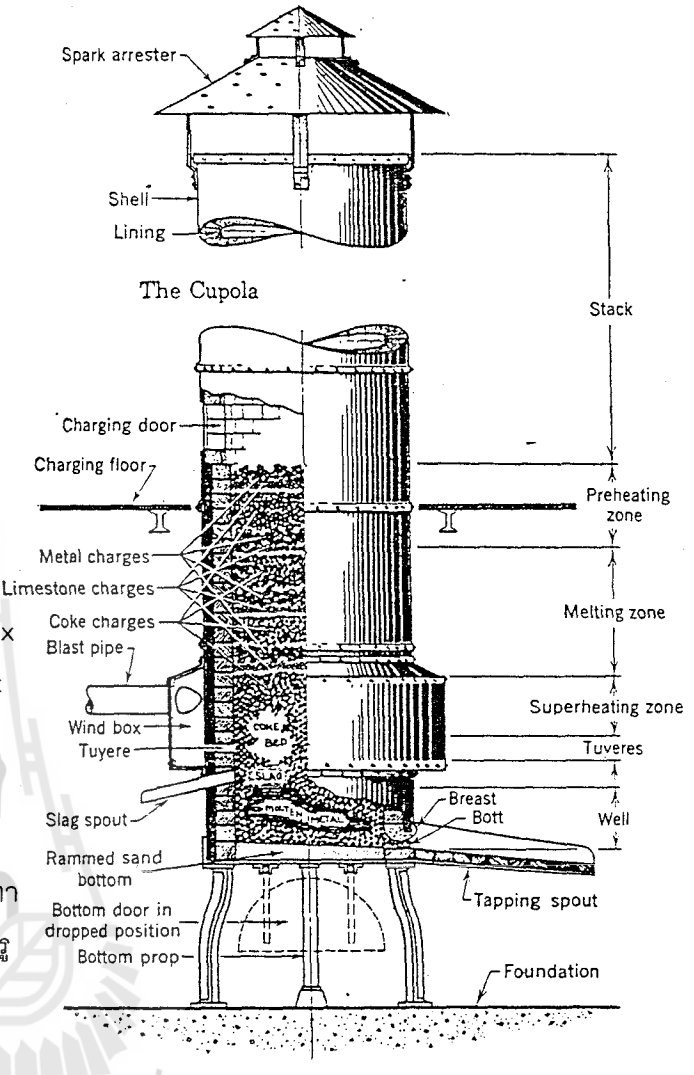
ในรูป 1.60 แสดงโครงสร้างเตาคิวโพลา ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกในแนวดิ่งภายในกรุด้วยอิฐและดินทนไฟเป็นผนัง(lining)หนาประมาณ 150 mm ผนังตอนล่างหนากว่าตอนบนเพราะรองรับอุณหภูมิสูงกว่า มีช่องใส่วัตถุดิบอยู่ในในส่วนที่เรียกว่า stack

ลมจากพัดลม(blower)จะหมุนเวียนรอบเตาใน wind box และเข้าสู่ภายในทางช่องลม (tuyeres) ที่เรียงอยู่ใน wind box

ถัดจากช่องลมเป็นรูแสลก(slag hole) สำหรับถ่าย slag ที่ลอยอยู่บนผิวน้ำเหล็กออกจากเตา แล้วไหลลงมาตามรางแสลก (slag spout)

น้ำเหล็กจะอยู่ตอนล่างในบ่อหลอม(hearth)มีทรายก้นเตา (rammed sand buttom)รองรับ และจะไหลออกจากเตาทางรูเจาะน้ำเหล็ก หรือ tap hole

ตัวเตาตั้งอยู่บนขา 4 ขา มีประตูปิด-เปิดตอนล่างสุดเพื่อถ่ายสิ่งที่เหลืออยู่ในเตาออกเมื่อสิ้นสุดการหล่อหลอม



รูป 1.60: Cupola furnace

วัตถุดิบสำหรับเตาคิวโพลาประกอบด้วย:

- pig iron, เศษเหล็กกล้า(steel scrap), เศษเหล็กหล่อ(cast iron scrap -- ทั้งหมดรวมแล้วประมาณ 1/10 ของน้ำหนักที่ต้องการหลอมต่อชั่วโมง
- ถ่านโค๊ก – ขึ้นอยู่กับ อัตราส่วน metal : coke ratio เช่น 10:1 หรือ 6:1 เป็นต้น
- หินปูน (lime stone) ประมาณ 25 – 40% ของถ่านโค๊ก

เราสามารถประมาณ**อัตราการหลอมของเตาคิวโพลา**อย่างหยาบๆได้จากขนาดของ inner area ของเตาโดยใช้หลักว่า พื้นที่ 1,400 mm2 สามารถหลอม**coke**ได้ 1 kg/hr

บรรณานุกรม:

[1] Heine, R W, et al, Principles of metal casting, McGraw-Hill, 1967.

[2] Taylor, H F, et al, Foundry engineering, John Wiley, 1959

[3] Jain, P L, Principles of foundry technology, Tata McGraw-Hill, 1979

[4] Sarinivasan, N H, Foundry engineering, Khanna Publishers, 1996.

การอบชุบโลหะ

(Heat-treatment of metals)

1. **การอบชุบเหล็กกล้า** (heat-treatment of carbon steels)

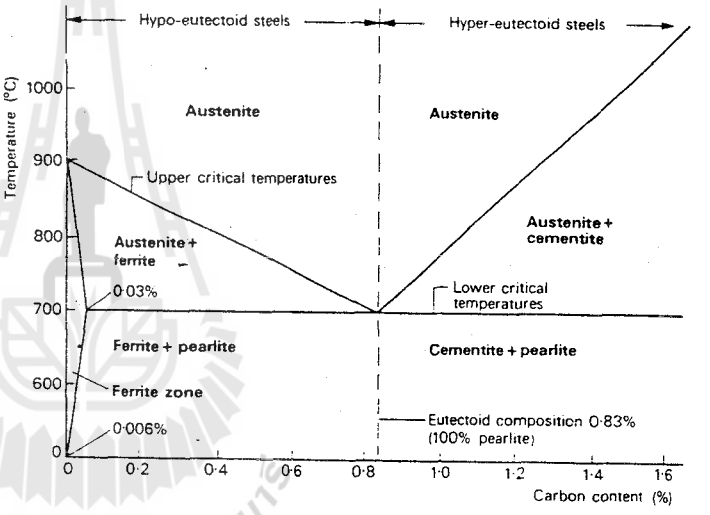
1.1 **เหล็กกล้า**(steels) คือโลหะผสมของเหล็กกล้ากับคาร์บอนโดยมีคาร์บอนอยู่ไม่เกิน 2% ซึ่งคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่ผสมและกรรมวิธีการอบชุบที่ได้รับ นอกจากนี้เหล็กกล้าบางชนิดมีส่วนผสมของของธาตุโลหะผสมอื่น เช่น Ni, Cr, และ Mo เพื่อทำให้เหล็กกล้าเกิดคุณสมบัติพิเศษบางอย่าง

เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลัก เรียกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน (carbon steels) คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าอันเป็นผลเนื่องมาจากการอบชุบจะขึ้นอยู่กับ %C ที่มีอยู่ในเหล็กกล้า

กรรมวิธีการอบชุบสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติของเหล็กกล้าได้ เพราะว่าเหล็กกล้ามีโครงสร้างผลึกได้หลายอย่าง เราเรียกคุณสมบัติเช่นนี้ว่า polymorphism กล่าวคือ: ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 910°C, α - iron มีโครงสร้างผลึกเป็น body-centered cubic (BCC); ที่อุณหภูมิ 910 ถึง 1,400 C, γ -iron มีโครงสร้างเป็น face-centered cubic (FCC) และ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,400 C, δ-iron มีโครงสร้างเป็น BCC

รูป 2.1 แสดง Fe-Fe_3C diagram เฉพาะส่วนที่เป็นของเหล็กกล้า ซึ่งมีเฟสที่สำคัญดังนี้:-

- Austenite: หรือ γ -iron คือ สารละลายของแข็งชนิด interstitial solid solution ของคาร์บอนใน FCC ซึ่งสามารถละลายคาร์บอนได้สูงสุดไม่เกิน 2% และเสถียรที่อุณหภูมิระหว่าง 723°C-1,493°C
- Ferrite: หรือ α - iron เป็น interstitial solid solution ของคาร์บอนใน BCC สามารถละลายคาร์บอนได้สูงสุดไม่เกิน 0.03% ที่อุณหภูมิ 723°C และละลายได้ประมาณ 0.006% ที่อุณหภูมิห้อง เป็นที่ยอมรับกันว่า α - iron คือเหล็กบริสุทธิ์



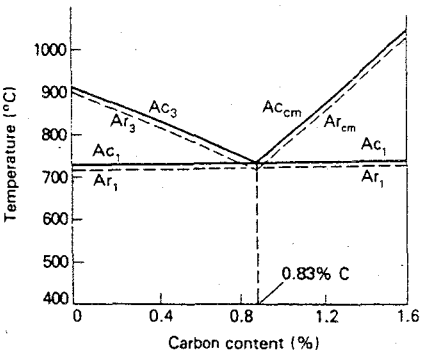
รูป 2.1: Iron-carbon diagram (steel portion)

- Cementite: หรือ iron-carbide phase เป็นเฟสที่เกิดจากการรวมตัวของคาร์บอน (ที่มีอยู่มากเกินไป ณ. อุณหภูมิหนึ่ง) กับเหล็กในรูปของสารประกอบ Fe_3C ซึ่งแต่ละโมเลกุลของ cementite จะประกอบด้วย เหล็ก 3 อะตอม และ คาร์บอน 1 อะตอม องค์ประกอบเช่นนี้จะเกิดขึ้นกับส่วนของคาร์บอนที่ไม่เกิน 2%; ถ้าสารละลายของแข็งมีคาร์บอนเกิน 2% ส่วนที่เกิน 2% จะแยกออกเป็นคาร์บอนอิสระ (free graphite flake -- ในเหล็กหล่อ)

1.2 **อุณหภูมิวิกฤติ** (critical temperatures):

อุณหภูมิวิกฤติคืออุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส (critical change points) ซึ่งมีหลายจุดที่สำคัญสำหรับเหล็กกล้าคือ:- (รูป 2.2)

- A_1 = คืออุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยายูเทคตอย (eutectoid reaction): austenite เปลี่ยนเป็นเฟสของ ferrite สลับกับ Fe_3C เราเรียกโครงสร้างจุลภาพนี้ว่า pearlite ; A_1 อยู่ที่ 723 C



รูป 2.2: Critical temperatures

- A_3 คืออุณหภูมิสูงสุดที่ hypo-eutectoid steels เกิดเป็น austenite ได้หมด
- A_{cm} คืออุณหภูมิสูงสุดที่ hyper-eutectoid steels เกิดเป็น austenite ได้หมด

ในรูป 2.2 Ac_1, Ac_3, Ac_{cm}, Ar_1, Ar_3, Ar_{cm}; ตัวห้อย **r** หมายถึง "cooling" และ **c** หมายถึง "heating"

1.3 **การเกิด** pearlite (pearlite formation): เมื่อ austenite เย็นตัวอย่างช้าๆ ผ่านอุณหภูมิ 723°C จะเกิดโครงสร้าง pearlite ซึ่งประกอบด้วย ferrite และ cementite ในสัดส่วนโดยน้ำหนักดังนี้:-

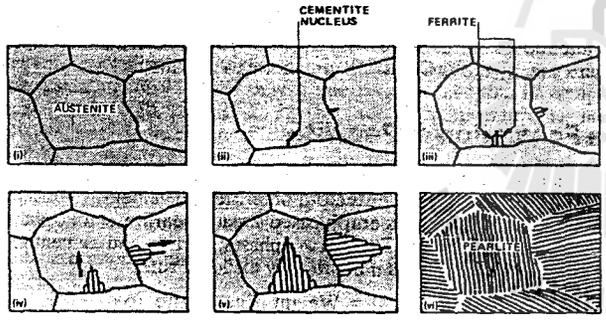
(น้ำหนักของ ferrite)/(น้ำหนักของ cementite) = (6.67 – 0.8)/0.8 = 5.87/0.8 = 7.3/1

เนื่องจากความหนาแน่นของ ferrite และ cementite ประมาณเท่าๆกัน เพราะฉะนั้นเราจึงเห็นโครงสร้างจุลภาพของ pearlite มีแถบ ferrite กว้างประมาณ 7 เท่าของแถบ Fe_3C

คุณสมบัติทั่วไปของ ferrite คือ อ่อน และเหนียว(tough) ในขณะที่ Fe_3C มีความแข็งและแข็งแรงมากกว่าแต่เปราะ ดังนั้น pearlite จึงมีความแข็งแรงสูงกว่า ferrite และไม่เปราะเหมือน cementite

กลไกของการเกิด pearlite จาก austenite เป็นกลไกที่เกิดจากปฏิกิริยาหลายชนิดในสารละลายโลหะผสม โดยเริ่มต้นที่ grain boundary ก่อนเป็นส่วนใหญ่ แล้วค่อยๆขยายเข้าไปภายใน grain ทั้งนี้เนื่องจากอะตอมที่ grain boundary มีระดับพลังงานสูงกว่าอะตอมที่อยู่ภายใน grain; ดังนั้นอะตอมเหล่านี้จึงสามารถแยกตัวเกิดเป็นโครงสร้างใหม่ได้ง่ายกว่าเพราะต้องการพลังงานเพิ่มเติมน้อยกว่า

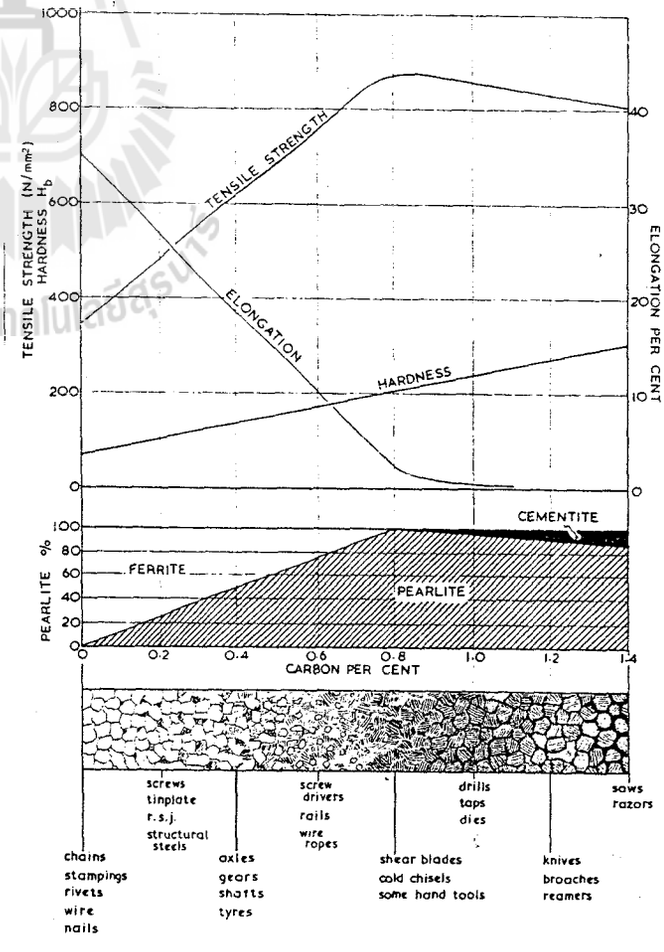
เป็นที่เข้าใจว่า อะตอมคาร์บอนเริ่มต้นรวมกับเหล็กเป็น nucleus ของ Fe_3C ที่ grain boundary (รูป 2.3 ii) จากนั้นจึงเกิดการเติบโตออกจาก grain boundary เข้าสู่ภายใน grain ในขณะเดียวกัน austenite จะมีคาร์บอนต่ำลงไปเรื่อยๆ จนในที่สุดจะเกิดกลายเป็น ferrite อยู่รอบ Fe_3C เกิดเป็นโครงสร้าง pearlite (ในรูป 2.3 vi)



รูป 2.3: Formation of pearlite

1.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง%C, คุณสมบัติทางกล และการใช้งานของเหล็กกล้าคาร์บอน

ในรูป 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง คาร์บอนกับคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า ในที่นี้ถือว่าการเย็นตัวของเหล็กกล้าเกิดขึ้นอย่างช้าๆจนได้โครงสร้างดังที่แสดงจะเห็นได้ว่า เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนน้อย จะมีโครงสร้างเป็น ferrite เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ อ่อน(soft) ยืดตัว (ductile)ได้มาก และมีความแข็งแรงต่ำ(low strength) ความแข็งแรงจะมีค่าสูงสุดที่ 0.8 %C



รูป2.4: **อิทธิพลของ %C คุณสมบัติทางกลของ** steels

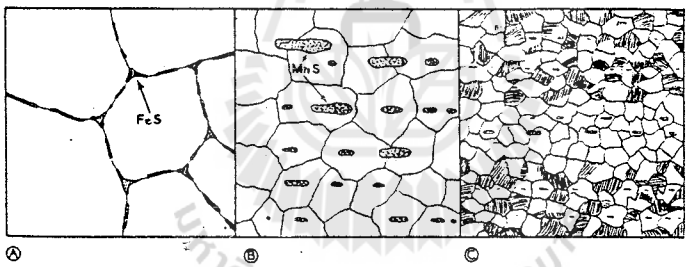
1.5 **อิทธิพลของธาตุโลหะผสมในเหล็กกล้าคาร์บอน :** เหล็กกล้าคาร์บอน(plain-carbon steels) นอกจากจะมีคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 2% แล้วยังมีธาตุโลหะผสมอื่นอยู่ด้วยดังนี้: Manganese ไม่เกิน 1.5%; Phosphorus ไม่เกิน 0.05%; Silicon ไม่เกิน 0.3% และ Sulphur ไม่เกิน 0.05%

Manganese: ช่วยเพิ่ม yield point และความเหนียว(toughness) ในด้านของการอบชุบโลหะ Mn ช่วยเพิ่มความลึกของขอบแข็งให้กับเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็ง(depth of hardening) Mn สามารถรวมกับ S ได้ง่ายกว่ารวมกับเหล็ก เพราะฉะนั้น จึงสามารถใช้ Mn ทำหน้าที่ลด S ซึ่งเป็นธาตุที่เราไม่ต้องการให้อยู่ในเหล็กกล้าเลย โดย Mn จะรวมกับ S ในรูปของ MnS ซึ่งไม่ละลายในน้ำเหล็ก และบางส่วนจะรวมกับแสลก(slag)ออกไปจากน้ำเหล็ก ส่วนที่เหลือจะกระจายอยู่ในเหล็กกล้า (รูป 2.5)

Phosphorus: ถือว่าเป็นธาตุเจือปนที่ต้องนำออกไปจากเหล็กกล้าให้มากที่สุด และไม่ควรมีอยู่ในเหล็กกล้าเกินกว่า 0.05% เพราะอาจเกิดเป็น Fe_3P ซึ่งเปราะเมื่อแยกเป็นโครงสร้างจุลภาพในเหล็กกล้า

Silicon: ช่วยให้เหล็กกล้ามี fluidity ดี แต่เป็นธาตุทำให้คาร์บอนแยกตัวเป็นอิสระ (graphite) จาก Fe_3C เพราะฉะนั้น เหล็กกล้าคาร์บอนสูงจะต้องมี Si อยู่น้อย มิฉะนั้นแล้วความแข็งแรงของเหล็กกล้าจะลดลง

Sulphur: เป็นธาตุเจือปนที่มากับถ่านโค๊ก มีผลเสียต่อเหล็กกล้ามากที่สุด เมื่อรวมตัวกับเหล็กในรูป FeS ตาม grain boundary ของ austenite (รูป 2.5) แล้ว ทำให้เหล็กกล้าฉีกขาดได้ง่ายในขณะทำ hot-working เพราะ FeS มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า austenite นอกจากนั้นที่อุณหภูมิห้อง FeS ยังมีคุณสมบัติเปราะ ทำให้ไม่สามารถทำ cold-working กับเหล็กกล้าได้ เพราะจะเกิดการแตกตาม grain boundary ของเหล็กกล้า



(A) The segregation of iron(II) sulphide (FeS), at the crystal boundaries in steel. × 750.
(B) The formation of isolated manganese sulphide (MnS) globules when manganese is present in a steel. × 200.
(C) 'Ghost bands' or areas lacking in pearlite, which indicate the presence of phosphorus. × 75.

รูป 2.5: แสดง FeS, MnS และ"Ghost bands"

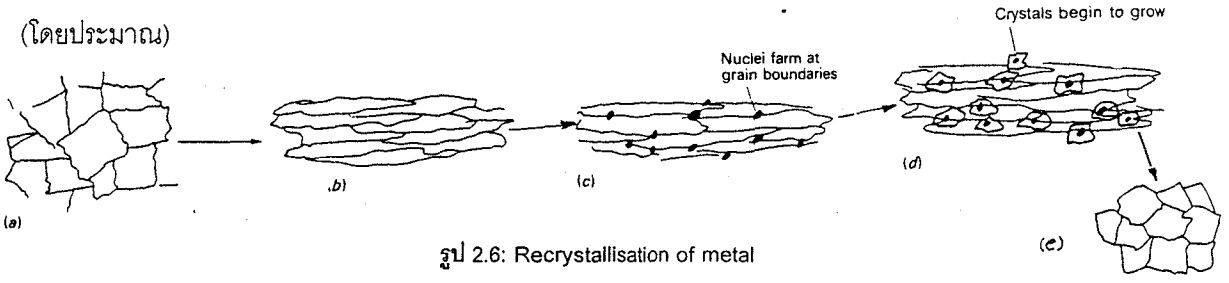
1.6 **วิธีอบชุบเหล็กกล้า (heat-treatment methods):** มีวิธีการที่ใช้สำหรับอบชุบเหล็กล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าโลหะผสมอยู่ 4 วิธีการหลักๆคือ:- annealing, normalising, hardening, และ tempering

ก่อนที่จะกล่าวถึงวิธีการเหล่านี้ เราควรที่จะทำความเข้าใจปรากฏการ์พื้นฐานบางอย่างที่เกี่ยวกับการอบชุบโลหะเสียก่อน ดังนี้

- **Recrystallisation :** หมายถึงการเกิด grain ใหม่ในสภาวะของแข็ง โดยที่ grain ซึ่งเกิดใหม่นี้ เกิดจาก grain เดิมซึ่งบิดเบี้ยวและเสียรูปจากการทำ cold-working [เช่น เอาโลหะมารีด(rolling), ตีขึ้นรูป(forging), และดึงให้ยืด (drawing) โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่โลหะ]

การที่ grain เสียรูปไปเช่นนั้น ทำให้เกิดความเค้นตกค้างอยู่ภายใน (residual stress) และทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เราเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่าโลหะเกิด "strain hardening" หรือ "work hardening"

ถ้าหากนำโลหะที่เกิด strain hardening ใส่เข้าไปในเตาอบ(heating furnace)แล้วค่อยเพิ่มอุณหภูมิในเตาให้สูงขึ้น จะพบว่า ณ.อุณหภูมิหนึ่ง จะเริ่มเกิด nucleus ของผลึกขึ้นตรง grain boundaryของ grain เดิม (ดูรูป2.6) และหลังจากนั้นก็จะเกิดการเติบโตของผลึกเป็น grain ใหม่ เราเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า "recrystallisation" และเรียกอุณหภูมิที่โลหะเริ่มเกิด grain ใหม่ว่า "recrystallisation temperature" อุณหภูมินี้ของเหล็กกล้าอยู่ที่ 500°C (โดยประมาณ)



รูป 2.6: Recrystallisation of metal

- Hot-working: ถ้าจะเรียก cold-working ว่า "การแปรรูปเย็น", hot-working ก็คือ "การแปรรูปร้อน" เพราะ hot-working แตกต่างจาก cold-working ตรงที่ ในขณะที่โลหะถูกแรงจากภายนอกกระทำให้เปลี่ยนแปลงรูปร่างนั้น โลหะได้รับความร้อนและมีอุณหภูมิสูงกว่า recrystallisation temperature ผลก็คือโลหะจะเกิด strain hardening และเกิด recrystallisation ทันทีในเวลาใกล้ๆกัน ถ้าอุณหภูมิของการทำ hot-working สูงเกินไป grain จะมีขนาดใหญ่ เพราะมีเวลาเติบโตนาน หรือถ้าคงที่อุณหภูมิของการทำ hot-working นานเกินไป, อาจเกิด oxidation ที่ grain boundary ได้; ทั้งสองกรณีนี้ ทำให้ความแข็งแรงของโลหะที่อุณหภูมิห้องลดลง

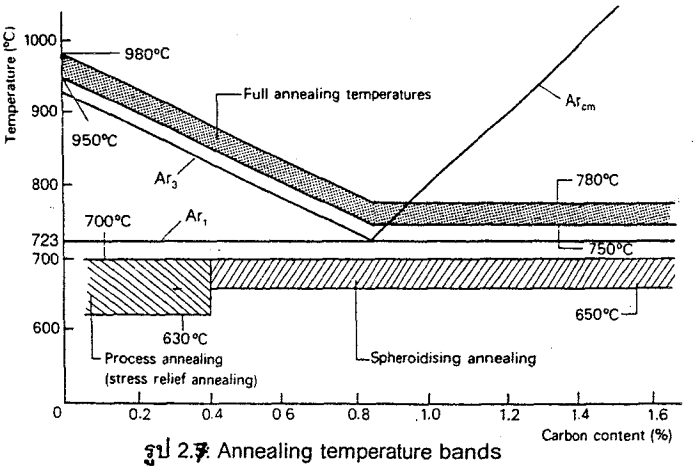
1.7 Annealing process: หรือเรียกว่า การอบอ่อน หมายถึงกระบวนการทำให้โลหะอ่อนตัวลง สามารถตัด, กลึง, ไส ได้ง่ายขึ้น หรือสามารถนำไปแปรรูปในกระบวนการผลิตขั้นต่อไปได้

มีวิธี annealing สำหรับเหล็กกล้าหลายวิธี เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆดังนี้:-

- Stress-relief annealing : ที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ A_1 (อาจเรียกเป็นชื่ออื่น เช่น Process annealing และ Interstage annealing)
- Spheroidising annealing : ที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ A_1
- Full annealing : สำหรับชิ้นงานตีขึ้นรูป (forging) และ ชิ้นงานเหล็กกล้าหล่อ (steel casting)

ในรูป 2.7 แสดงแถบอุณหภูมิสำหรับการทำ annealing แต่ละชนิด

1.8 Stress-relief annealing : ใช้สำหรับขจัดความเค้นตกค้างในเหล็กกล้าที่ผ่านการทำ cold-working มาก่อน เพื่อให้เหล็กกล้าอ่อนตัว และสามารถที่จะนำไปทำ cold-working ต่อไปได้ เหล็กกล้าที่ใช้ผลิตเป็นชิ้นงานด้วยกรรมวิธี cold-working เป็นเหล็กคาร์บอนต่ำ (ต่ำกว่า 0.4%C)



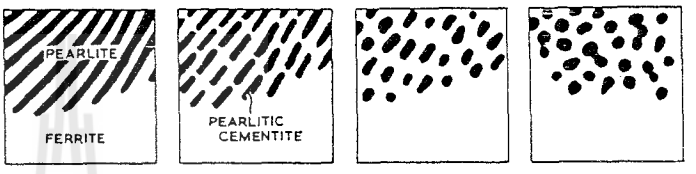
รูป 2.7: Annealing temperature bands

Recrystallisation temperature ของเหล็กกล้าบริสุทธิ์ประมาณ 500°C; ในทางปฏิบัติ การทำ stress-relief annealing ใช้อุณหภูมิอบเหล็กกล้าระหว่าง 630° – 700°C (เพื่อเร่งการเกิด grain ใหม่, และขณะเดียวกันก็

จำกัดการเติบโตของgrain ด้วย) ระยะเวลาในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่ดังกล่าว และอัตราการเย็นตัว ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการแปรรูป หรือการใช้งานที่จะเกิดขึ้นภายหลังจากการ annealing เช่น ถ้าต้องนำชิ้นงานไปรีดลดขนาดต่อไป ก็จำเป็นต้องทำให้ชิ้นงานมี ductility และ malleability สูงๆ ด้วยการ ให้ชิ้นงานอยู่ที่อุณหภูมิอบอ่อนมากขึ้น และปล่อยให้เย็นตัวช้าๆภายในเตา; แต่ถ้าเป็นการอบเพื่อลดความเค้น และต้องการให้ได้ grain ละเอียด เพื่อคงความแข็งแรงและความเหนียวไว้ ก็ให้ใช้เวลาในการอบน้อย และปล่อยให้ชิ้นงานเย็นเร็วขึ้น เป็นต้น

1.9 Spheroidising annealing : ใช้กับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.4% เพื่อลดความเค้นตกค้างที่เกิดจากการทำ cold-working หรือ quench hardening การทำ spheroidising annealing ทำให้เหล็กกล้าอ่อนตัว ง่ายต่อการตัดด้วยเครื่องมือกล (machine-tools) ได้ผิวรอยตัดที่เรียบ(good finish); หรือถ้าใช้ในการแปรรูปอื่นๆ (plastic deformation processes) ก็สามารถทำให้กระบวนการแปรรูปดำเนินต่อไปได้ นอกจากนั้นถ้านำไปชุบแข็งใหม่(re-hardening) โอกาสที่ชิ้นงานแตกจะน้อยลง

วิธีอบ ใช้อุณหภูมิ 650 – 700°C ที่อุณหภูมินี้ cementite ใน pearlite จะกลายเป็นก้อนกลม (ดูรูป 2.8) เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนจนทั่วแล้ว ปล่อยให้เย็นตัวช้าๆในเตา



The spheroidisation of pearlitic cementite.

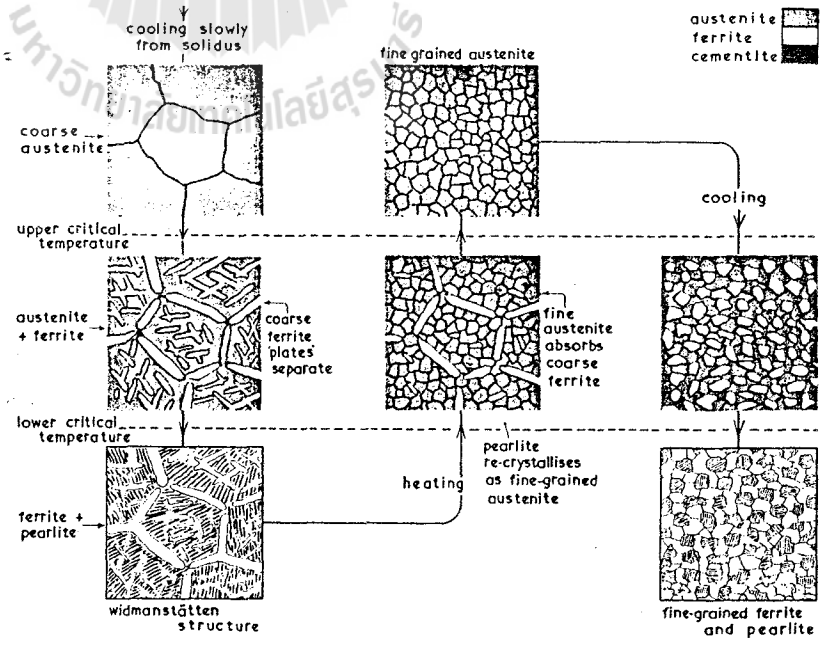
รูป 2.8: Spheroidising annealing

1.10 Full annealing : เหล็กกล้าคาร์บอนแข็งตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงเฟสในสภาวะของแข็งมาก เช่น ชิ้นงานหล่อหนาๆ ตรงบริเวณใจกลางของส่วนที่หนา จะต้องใช้เวลานานมากในการเย็นตัว ดังนั้น grain ของ austenite จึงมีโอกาสเติบโตได้นานกว่าจะเย็นตัวลงมาถึง A_3 ผลก็คือทำให้เกิดเป็น grain ใหญ่ และเมื่อเย็นตัวมาถึง A_3 , จะเกิด ferrite ขึ้นที่ grain boundary และ กระจายเป็นตารางอยู่ภายใน austenite grain ดังในรูป 2.9 โครงสร้างแบบนี้ เรียกว่า Widmanstatten structure ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เปราะและไม่แข็งแรง

รูป 2.9: Widmanstatten structure

ปัญหาเช่นนี้เกิดขึ้นกับชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อน (hot forging)ด้วยโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่และต้องใช้อุณหภูมิตีขึ้นรูปสูงๆ

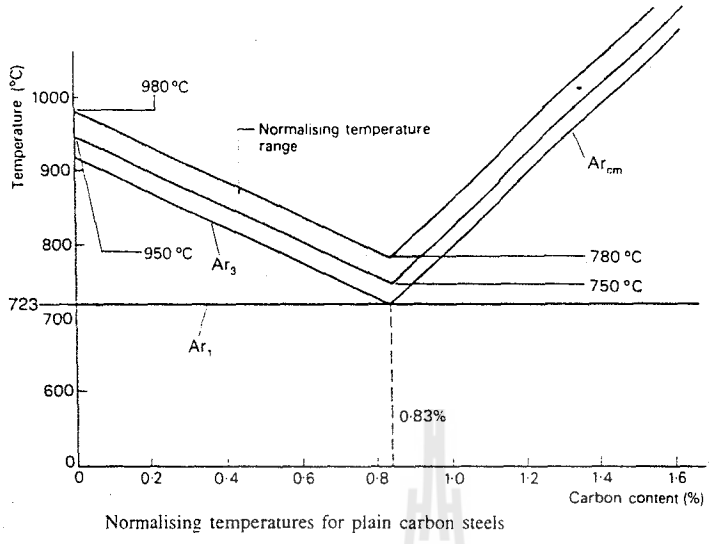
การแก้ปัญหานี้ ใช้วิธีทำ full annealing ด้วยการนำชิ้นงานมาอบที่อุณหภูมิ 50°C เหนือ Ar_3 (สำหรับ Hypo-eutectoid steels) และ เหนือ Ar_1 (สำหรับ hyper-eutectoid steels)



Structural changes occurring during the annealing of a steel casting (approx 0.35% carbon). The as-cast Widmanstätten structure is reheated to some temperature above its upper critical and then allowed to cool in the furnace.

รูป 2.10: Full annealing **เพื่อแก้** Widmanstatten structure

ผลก็คือทำให้เกิดเป็น austenite grain ที่ละเอียด และเกิดเป็น grain ละเอียดของ ferrite กับ pearlite หรือ grain ละเอียดของ pearlite กับ cementite จากนั้นให้เย็นตัวในเตา (รูป2.10)



Normalising temperatures for plain carbon steels

รูป 2.11: Normalising temperatures

1.11 Normalising : ในรูป 2.11 แสดงอุณหภูมิสำหรับการทำ normalising เหล็กกล้าคาร์บอน จะเห็นได้ว่า ในกรณีของ hypo-eutectoid steelsใช้อุณหภูมิเท่ากับการทำ full annealing แต่ส่วนต่างกันก็คือ ภายหลังจากที่อบทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้จนเกิด grain ละเอียดของ austenite แล้ว ในกระบวนการทำ normalising จะให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศทันทีเพื่อหลีกเลี่ยงการเติบโตของ grain ดังเช่นในกรณีของการทำ annealing ส่วน hyper-eutectoid steels อบที่อุณหภูมิ เหนือ Ar_{cm} ประมาณ 50°C การทำเช่นนี้ ทำให้แน่ใจได้ว่า การเปลี่ยนแปลงเป็น austenite grain ที่ละเอียดจะช่วยปรับขนาด grain ที่โตขึ้นหรือบิดตัวซึ่งเกิดก่อนหน้านี้ให้ดีขึ้น หลังจากนั้น ให้เย็นในอากาศ จะได้ grain ละเอียดของ pearlite และ cementite

การทำ normalising ทำให้โลหะแข็งแรงขึ้นเหนียวขึ้น แต่ ductility และ malleability ของโลหะจะลดลง การที่โลหะมี ความแข็งเพิ่มขึ้นและductilityลดลง เช่นนี้ ช่วยให้โลหะที่ถูกตัดเกิดผิวเรียบได้ง่าย (better surface finish)

ในบางครั้งมีการใช้ normalising เพื่อลดความเค้นตกค้างที่ผิวงานซึ่งเกิดจากการตัดโลหะ วิธีนี้ช่วยลดเวลาในการผลิตเครื่องจักรลงได้มาก เพราะแต่เดิม การลดความเค้นส่วนนี้ใช้วิธีตามธรรมชาติคือ ปล่อยให้ชิ้นงานตากแดดตากฝนจนกว่าความเค้นตกค้างจะหายไป ซึ่งอาจกินเวลาเป็นปี

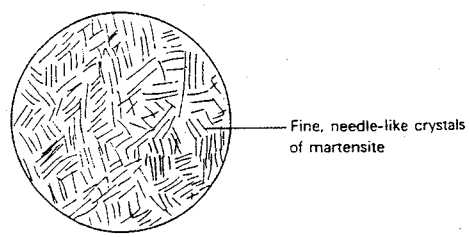
1.12 การเปลี่ยนแปลงเฟสอย่างไม่สมดุลย์ (non-equilibrium transformation):

- Martensite:

โครงสร้างจุลภาพที่ได้จากการเย็นตัวอย่างช้าๆจาก austenite จนถึงอุณหภูมิห้องคือ ferrite กับ pearlite (สำหรับ hypo-eutectoid steels) หรือ cementite กับ pearlite (สำหรับ hyper-eutectoid steels) การเปลี่ยนแปลงเฟสของเหล็กกล้าที่เกิดขึ้นนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงเฟสอย่างสมดุลย์ แต่ถ้าหากให้ austenite ของเหล็กกล้า (ซึ่งมีคาร์บอนมากกว่า 0.3%) เย็นตัวอย่างรวดเร็วผ่านอุณหภูมิ Ar_1ลงมาถึงประมาณ 200°C, ferrite และ pearlite จะไม่มีเวลาเพียงพอที่จะเกิด ทำให้คาร์บอนตกค้างในโครงสร้างผลึกของเหล็กกล้ามากเกินกว่าจำนวนที่อยู่ในเหล็กกล้าที่อุณหภูมิปกติ เป็นผลให้ FCC ของ γ -iron ที่จะต้องเปลี่ยนเป็น BCC เกิดบิดเบี้ยวกลายเป็น Body-centered tetragonal cubic lattice (BCT) ซึ่งมีความแข็งที่สุดในบรรดาโครงสร้างจุลภาพในเหล็กกล้าคาร์บอน มีลักษณะคล้ายเข็ม (acicular – needle shape – crystal) ดังในรูป 2.12 (ความจริงมีลักษณะเป็นแผ่นกลม แต่ที่เห็นเป็นเข็มเพราะเป็นภาพของตัดแผ่นผลึกดังกล่าว) เราเรียกโครงสร้างนี้ว่า Martensite;กล่าวได้ว่า martensite เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแบบไม่สมดุลย์

ความแข็งของ martensite ในเหล็กกล้าคาร์บอน ขึ้นอยู่กับปริมาณ carbon และอัตราการเย็นตัว: ถ้ามี carbon ผสมอยู่มาก ความแข็งจะสูง; ถ้าอัตราการเย็นตัวยิ่งสูง, ความแข็งยิ่งเพิ่มขึ้น แต่ยิ่งมีความแข็งเพิ่มมาก martensite จะยิ่งเปราะและมีโอกาสที่จะแตกในขณะชุบแข็งมากยิ่งขึ้น เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการป้องกันการแตกของชิ้นงานในขณะชุบแข็งด้วยโดยการใช้วิธีการชุบที่เหมาะสมกับรูปร่างของชิ้นงานและ โดยการออกแบบชิ้นงานให้มีจุดอ่อน(stress concentration)น้อยที่สุด (ตัวอย่างในรูป 2.13)

ในการเกิด martensite, เหล็กกล้าจะต้องมีcrbonมากพอ และจะต้องเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัว(ต่ำสุด)ค่าหนึ่ง หมายความว่าถ้าอัตราการเย็นตัวต่ำกว่าค่านี้แล้ว จะไม่เกิด martensite; เราเรียกอัตราการเย็นตัวนี้ว่าอัตราการเย็นตัววิกฤติ critical cooling rate ดังนั้นชิ้นงานที่มีความหนามาก อาจไม่เกิด martensite ตลอดหน้าตัด เพราะอัตราการเย็นตัวภายในต่ำกว่าข้างนอก ferrite และ pearlite ยังคงเกิดขึ้นได้ภายชิ้นงาน



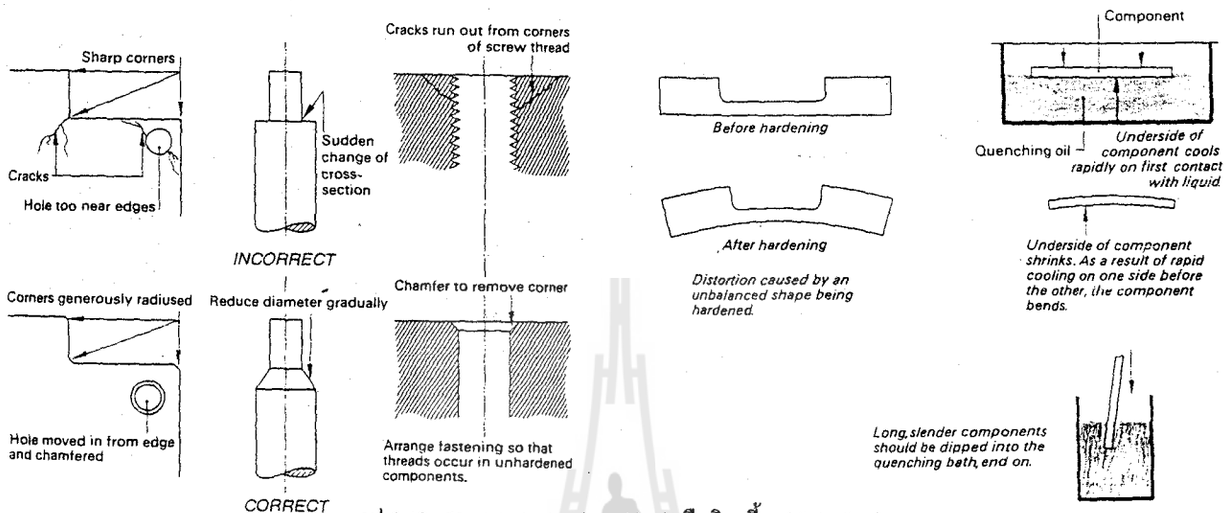
รูป 2.12: Martensite structure

ความแข็งของ martensite เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเย็นตัวสูงขึ้น แต่เมื่อความแข็งมีค่าสูงสุดแล้ว การเพิ่มอัตราการเย็นตัวจะยิ่งทำให้โลหะแตกและบิดงอภายหลังการอบชุบง่ายมากขึ้น นอกจากนี้ การอบเหล็กกล้า hyper-eutectoid ก่อนชุบแข็งที่อุณหภูมิสูงกว่า Ar_{cm} จะไม่เกิดผลดีแต่อย่างใด เพราะการอบที่อุณหภูมิสูง เหล็กกล้ามีโอกาสเกิดเกรนโต(grain growth) และแตกหรือบิดเสียรูปตอนชุบ(quench)ได้มากกว่าอบที่อุณหภูมิต่ำ เพราะฉะนั้น การอบเหล็กกล้าเหล่านี้ก่อนชุบ จึงต้องกระทำที่อุณหภูมิสูงกว่า A_1 เท่านั้น อุณหภูมิวิกฤติของเหล็กกล้าสามารถลดต่ำลงได้ถ้าหาก เหล็กกล้ามีธาตุโลหะบางอย่างผสมอยู่ (alloying elements)

- **Bainite:** ถ้าหากการเย็นตัวของ austenite ไม่เร็วมาก(จนเกิดเป็น martensite) หรือ เหล็กกล้าอยู่ที่อุณหภูมิคงที่ประมาณ 250 – 550°C ที่ช่วงอุณหภูมินี้ จะเกิดการตกตะกอนของcarbide จาก austenite เป็นผลึกละเอียดมาก (สามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องกำลังขยายสูงๆเท่านั้น) เราเรียกโรงสร้างจุลภาพนี้ว่า **bainite**

Bainite เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วย α -iron กับ Fe_3C เหมือน pearlite แต่ละเอียดกว่า และมีการเกิดของโครงสร้างแตกต่างกัน: ใน pearlite, Fe_3C เกิดก่อน; ส่วนใน bainite, ferrite เกิดก่อน แล้วตามด้วยการรวมตัวของ

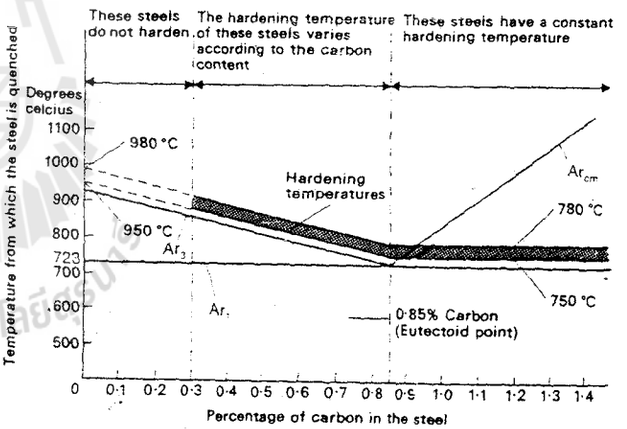
ด้วยการรวมตัวของผลึกละเอียด Fe_3C เป็นเส้นบนผิว ferrite โครงสร้าง bainite จัดได้ว่าเป็นโครงที่เกิดจากการชุบแข็ง(hardening structure)โครงสร้างหนึ่ง มีความแข็งมากแต่ยังเป็นรอง martensite ถ้า bainite เกิดที่ช่วงอุณหภูมิต่ำคือ ประมาณ 250°C เราเรียกว่า lower bainite จะมีโครงสร้างที่ละเอียด คล้าย martensite แต่ถ้าเกิดในช่วงอุณหภูมิสูง เช่นที่ 500°C เราเรียก upper bainite จะมี Fe_3C ใหญ่กว่า และถ้าอัตราการเย็นตัวต่ำกว่านี้หรือ เย็นตัวมาที่อุณหภูมิประมาณต่ำกว่า 723°C ถึง 550°C โครงสร้างที่ได้จะเป็น pearlite.



รูป 2.13: **สาเหตุการแตก**(cracking)**หรือบิดเบี้ยว**(distortion)

1.13 **การชุบแข็ง** (quench hardening):

การชุบแข็งคือการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดเป็น austenite ทั้งหมด(hypo-eutecoid) หรือ บางส่วน (hyper-eutectoid มีเฟสของcementite ด้วย) จากนั้นเมื่อชิ้นงานมีอุณหภูมิทั่วกันแล้วจึงชุบลงในสารตัวกลาง(quenching media) ในรูป 2.14 แสดงช่วงอุณหภูมิสำหรับชุบแข็ง จะสังเกตเห็นได้ว่าเป็นช่วงอุณหภูมิเดียวกับการทำ annealing แต่ไม่มีแถบอุณหภูมิชุบแข็งต่ำกว่า 0.3%C เพราะว่าโครงสร้าง martensite ไม่สามารถเกิดขึ้นกับเหล็กกล้าที่มี carbon นี้ได้



รูป 2.14: อุณหภูมิสำหรับการชุบแข็ง

ในการชุบแข็งสารตัวกลางจะเป็นตัวกำหนดอัตราการเย็นตัวของชิ้นงาน ที่ใช้กันอยู่เสมอได้แก่ (เรียงตามลำดับอัตราการเย็นตัวจากต่ำไปสูง):- (1) อากาศพ่นภายใต้ความดัน (compressed air blast); (2) น้ำมัน (oil); (3) น้ำ(water); และ (4) น้ำเกลือ (brine--10% solution)

การเลือกใช้สารตัวกลางขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กกล้าและคุณสมบัติที่ต้องการภายหลังการชุบแข็ง น้ำเกลือให้อัตราการเย็นตัวสูงสุด ใช้ชุบเหล็กกล้าที่ใช้ทำเครื่องมือตัดโลหะ(tool steels) หรือใช้สำหรับชุบเพื่อทำผิวแข็ง (case hardening) อัตราการเย็นตัวสูงทำให้เกิดความแข็งสูง แต่เสี่ยงต่อการแตกของชิ้นงานในขณะชุบ ยกเว้นในกรณีที่ชิ้นงานมีรูปร่างง่ายๆ ไม่มีความซับซ้อน(simplest components)

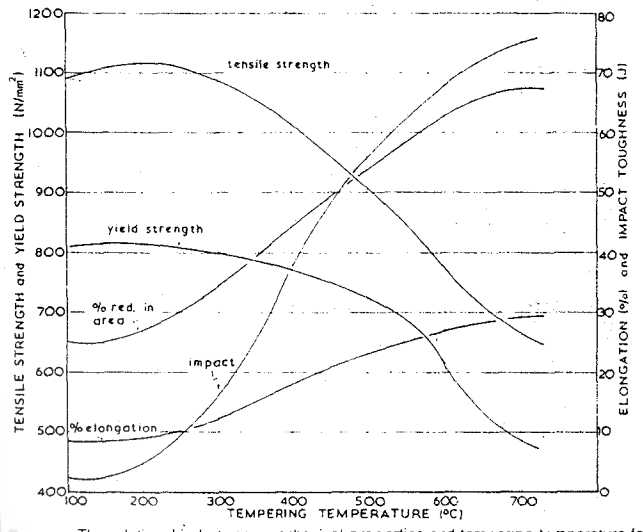
น้ำ(water) ให้อัตราการเย็นตัวประมาณ 3 เท่าของน้ำมัน ตามปกติใช้กับเหล็กกล้าคาร์บอน; น้ำมัน ใช้กับเหล็กกล้าคาร์บอนสูง (เช่น 1.2 – 1.4 %C) และเหล็กกล้าโลหะผสม (alloy steels); ส่วน ลมพ่น ใช้กับเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วตัดสูง(high-speed steels)และชิ้นงานเหล็กกล้าโลหะผสมบางๆ

ทันทีที่ชุบชิ้นงานลงในสารตัวกลางที่เป็นของเหลว จะเกิดฟองอากาศห่อหุ้มชิ้นงาน ฟองอากาศเหล่านี้นำความร้อนต่ำ ทำให้อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานต่ำลง ดังนั้นจึงต้องมีการเคลื่อนที่ชิ้นงานกวนตัวกลางอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้ฟองอากาศที่ห่อหุ้มแตกกระจาย ทำให้ของเหลวตัวกลางสัมผัสผิวชิ้นงานอยู่เสมอ และทำให้อุณหภูมิของอ่างชุบสม่ำเสมอเท่ากันตลอด

1.14 **การอบคืนตัว** (tempering): เนื่องจากเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งแล้วจะเปราะและแตกง่าย จึงใช้ประโยชน์ได้น้อย และชิ้นงานบางอย่างนอกจากจะต้องมีความแข็งแล้ว ยังต้องมีความเหนียว (toughness) และสามารถทนต่อแรงกระแทกได้ ดังนั้น จึงต้องมีการทำ tempering (อบคืนตัว หรือ อบซ้ำ) เพื่อลดความเค้นและความเปราะ(brittleness) จากการชุบแข็ง

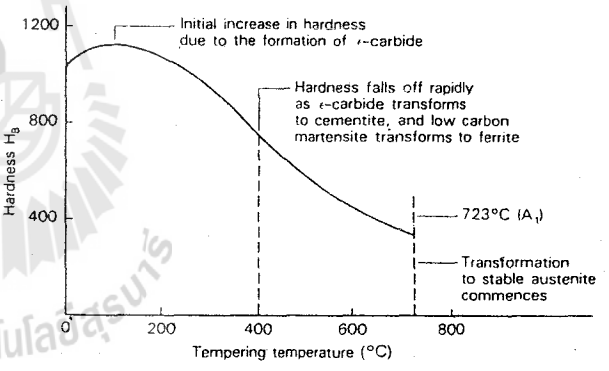
การทำ tempering เหล็กกล้าภายหลังชุบแข็ง เป็นการปรับปรุงโครงสร้างที่เกิดจากการชุบแข็ง(hardening) โดยการอบให้ความร้อนเหล็กกล้าที่อุณหภูมิระหว่าง 250° ถึง 650°C ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ต้องการภายหลัง tempering และไม่ว่าจะใช้อุณหภูมิเท่าใดก็ตาม กระบวนการ tempering จะช่วยให้โครงสร้างจุลภาพจากการชุบแข็งเปลี่ยนกลับไปสู่โครงสร้างที่ได้จากการเย็นตัวอย่างสมดุลย์ (equilibrium transformation) นั่นคือ ทำให้ martensite กลับไปเป็น ferrite และ cementite (Fe_3C)

รูป 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง คุณสมบัติทางกลกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำ tempering เราสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กกล้า(0.83%C) ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆได้ดังนี้:- (รูป 2.15)



The relationship between mechanical properties and tempering temperature for a steel containing 0.5% carbon and 0.7% manganese in the form of a bar 25mm diameter, previously water quenched from 830°C.

รูป 2.14: Mechanical properties VS tempering temp.



Effect of tempering on hardness for a 0.83 per cent carbon steel

รูป 2.15: **อิทธิพลของอุณหภูมิอบที่มีต่อความแข็งของ** 0.83%C steel

ที่อุณหภูมิระหว่าง 100°ถึง 200°C, carbon จะแยกตัวออกจาก martensite ออกมาอยู่ในรูปของ เหล็กคาร์ไบด์ (iron carbide) ที่เรียกว่า epsilon carbide (ε -carbide – Fe_5C_2) ซึ่งมีความแข็งสูง ส่วน martensite จะมีคาร์บอนลดลง(เหลือประมาณ 0.3%C) จะเห็นได้จากรูป 2.15 ว่าเส้นโค้งความแข็งจะเพิ่มขึ้นในตอนแรก แล้วจะค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิอบสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าการเพิ่มขึ้นของความแข็ง (เนื่องจาก ε -carbide) เกิดขึ้นน้อยกว่าการอ่อนตัวลงของ martensite (เนื่องจากเสียคาร์บอน)

ที่อุณหภูมิ 400°C, ε -carbide จะเริ่มกลายเป็น Fe_3C ในขณะเดียวกัน martensite ซึ่งมีคาร์บอนอยู่น้อยก็เริ่มเปลี่ยนเป็น ferrite ทำให้ความแข็งของเหล็กกล้าลดลงแต่ ความเหนียวและ ductility สูงขึ้น

ถ้าใช้อุณหภูมิอบสูงขึ้น จนเกือบถึง A_1 (723°C) การเกิด Fe_3C จะเหมือนกับที่เกิดในการทำ spheroidising annealing ด้วยเหตุนี้เองจึงมักนิยมใช้วิธีชุบแข็ง(quenching)และการอบคืนตัว(tempering) แทนการทำ spheroiding annealing

ตามปกติ การทำ tempering เหล็กกล้าคาร์บอน หรือ เหล็กกล้าโลหะผสม (alloy steels) ใช้อุณหภูมิอบต่ำกว่า 300 °C เพราะต้องการให้เหล็กกล้าคงความแข็งจากการชุบไว้ เพื่อให้ทนต่อการสึกหรอได้ดี ในตาราง 2.1 แสดงตัวอย่าง อุณหภูมิสำหรับทำ tempering เครื่องมือ (tools) และชิ้นส่วนเครื่องกลต่างๆ(mechanical parts)

ที่ช่วงอุณหภูมิของการอบเช่นนี้ เราเรียก bainite ที่เกิดขึ้นว่า secondary troostite (หรือ troostite) เพราะต้องการให้แตกต่างจาก bainite ที่เกิดจากการชุบแข็ง (quenching)คือ primary troostite (หรือ bainite) และที่อุณภูมิ tempering สูง เช่น ที่ 500 °C, cementite จะรวมเป็นก้อน อยู่ในพื้นของ ferrite โครงสร้างนี้เกิดจากการทำให้ martensite คืนตัว(tempering) และ ถูกเรียกว่า sorbite ในปัจจุบันนี้ นักโลหะวิทยาไม่ใช้คำว่า troostite และ sorbite อีกต่อไปแล้ว แต่เรียกเป็น tempered martensite และ bainite แทน

ตาราง 2.1: อุณหภูมิสำหรับการอบคืนตัว

Colour*	Equivalent temperature (°C)	Application
Very light straw	220	Scrapers; lathe tools for brass.
Light straw	225	Turning tools; steel-engraving tools.
Pale straw	230	Hammer faces; light lathe tools.
Straw	235	Razors; paper cutters; steel plane blades.
Dark straw	240	Milling cutters; drills; wood-engraving tools.
Dark yellow	245	Boring cutters; reamers; steel-cutting chisels.
Very dark yellow	250	Taps; screw-cutting dies; rock drills
Yellow-brown	255	Chasers; penknives; hardwood-cutting tools.
Yellowish brown	260	Punches and dies; shear blades; snaps.
Reddish brown	265	Wood-boring tools; stone-cutting tools.
Brown-purple	270	Twist drills.
Light purple	275	Axes; hot setts; surgical instruments.
Full purple	280	Cold chisels and setts.
Dark purple	285	Cold chisels for cast iron.
Very dark purple	290	Cold chisels for iron; needles.
Full blue	295	Circular and band saws for metals; screwdrivers.
Dark blue	300	Spiral springs; wood saws.

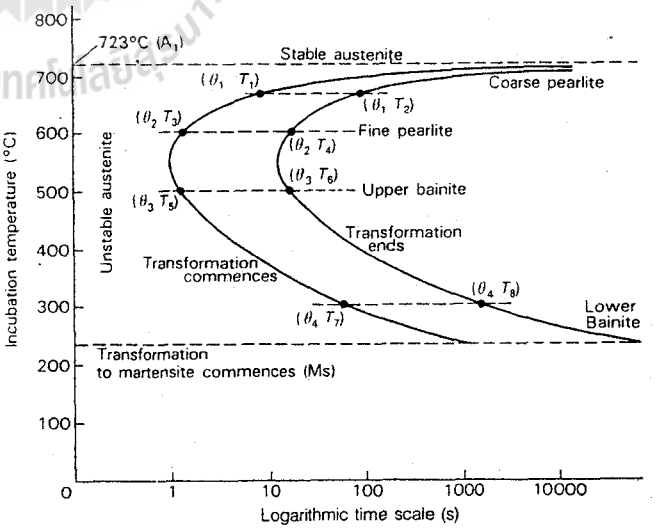
*Appearance of the oxide film that forms on a polished surface of the material as it is heated.

1.14 การเปลี่ยนแปลงเฟสที่อุณหภูมิคงที่

(Isothermal transformation): จากที่กล่าวมาในเรื่อง การชุบแข็ง และการอบคืนตัวของเหล็กกล้า จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาพหรือการเปลี่ยนเฟสขึ้นอยู่กับ **อุณหภูมิ**ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง และ**ระยะเวลา**ที่เหล็กกล้าอยู่ที่อุณหภูมิดังกล่าว เพราะฉะนั้นถ้าหากเราทราบความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ, เวลา, และ โครงสร้างจุลภาพของเหล็กกล้าแต่ละชนิด เราก็สามารถที่จะควบคุมคุณสมบัติของชิ้นงานจากการอบชุบโลหะได้ง่ายยิ่งขึ้น.

ในวิชาโลหะวิทยา มีแผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์ที่ว่านี้ เรียกว่า Time-temperature-transformation diagram หรือ เรียกสั้นๆว่า TTT diagram (TTT-curve หรือ S-curve) ดังตัวอย่างในรูป 2.16 ซึ่งเป็น TTT-curve ของเหล็กกล้า 0.83 %C แผนภาพชนิดนี้เป็นคุณลักษณะเฉพาะของเหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กกล้าโลหะผสมแต่ละชนิด เพราะฉะนั้นจึงใช้ได้กับเหล็กกล้าอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น

ก่อนที่จะกล่าวถึงการใช้งาน TTT-curve เราควรจะเข้าใจเกี่ยวกับวิธีการสร้าง TTT-curve เสียก่อน



Typical time-temperature transformation (TTT) curves for a plain carbon steel

รูป 2.16: TTT diagram ของเหล็กกล้า 0.83%C

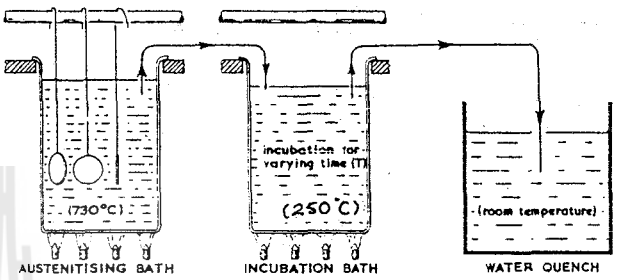
การสร้าง TTT diagram ของเหล็กกล้าชนิดหนึ่ง (สมมุติว่าเป็น 0.83%C steel) มีขั้นตอนดังนี้:- (รูป 2.17)

(1) เตรียมชิ้นงานทดสอบ หรือ specimens จำนวนมาก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 mm หนา 1.5 mm

(2) จุ่มชิ้นงานทดสอบลงในอ่างเกลือ(salt bath)ซึ่งมีอุณหภูมิ เหนือ A_1 (หรือ A_3 หรือ A_{cm} ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กกล้า) เพื่อให้ชิ้นงานทดสอบทุกชิ้นเป็น austenite เราเรียกอ่างเกลือนี้ว่า austenising bath

(3) นำชิ้นงานทดสอบส่วนหนึ่งจาก austenising bath ชุบลงในอ่างเกลือที่เรียกว่า incubation bath ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า 723°C เช่นถ้าต้องการศึกษาการเกิด bainite ที่อุณหภูมิ 250°C, อุณหภูมิของอ่างเกลืออ่างนี้จะถูกควบคุมให้อยู่ที่ 250°C

(4) นำชิ้นงานทดสอบออกจาก incubation bath แล้วชุบน้ำทีละชิ้น โดยที่ชิ้นงานทดสอบแต่ละชิ้นมีเวลาอยู่ใน incubation bath แตกต่างกัน ที่ทำเช่นนี้เพื่อให้ austenite ที่ยังเปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างอื่นไม่หมดในขณะที่อยู่ใน incubation bath หยุดการเปลี่ยนแปลง โดยการชุบน้ำเพื่อให้ austenite ที่เหลือกลายเป็น martensite (รูป 2.18)



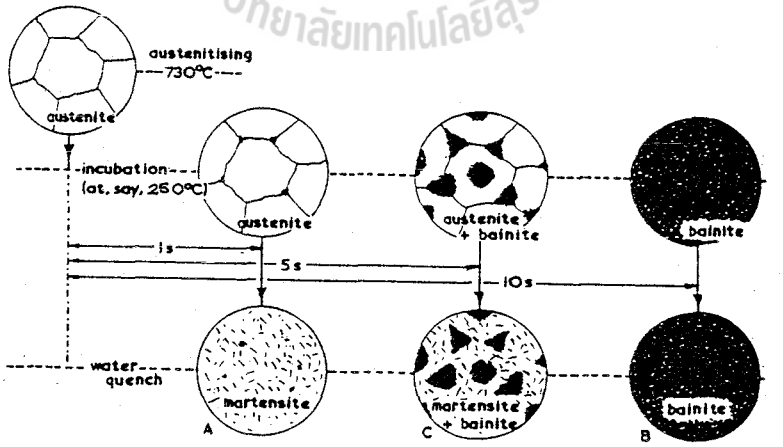
The thermal treatment sequence for the derivation of a TTT diagram. The specimens are of roughly the dimensions of a British 1p piece or an American dime coin.

รูป 2.17: แสดงลำดับการชุบชิ้นงานทดสอบ

(5) ขัดชิ้นงานทดสอบ และ กัดด้วยกรด แล้วตรวจดูโครงสร้างจุลภาพของชิ้นงานทดสอบแต่ละชิ้น เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของ austenite เป็นโครงสร้างอื่นขณะอยู่ที่อุณหภูมิของ incubation bath ที่กำหนด แล้วบันทึกค่าสัดส่วนของ austenite ที่เปลี่ยนแปลงไป

(6) ทำขั้นตอนที่ 3 ใหม่สำหรับ อุณหภูมิอื่นตั้งแต่ มากกว่า 250°C จนเกือบถึง 723°C (เช่น ที่อุณหภูมิ θ_1, θ_2, θ_3,... เป็นต้น) จะได้เปอร์เซ็นต์ต่างๆของการเปลี่ยนแปลง austenite เช่น T_1, T_2, T_3,....เป็นต้น และเวลา

(7) นำเวลา และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของ austenite เป็นโครงสร้างต่างๆมาพล็อตเป็น S-cure ดังในรูป 2.16



The extent of transformation during incubation.

รูป 2.18: แสดงการเปลี่ยนแปลงใน incubation bath

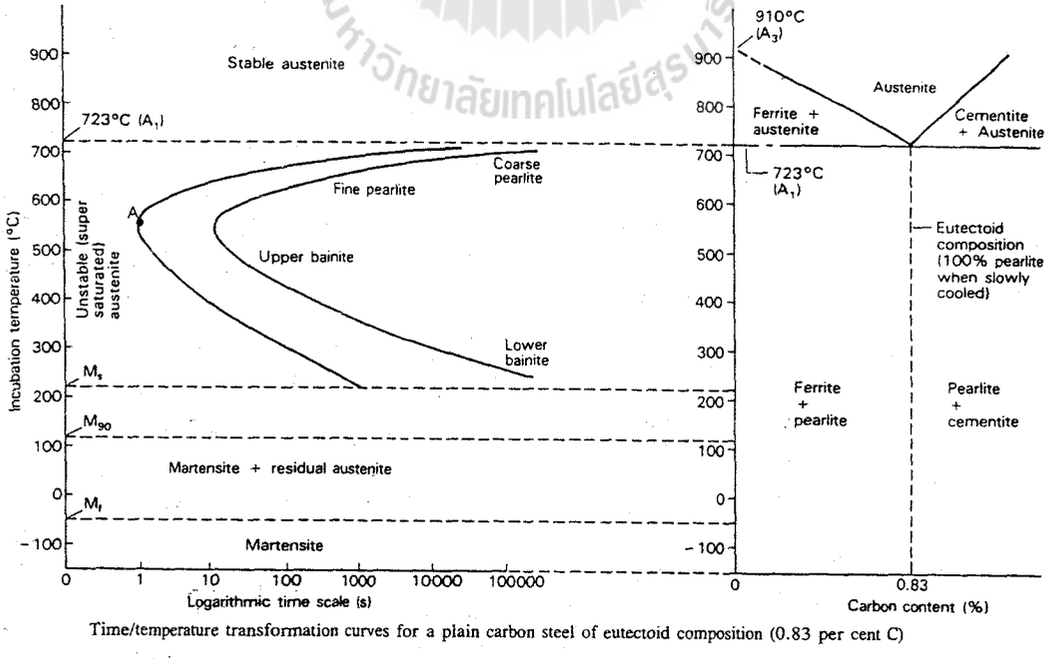
1.16 **ความหมายของ TTT diagram:** ในรูป 2.19 เป็น TTT diagram ของเหล็กกล้า eutectoid (0.83%C) ที่อุณหภูมิเหนือ 723°C เหล็กล้ามีเฟสเป็น austenite หมด ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่านี้ austenite ไม่เสถียร (unstable) และมีแนวโน้มที่จะกลายเป็นเฟสอื่น เส้นโค้ง 2 เส้นใน diagram แสดงจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของการเปลี่ยนเฟสของ austenite

ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 723°C**เสถียร**ภาพของ austenite จะลดลง ดังจะเห็นได้จากระยะเวลาที่ austenite ใช้ในการเริ่มต้นเปลี่ยนเฟสจะน้อยลงไปเรื่อยๆเมื่ออุณหภูมิต่ำลง จนกระทั่งถึงอุณหภูมิประมาณ 550°C austenite จะใช้เวลาสั้นที่สุดก่อนจะเริ่มเปลี่ยนเฟส (จุด A ห่างจากแกนตั้งน้อยที่สุด) ช่วงอุณหภูมินี้ austenite จะเปลี่ยนเป็น pearlite จาก pearlite หยาบ (ที่อุณหภูมิสูง – ต่ำกว่า 723°C) จนถึง pearlite ละเอียด (ที่อุณหภูมิต่ำ – ประมาณ 550°C)

ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 550°C, ถึงแม้ว่า austenite จะมีเสถียรภาพน้อยลงกว่าเดิม แต่ที่อุณหภูมิต่ำการแพร่ (diffusion) ของ carbon จาก austenite เกิดขึ้นช้า และมีผลกระทบต่อการเริ่มต้นเปลี่ยนเฟสของ austenite มากกว่าเสถียรภาพของ austenite .เพราะฉะนั้น ระยะเวลาในการฟักตัว(incubation period)ของ austenite ก่อนกลายเป็นโครงสร้างอื่นจึงมากขึ้น

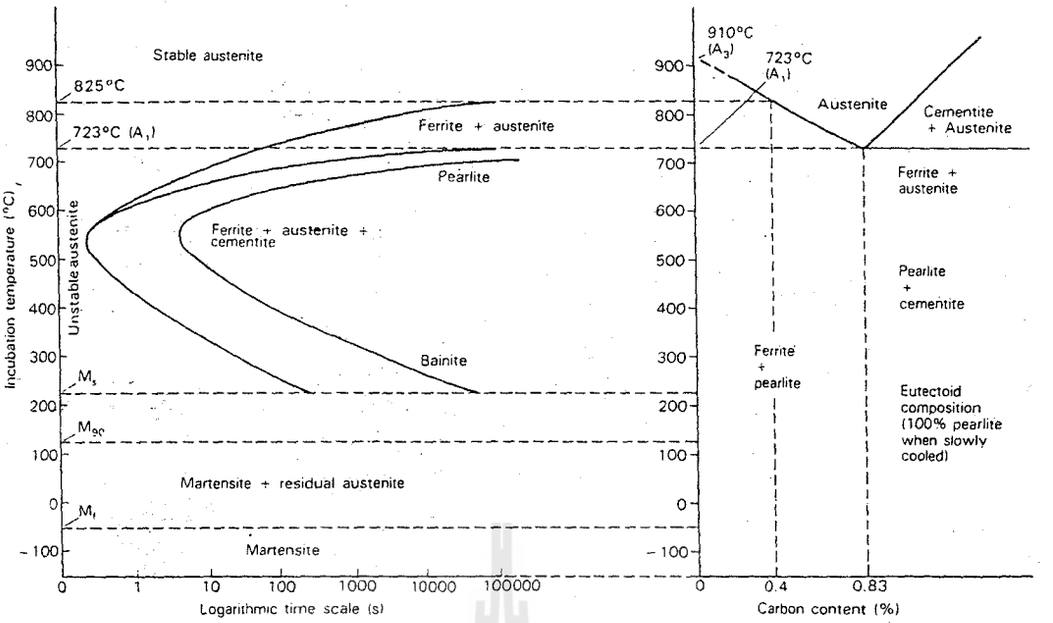
ในการเปลี่ยนเฟสของ austenite เป็น ferrite และ Fe_3C ที่อุณหภูมิสูงกว่า 550°C (หรือที่เรียกว่า pearlite), Fe_3C จะเกิดขึ้นก่อน แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 550°C,ferrite จะเกิดขึ้นก่อนแล้วตามด้วย Fe_3C ซึ่งเราเรียกโครงสร้างนี้ว่า upper bainite และเรียกโครงสร้างที่เกิดด้วยกลไกเช่นเดียวกันนี้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า (เช่น ที่ประมาณ 200°C) ว่า lower bainite

ถ้าหากอุณหภูมิของ austenite ลดต่ำลงมาอย่างรวดเร็ว จนเกินกว่า pearlite และ bainite จะเกิดได้ทัน โครง - สร้างที่ได้คือ martensite ในรูป 2.19 M_s, M_{90} , และ M_f หมายถึงอุณหภูมิที่ martensite เริ่มเกิด, เกิดได้ 90 %, ยุติการเกิด ตามลำดับ (อันที่จริง เส้น 'M' เหล่านี้ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่ง TTT diagram แต่ถูกเพิ่มเติมเข้าไปภายหลัง เพื่อแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างทั้งหลายที่เกิดจาก austenite) จะเห็นได้ว่า M_f อยู่ที่ –50 C เพราะฉะนั้น ถ้าชุบเหล็กกล้าให้เย็นตัวลงมาถึงอุณหภูมิห้อง จะมีโครงสร้างที่เกิดจาก austenite ตกค้าง (retained autenite)ให้เห็น



Time/temperature transformation curves for a plain carbon steel of eutectoid composition (0.83 per cent C)

รูป 2.19: TTT diagram **ของเหล็กกล้าคาร์บอน** 0.83%C



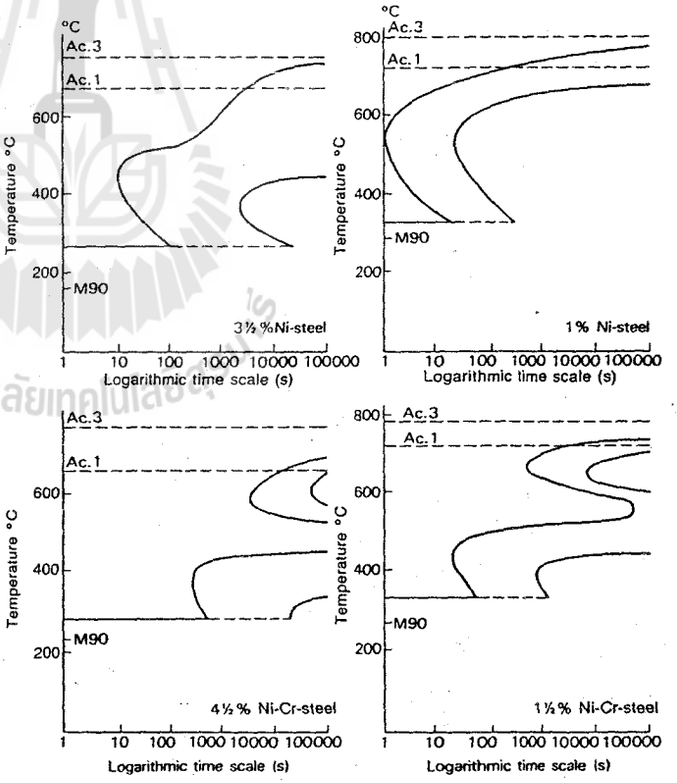
Time/temperature transformation curves for a plain carbon steel of 0.4 per cent carbon content

รูป 2.20: TTT diagram ของเหล็กกล้า 0.4 %C

รูป 2.20 เป็น TTT diagram ของเหล็กกล้า 0.4%C (hypo-eutectoid steel) มีเส้นที่แสดงการเกิดเฟสของ ferrite และตัวเส้นโค้งจะขยับไปทางด้านซ้าย ทำให้จมูก(nose) ของเส้นโค้งเข้าใกล้แกนดิ่งมากกว่า ของเหล็กกล้ายูเท็คตอย การชุบแข็งจะต้องกระทำด้วยความรวดเร็ว ถ้าช้าจะเกิด pearlite ขึ้นทันที

ถึงแม้ว่าจะสามารถทำให้เหล็กกล้าเย็นตัวลงมาอย่างรวดเร็วจนเกิด martensite ได้ แต่การเย็นตัวเร็วเช่นนั้น จะทำให้ชิ้นงานแตกหรือบิดตัว ทำให้เกิดความเสียหายได้

มีธาตุโลหะผสมบางชนิดที่มีผลต่อรูปร่างและ ตำแหน่งของ TTT-curve ของเหล็กกล้า ตัวอย่างเช่น Ni, Cr, และ Mo ซึ่งมีอิทธิพลต่อ TTT diagram ดังในรูป 2.21 ทุกแผนภาพ (ยกเว้น Ni-steel) มีเส้นโค้งขยับไปทางขวา หรือ มี austenite อยู่ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะทำให้ชุบแข็งได้ง่ายขึ้น และชิ้นงานมีโอกาสแตกหรือบิดตัวน้อยลง

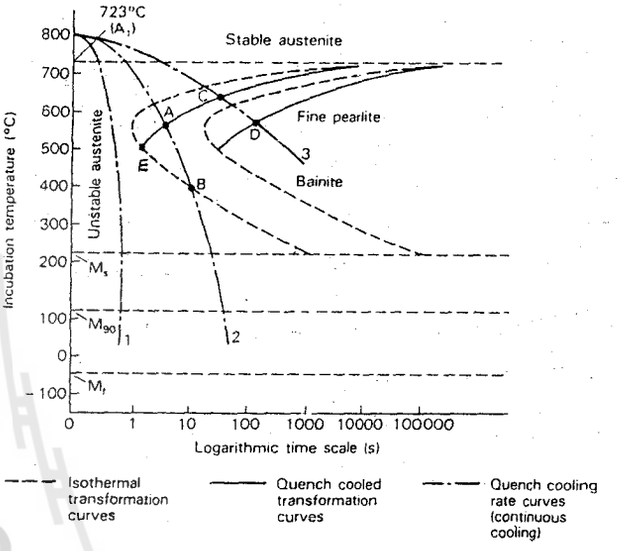


Some typical time/temperature transformation curves for alloy steels

รูป 2.21: TTT diagram ของเหล็กกล้า ~~0.4%C~~

1.17 TTT diagram **กับ การชุบแข็ง** : TTT diagram แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสของ austenite ที่อุณหภูมิคงที่ (isothermal transformation) แต่ในการเย็นตัวของเหล็กกล้าด้วยการชุบในน้ำหรือน้ำมัน จะไม่มีสภาพของการเปลี่ยนเฟสเหมือนกับที่เกิดใน TTT diagram เพราะว่า เหล็กกล้าที่ถูกชุบในสารตัวกลาง จะมีอุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่อง เพราะฉะนั้นการเปลี่ยนแปลง austenite จึงเกิดขึ้นในขณะที่เหล็กกล้ากำลังเย็นตัว (ไม่ใช่ที่อุณหภูมิคงที่) ถ้าจะให้ TTT diagram สามารถใช้กับการเย็นตัวได้ จะต้องสร้าง TTT diagram โดยมีอัตราการเย็นตัวมาเกี่ยวข้อง ซึ่ง diagram ที่ว่านี้ ปรากฏว่าเมื่อสร้างขึ้นมาแล้ว จะมีลักษณะคล้ายกับ TTT diagram มาก ผิดกันที่เส้นโค้งของ TTT diagram ใหม่จะขยับไปทางด้านขวามือเล็กน้อย ดังแสดงในรูป 2.22 เป็นเส้นเต็ม (แทนเส้นประของ diagram เดิม) เราเรียก diagram เช่นนี้ว่า modified TTT diagram

ในรูป 2.22 เส้นอัตราการเย็นตัว (cooling curve) หมายเลข 1, 2, และ 3 แสดงการเย็นตัวของเหล็กกล้า 0.83%C ด้วยอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน หมายเลข 1 มีอัตราการเย็นตัวสูงสุด เช่นชุบเหล็กกล้าลงในน้ำ ในกรณีนี้ bainite และ pearlite จะไม่เกิด แต่จะเกิด martensite และ ถ้าชิ้นงานมีอุณหภูมิลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง martensite ก็จะเกิดขึ้นต่อไป จนกระทั่งถึง –50°C, autenite จะกลายเป็น martensite หมด แต่ตามปกติแล้วเหล็กกล้าจะเย็นตัวลงมาถึงอุณหภูมิห้องเท่านั้น เพราะฉะนั้น austenite 90% เท่านั้นที่สามารถเปลี่ยนเป็น martensite ได้ ที่เหลือจะเป็น retained austenite ดังได้กล่าวมาแล้ว



รูป 2.22: TTT diagram **และ** cooling curves

จุด E ในรูป 2.22 เป็นจุดที่อยู่ปลายจมูกของ S-curve ถ้าหากมีเส้น cooling curve ที่เกือบสัมผัสกับจุด E เส้น cooling curve เส้นนั้น ก็คือเส้นที่แสดงอัตราการเย็นตัวต่ำที่สุด ที่ทำให้ austenite เป็น martensite เราเรียกอัตราการเย็นตัวนี้ว่า **อัตราการเย็นตัววิกฤติ** (critical cooling rate)

ในการชุบแข็งชิ้นงานหนาๆ ที่ผิวงานอาจมีอัตราการเย็นตัวตามเส้น cooling curve หมายเลข 1 แต่ภายในอาจมีอัตราการเย็นตัวตามเส้นหมายเลข 2 ผลที่ได้ ก็คือภายนอก เป็น martensite ส่วนข้างในเป็น martensite + bainite

สำหรับเส้นอัตราการเย็นตัวหมายเลข 3 เป็นเส้นที่แสดงอัตราการเย็นตัวที่เกิดขึ้นในการทำ normalising (เย็นในอากาศ) ซึ่งการเปลี่ยนเฟสของ austenite เริ่มต้นจากการเปลี่ยนเป็น pearlite ละเอียดที่จุด C แล้วสิ้นสุดลงตรงที่เกิดเป็น upper bainite ที่จุด D จะไม่มี martensite เกิดขึ้น เพราะaustenite เปลี่ยนเป็น pearlite และ bainite จนหมด

1.18 Hardenability : hardenability เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของเหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กกล้าโลหะผสม, hardenability ของเหล็กกล้าชนิดหนึ่ง หมายถึง การที่เหล็กกล้าชนิดนั้นเกิดความแข็งจากการอบชุบได้สม่ำเสมอกันตลอดหน้าตัดของเหล็กกล้า ได้มาก-น้อยเพียงใด

เหล็กกล้าคาร์บอนมี hardenabilityไม่ดี (poor hardenability) เพราะว่า เหล็กกล้ามี critical cooling rate สูง ดังนั้น ถ้าหากนำเหล็กกล้า เช่น 0.45%C ไปชุบแข็ง ความแข็งสูง จะเกิดตรงบริเวณใกล้ผิวเท่านั้น ส่วนภายในไม่แข็ง เราเรียกลักษณะของความไม่สม่ำเสมอกันในความแข็งตลอดหน้าตัดชิ้นงานว่า mass effect (รูป 2.23)

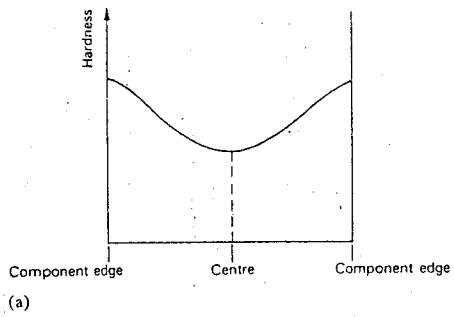
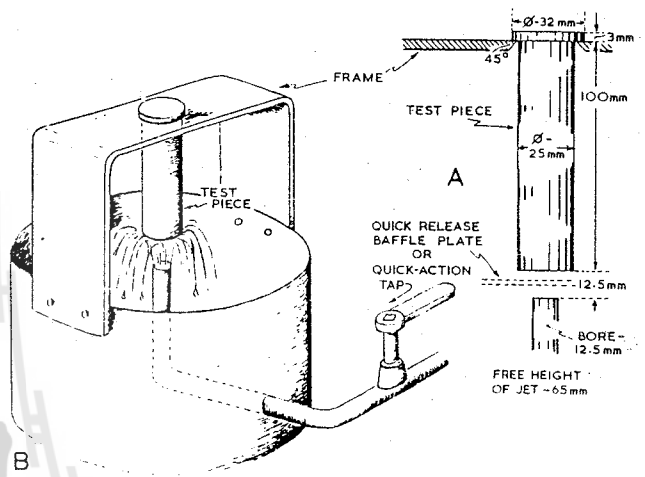


Fig. 2.11 Mass effect (hardenability) (*a*) cross-section hardenability of a plain carbon steel (*b*) effect of hardenability on structure

รูป 2.23: Mass effect

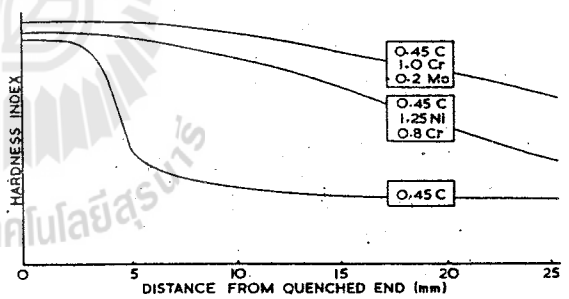
การทดสอบ hardenability ของเหล็กกล้า ใช้วิธีการทดสอบที่เรียกว่า Jominy (end quench) test (รูป 2.24) ซึ่งมีวิธีทดสอบคือ ให้ความร้อนชิ้นงานทดสอบขนาดมาตรฐาน (เส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm, ยาว 100 mm) จนเป็น austenite หมด แล้วใช้น้ำพ่นที่ปลาย เมื่อชิ้นงานเย็นลง วัดความแข็งที่ปลายด้านที่ถูกพ่นด้วยน้ำ จากนั้นเจียรนัยผิวที่ปลายออก 3 mm แล้ววัดความแข็งที่ปลายทุกๆ 3 mm ที่เจียรนัยออก แล้วจึงพล็อตค่าความแข็งที่วัดได้แต่ละจุดกับระยะทางจากปลายชิ้นงานทดสอบ จะได้เส้น curve ดังตัวอย่างในรูป 2.25



The Jominy end-quench test.
(A) The standard form of test piece used. (B) A simple type of apparatus for use in the test

รูป 2.24: Jominy test

จากเส้น curve ของเหล็กกล้า 3 ชนิด จะเห็นได้ว่า low-alloy steels ที่มีส่วนผสม 1%Cr, 0.2%Mo และ ส่วนผสม 1.25%Ni, 0.8%Cr ต่างก็มีความแข็งตลอดหน้าตัดสม่ำเสมอมากกว่า 0.45%C steel เพราะฉะนั้นเหล็กกล้าโลหะผสมจึงมี hardenability ดีกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน



Depth of hardening as indicated by the Jominy Test. These curves indicate that low-alloy steels harden to a greater depth than do plain carbon steels of similar carbon content.

รูป 2.25: **ความลึกของเนื้อชิ้นงานที่แข็งเนื่องจากการชุบแข็ง**

เนื่องจากความแตกต่างในขนาดของชิ้นงาน (mass effect) ทำให้ยากแก่การกำหนดคุณภาพของเหล็กกล้าภายหลังการอบชุบ ดังนั้นจึงใช้วิธีกำหนด **ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหน้าตัดกลมที่ใหญ่ที่สุด ที่สามารถทำให้เกิดคุณสมบัติทางกลภายหลังการอบชุบได้ตามที่กำหนด** และเรียกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางนี้ว่า ruling section

ในตาราง 2.2 แสดงตัวอย่างของ ruling section ของเหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าโลหะผสม ตามมาตรฐานอังกฤษ

ตาราง 2.2: Ruling sections and Mechanical Properties

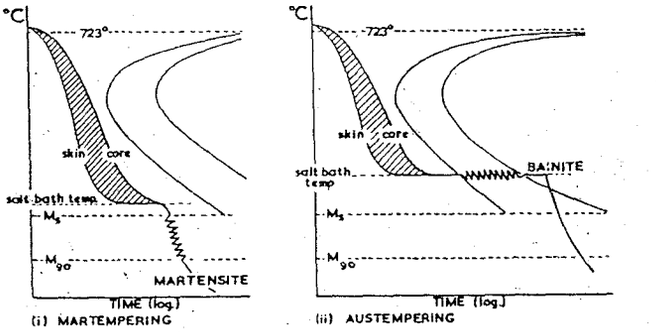
Effect of ruling section on mechanical properties

BS970 Spec	Condition	Limiting ruling section (mm)	Tensile strength (MPa)	Minimum elongation (%)
070M55 (carbon steel)	Hardened and tempered	19	850 – 1000	12
		63	770 – 930	14
		100	700 – 850	14
835M30 (alloy steel)	Hardened and tempered	63	1080 – 1240	11
		100	1000 – 1160	12
		150	930 – 1080	12
		250	850 – 1000	13

1.18 Martempering และ austempering :

❑ Martempering: เป็นวิธีการใช้ TTT diagram วิธีการทำก็คือ ให้ความร้อนแก่เหล็กกล้าจนเป็น austenite หมดทั้งชิ้น แล้วชุบในอ่างเกลือซึ่งมีสูงกว่า M_s เล็กน้อย ชิ้นงานจะอยู่ที่อุณหภูมินี้จนกระทั่งทุกส่วนของชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากันหมด แล้วจึงปล่อยให้ชิ้นงานเย็นในอากาศ (รูป2.26 i)

การที่ต้องให้ชิ้นงานแช่อยู่ที่อุณหภูมิเหนือ M_s ก็เพื่อที่จะให้ทุกส่วนของเหล็กกล้าเป็น austenite ณ. อุณหภูมิที่พร้อมจะเป็น martensite ได้หมด



Isothermal treatments (i) martempering and (ii) austempering. In each case the steel remains in the salt bath for long enough for a *uniform temperature to be attained throughout* before transformation of the unstable austenite begins. This is the most important feature of these processes.

รูป 2.26: Martempering and Austempering

การทำ martenpering มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการแตก, การบิดเสียรูป และการโก่งงอ ของชิ้นงานที่เป็น alloy steel ในขณะชุบแข็ง ชิ้นงานที่ผ่านการทำ martempering แล้ว อาจจะนำไปทำ tempering ตามความเหมาะสม

❑ Austempering: ใช้กับชิ้นงานโลหะผสม (alloy steels) โดยมีเป้าหมายเพื่อลดการแตกร้าวในขณะชุบแข็ง วิธีการคือ ให้ความร้อนชิ้นงานจนเป็น austenite แล้วชุบลงในอ่างเกลือที่มีอุณหภูมิเหนือ M_s เล็กน้อย ให้ชิ้นงานอยู่ที่อุณหภูมินี้จนทุกส่วนมีอุณหภูมิเท่ากันหมด แล้วจึงให้เย็นในอากาศ จะได้โครงสร้างเป็น bainite หมด (รูป2.26 ii)

ข้อดีของ austempering เหนือการชุบแข็งทั่วๆไปก็คือ (1) ไม่ต้องทำ tempering เพราะ ได้โครงสร้าง bainite ที่ไม่เปราะ; (2) ลดการแตกร้าวได้ดีกว่าเพราะชิ้นงานไม่ได้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเหมือนการเกิด martensite; (3) ความเหนียว (toughness) และการยืดตัว (ductility) ดีกว่า ใช้วิธีการชุบแข็งแล้วทำ tempering .

1.20 Case hardening: Case hardening หรือการทำผิวแข็ง หมายถึงการทำให้ชิ้นงานมีความแข็งสูงเฉพาะที่ผิว เพื่อให้สามารถทนต่อการสึกหรอเนื่องจากการเสียดสีได้ดี หรือเพื่อเกิดคุณสมบัติทางกลอื่นๆ ตัวอย่างของชิ้นส่วนเครื่องกลที่ต้องการทำผิวแข็งได้แก่ เฟือง, เพลาหัวเครื่อง(spindle), สปลาย (spline), และ แคม(cam) เป็นต้น

เหล็กกล้ามีคาร์บอนผสมอยู่มาก (ประมาณ 0.35 – 0.5%) หรือเป็นเหล็กกล้าโลหะผสม(alloy steels) สามารถทำผิวให้แข็งได้ง่าย เพราะเพียงแต่ให้ความร้อนแก่ผิวงานจนเป็น austenite แล้วชุบในน้ำหรือน้ำมัน ผิวงานจะแข็งทันที เราเรียกวิธีชุบแข็งเช่นนี้ว่า surface hardening (จะกล่าวถึงในภายหลัง)

ส่วนเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนต่ำ เช่น low-carbon steels (carbon ต่ำกว่า 0.3%) ไม่สามารถชุบผิวให้แข็งได้โดยตรง จะต้องได้รับการเพิ่มธาตุคาร์บอนที่ผิวเสียก่อน เราเรียกวิธีเพิ่มธาตุคาร์บอนนี้ว่า carburising

การทำ carburising เป็นการให้ความร้อนเหล็กกล้าขณะที่ถูกปกคลุมด้วยสารเพิ่มคาร์บอน (carburising compound) จนกระทั่งเหล็กกล้าเป็น austenite (900° – 950°C) แล้วให้เวลาอะตอมของคาร์บอนแพร่เข้าไปในผิวชิ้นงาน เนื่องจากการทำ carburising มีการใช้สารเพิ่มคาร์บอนหลายแบบ ทำให้เกิดชื่อเรียกแตกต่างกันดังนี้

- Solid carburising: อบเหล็กกล้าในกล่องทนไฟ ภายในบรรจุถ่านจากกระดูกหรือหนังสัตว์ และมี barium carbonate เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้เวลาอบประมาณ 5 ชั่วโมง
- Liquid carburising: ให้ความร้อนชิ้นงานในอ่างสารละลายของ sodium cyanide และ sodium carbonate วิธีนี้ความปลอดภัยในขณะทำงานเป็นเรื่องสำคัญเพราะโอกาสที่จะสัมผัสกับcyanide ซึ่งเป็นสารพิษในกระบวนการผลิต

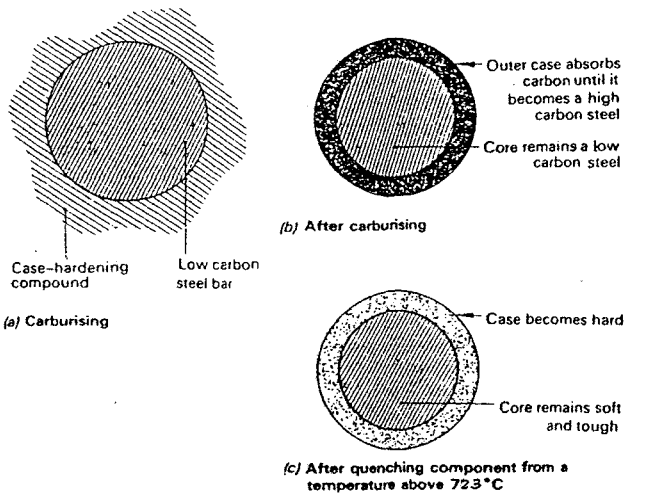
- Gas carburising: ใช้สารปกคลุมเป็น แก๊ส ที่ใช้กันมากคือ methane (CH_4) และ propane (C_3H_8)

ภายหลังจากการทำ carburising แล้ว ต้องนำไปชุบแข็ง(เฉพาะที่ผิว) แต่เนื่องจากความแตกต่างกันของปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ผิวและภายในชิ้นงาน ทำให้ต้องใช้การอบชุบผิวแข็ง เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ :-

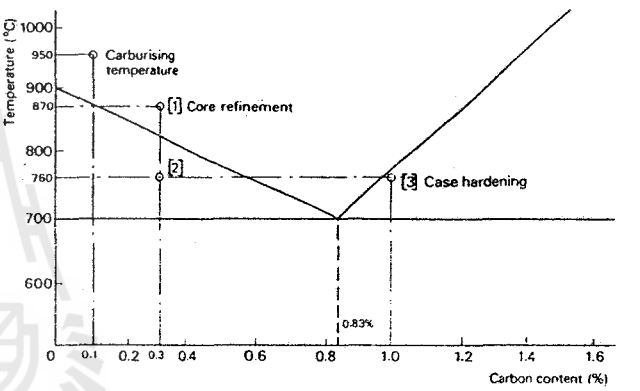
(1) Refining the core: เป็นการอบเพื่อปรับขนาดของเกรนที่อยู่ภายในชิ้นงานเหล็กกล้า ทั้งนี้เพราะว่า ในการทำ carburising ชิ้นงานจำเป็นต้องอยู่ที่อุณหภูมิสูง (austenite temperature) เป็นเวลานาน เกรนภายในมีเวลาเติบโตมาก จึงมีเกรนหยาบ และมีความแข็งแรงต่ำ ดังนั้นจึงต้องทำการอบเพื่อปรับขนาดเกรนดังกล่าว สมมุติว่า ชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าชนิดคาร์บอนต่ำ มีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.3% และหลังจากการทำ carburising แล้ว ที่ผิวอาจมีคาร์บอนได้ถึง1% (ดูรูป 2.27 a และ b) ในการอบปรับขนาดเกรนจะต้องใช้อุณหภูมิ เหนือเส้น A_3 เล็กน้อย (ประมาณ 820+50 = 870°C) ดังในรูป 2.28 หลังจากนั้นชุบน้ำ (เพื่อให้แน่ใจได้ว่าภายในเป็นเกรนละเอียด) ขณะที่ชุบน้ำ ผิวนอกมีอุณหภูมิ 870°C แต่อุณภูมิชุบแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน 1%C ที่เหมาะอยู่ที่760°C (โดยประมาณ) เพราะฉะนั้นที่ชุบจาก 870°C จึงสูงเกินไปสำหรับเหล็กกล้า 1%C เล็กน้อย ทำให้ผิวที่ชุบแข็งแล้วเกิดเกรนหยาบ ดังนั้นจึงต้องอบปรับขนาดเกรนเฉพาะที่ผิวต่อไป

(2) Refining the case: อบที่อุณหภูมิเหนือ A_1 เล็กน้อย ที่ 760°C (รูป 2.28) แล้วชุบน้ำทันที จะได้โครงสร้างที่ผิวเป็น martensite ละเอียด (รูป 2.27 c)

(3) Tempering: โดยอบที่อุณหภูมิประมาณ 200 – 220°C เพื่อลดความเปราะของ martensite.

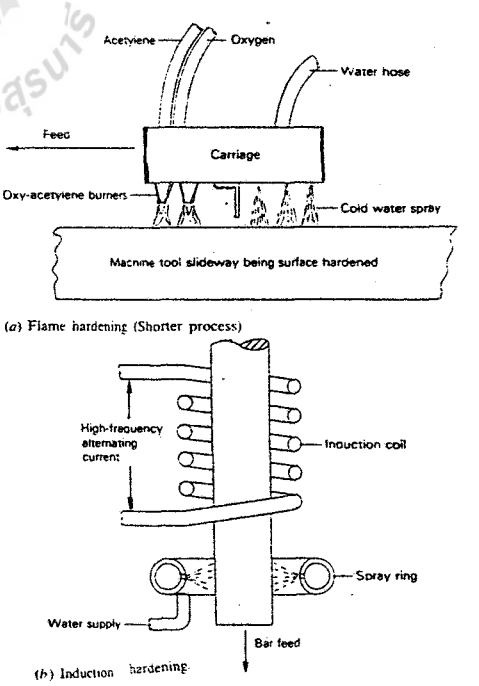


รูป 2.7: Carburising



รูป 2.8: Case-hardening temperature

1.21 **การชุบผิวแข็ง**(surface hardening): เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนตั้งแต่ปานกลางขึ้นไปถึงคาร์บอนสูง และเหล็กกล้าโลหะผสม เป็นเหล็กกล้าที่สามารถนำมาชุบแข็งได้ โดยให้ความร้อนแก่ผิวชิ้นงานจนกระทั่งผิวชิ้นงานเป็น austenite แล้วให้เย็นตัวทันที (เช่นใช้น้ำพ่น) จะได้โครงสร้างที่แข็งของ martensite



รูป 2.9: flame and induction hardening

การให้ความร้อนที่ผิว ทำได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันก็คือ ใช้เปลวไฟจากแก๊ส เรียกว่า flame hardening; และใช้ความร้อนจากการเหนี่วนำไฟฟ้า เรียกว่า induction hardening (รูป 2..9)

นอกจากธาตุคาร์บอนแล้ว ไนโตรเจน (nitrogen) ก็มีบทบาทสำคัญต่อการทำผิวแข็งเหมือนกัน เพราะไนโตรเจนสามารถรวมกับเหล็กเป็น iron nitride ซึ่งมีความแข็งสูง เราเรียกวิธีการทำผิวแข็งด้วยวิธีนี้ว่า nitriding

การทำ nitriding เป็นการให้ความร้อนแก่เหล็กกล้าในบรรยากาศของ ammonia ที่อุณหภูมิประมาณ 500°C เป็นเวลาหลายชั่วโมง (มากกว่า 40 ชั่วโมง) NH_3 จะแยกออกเป็น N รวมกับเหล็กเป็น Fe_4N

ข้อดีของ nitriding คือ:- (1) ชิ้นงานแตกหรือบิดตัวน้อย เพราะใช้อุณหภูมิต่ำ และไม่มีการ quenching; (2) มีความแข็งสูง; (3) ทนต่อ corrosion ได้ดี; (4) คงความแข็งได้ดีถึงอุณหภูมิ 500°C (เหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการทำ case hardening คงความแข็งไว้ได้เพียงที่ 220°C เท่านั้น)

1.22 **เตาอบชุบโลหะ** (heat-treatment furnaces): คุณลักษณะที่ต้องการ ;-

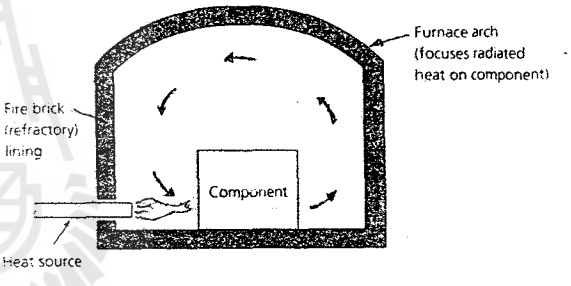
(1) ให้ความร้อนได้สม่ำเสมอทั่วเตา; (2) ควบคุมอุณหภูมิได้เที่ยงตรง;

(3) คงที่อุณหภูมิให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้; (4) ควบคุมบรรยากาศในเตาได้;

(5) ประหยัดเชื้อเพลิงหรือพลังงาน; (6) เสียค่าบำรุงรักษาต่ำ.

เตาอบชุบที่นิยมใช้กันทั่วไปได้แก่

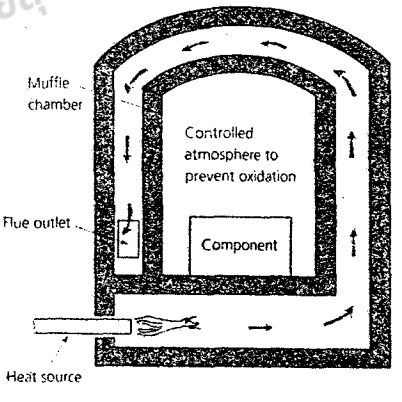
- Open hearth furnace: ลักษณะของเตาแสดงอยู่ในรูป 2.10 ซึ่งใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง **ข้อดี**ของเตาแบบนี้คือ (1) ราคาถูก; (2) ง่ายต่อการใช้และบำรุงรักษา; (3) ประหยัดเชื้อเพลิงเพราะเปลวไฟสัมผัสชิ้นงานโดยตรง.



รูป 2.10: Open hearth furnace

ข้อเสียของเตาคือ (1) ความร้อนไม่สม่ำเสมอ (2) ควบคุมอุณหภูมิได้ยาก; (3) ไม่มีการควบคุมบรรยากาศในเตา

- Muffle furnace: ชิ้นงาน และหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงให้ความร้อน อยู่คนละส่วนในเตา (ดังรูป 2.11) **ข้อดีคือ** (1) ให้ความร้อนได้สม่ำเสมอ; (2) ควบคุมอุณหภูมิได้ดี; (3) รักษาระดับอุณหภูมิได้ดี; (4) ควบคุมบรรยากาศในเตาได้.



รูป 2.11: Muffle furnace

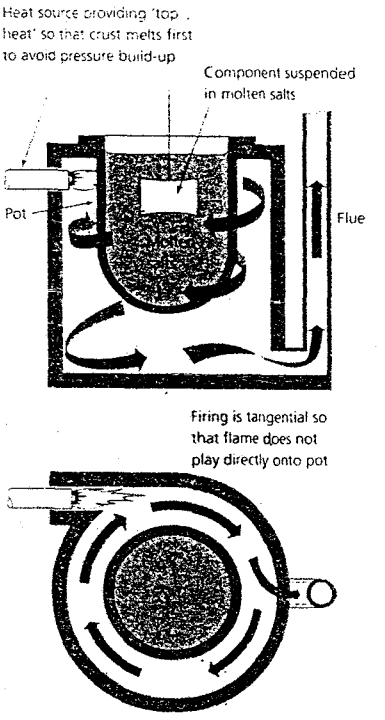
ข้อจำกัดคือ (1) ราคาแพง; (2) บำรุงรักษายากและเสียค่าใช้จ่ายสูง; (3) สูญเสียความร้อนมากและทำให้เตาร้อนช้า

นอกจากเตาแบบใช้แก๊สแล้ว ยังมีเตาแบบใช้ไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นแบบใช้ความร้อนจากเส้นลวดต้านทาน (resistance) หรือแบบใช้ความร้อนจากกระแสเหนี่ยวนำ(induction)

- **เตาอ่างเกลือ** (salt-bath furnace): เป็นเตาสำหรับให้ความร้อนเกลือในอ่างเกลือ อาจเป็นเตาแบบใช้ไฟฟ้าหรือใช้แก๊ส ในรูป 2.12 แสดงการให้ความร้อนด้วยแก๊สเชื้อเพลิง มีข้อสังเกตเกี่ยวกับเตาแบบนี้ดังนี้คือ:- (1) ใช้เปลวไฟเป่าในแนวสัมผัสเพื่อหลีกเลี่ยงการให้ความร้อนแก่อ่างหลอมเกลือโดยตรง; (2) ให้ความร้อนจากด้านบนของอ่าง; (3) ต้องมีการทำ preheat ชิ้นงานหรืออุปกรณ์ที่ต้องใส่ในอ่างชุบ เพื่อให้แห้งจริงๆ

สำหรับเกลือที่ใช้ในอ่างเกลือมีหลายชนิด แบ่งออกกลุ่มใหญ่ๆได้ดังนี้:-

- **เกลือไนเตรต (nitrate-based salts):** ใช้สำหรับอุณหภูมิต่ำ เช่นทำ tempering โลหะพวก ferrous metals หรือ ใช้สำหรับอบชุบโลหะผสมอลูมิเนียม สารละลายชนิดนี้ถ้าให้ความร้อนสูงเกินไปอาจระเบิดได้
- **เกลือคลอไรด์ (chloride-based salts):** ใช้สำหรับอบชุบ ferrous metals ทั่วๆไป เช่น quench hardening, annealing, และ normalising
- **เกลือไซยาไนด์ (cyanide-based salts):** ใช้ทำขอบแข็ง(case-hardening) โลหะพวก low-carbon steels เนื่องจากเกลือชนิดนี้เป็นพิษ ดังนั้นจึงต้องใช้มาตรฐานสูงในการระมัดระวังในขณะทำงาน



ข้อดีของการใช้อ่างเกลือ (1) ชิ้นงานร้อนสม่ำเสมอ; (2) ควบคุมและรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ดี; (3) ไม่ต้องควบคุมบรรยากาศ; **ข้อจำกัด** คือ (1) ไม่ประหยัดเชื้อเพลิง; (2) ต้องมีการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ; (3) ชิ้นงานอาจถูกกัดกร่อนถ้ามีความชื้น หรืออาจเกิดระเบิดได้ถ้าเกลือร้อนเกินไป; (4) เกลือบางอย่างเป็นพิษ และต้องใช้คนงานที่มีความชำนาญสูง

ที่มา:

[1] R A Higgins, Engineering Metallurgy, Part 1: Applied Physical Metallurgy, 6th ed. ELBS with Edward Arnold, 1983.

[2] R A Higgins, Engineering Metallurgy, Part 2: Metallurgical Process Technology, 2th ed. ELBS with Hodder and Stoughton, 1974

[3] R T Timings, Engineering Materials, volume 1 (1989), volume 2 (1991), Longman Science & Technical.

[4] R T Timings, Fundamentals of Engineering, Addison Wesley Longman Limited, 1998.

[5] W G Moffatt et al,The Structure and Properties of Materials, Volume 1 : Structure, Wiley Eastern Private Limited, Delhi, 1964.

หมายเหตุ: หนังสือหมายเลข 1 – 4 มีอยู่ในหอสมุด มทส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก
เหล็กหล่อและกรรมวิธีการอบชุบเหล็กหล่อ

1. **เหล็กหล่อ (cast irons)**

เหล็กหล่อหมายถึงโลหะผสมของเหล็ก, คาร์บอน, ซิลิกอน, แมงกานีส, ซัลเฟอร์, และฟอสฟอรัส โดยมีธาตุโลหะผสมเหล่านี้รวมกันได้ประมาณ 10% ที่เหลือเป็นเหล็ก เหล็กหล่อแตกต่างจากเหล็กกล้า(steels)ตรงที่เหล็กหล่อมีคาร์บอนผสมอยู่มากกว่า 2% ถ้าเหล็กหล่อมีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย เช่น Ni, cr, Mo, V, และ Cu เราเรียกเหล็กหล่อเหล่านี้ว่า "เหล็กหล่อโลหะผสม (alloy cast iron)"

คุณสมบัติที่มีประโยชน์ของเหล็กหล่อคือ:-

(1) สามารถกำหนดส่วนผสมของธาตุโลหะผสมเพื่อให้สามารถทำการตัด-กลึงได้ง่าย(good machinability);

(2) ไหลได้ดีในสภาวะของเหลว(high fluidity) ทำให้สามารถหล่อหลอมเป็นรูปทรงที่ซับซ้อนได้;

(3) มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำ (1130 – 1250°C – ซึ่งต่ำกว่าเหล็กกล้า)

(4) สามารถปรับคุณสมบัติทางกลให้สูงขึ้นได้ด้วยการอบชุบเพิ่มเติม

คุณสมบัติของเหล็กหล่อ เปลี่ยนแปลงได้ด้วย การเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมี และการใช้กรรมวิธีการอบชุบ

1.2 อิทธิพลของธาตุโลหะผสมต่างๆในเหล็กหล่อ:

- Carbon: คาร์บอนอยู่ในเหล็กหล่อได้ 3 รูปคือ (1) ในรูปของสารละลายของแข็ง α -iron หรือ ferrite; (2) ในรูปของ iron carbide (Fe_3C) หรือ cementite และ (3) ในรูปคาร์บอนอิสระ(free carbon) หรือ กราไฟต์ (graphite) ซึ่งจะอยู่ในรูปใดขึ้นอยู่กับ ปริมาณธาตุซิลิกอน , ชนิดและปริมาณของธาตุโลหะผสมอื่นๆ, และ อัตราการเย็นตัว
- Silicon: ละลายใน ferrite ของเหล็กหล่อ เป็นธาตุที่ทำให้เกิดแยกตัวของคาร์บอนออกจาก cementite นอกจากนั้นยังทำให้ ferrite แข็งขึ้น และในขณะเดียวกันก็ทำให้เหล็กกล้าอ่อนลงด้วยเพราะคาร์บอนแยกออกมาจาก Fe_3C แต่ถ้าเหล็กหล่อมี Si มากเกินไป (มากเกินกว่าจำนวนที่ต้องการสำหรับแยกคาร์ไบด์ได้หมด) เหล็กหล่อจะกลับเปราะ ส่วนอิทธิพลด้านอื่น กล่าวได้ว่า Si ทำให้ fluidity ของน้ำเหล็กดี และทำให้เหล็กหล่อมีความแข็งแรงสูงขึ้น
- Sulphur: มีอิทธิพลตรงกันข้ามกับ silicon คือ ทำให้ Fe_3C เสถียร และเหล็กหล่อมีแนวโน้มเกิดเป็น white cast iron แต่เมื่อรวมกับเหล็กเป็น FeS จะทำให้เหล็กหล่อเปราะ .

ในขณะหลอมเหล็กหล่อด้วยเตาคิวโพลา ปริมาณ sulphur จะลดลงเนื่องจากรวมกับ Mn เป็น MnS และเกิด oxide แล้วรวมกับ slag และถูกนำออกจากน้ำเหล็ก แต่ในขณะเดียวกันปริมาณ S ในเหล็กหล่อจะเพิ่มขึ้นจาก S ในถ่านโค๊ก (coke) ซึ่งมีอยู่ในปริมาณที่สูง

- Manganese: เนื่องจาก Mn ช่วยลด S ดังนั้น Mn จึงมีอิทธิพลทางอ้อมในการทำให้เกิด graphite แต่โดยตัวของ Mn เองแล้ว, Mn เป็นธาตุที่ช่วยให้เกิด carbide ถาวร และทำให้เหล็กแข็งขึ้น มีเกรนละเอียดขึ้น และมีความแข็งแรงสูงขึ้น
- Phosphorus: เกิดเป็นโครงสร้างยูเทคติค ในรูป Fe_3P สลับกับ ferrite ในเหล็กหล่อเทา (gray cast iron)และ สลับกับ ferrite และ cementite ในเหล็กหล่อขาว(white cast iron) ซึ่ง โครงสร้างยูเทคติคเช่นนี้มีจุดหลอมเหลวที่ 950° C เท่านั้น ดังนั้นจึงอาจใช้ P ถึง 1% หล่อชิ้นงานบางๆ เพราะมี fluidity ดี อย่างไรก็ตาม ควรหลีกเลี่ยงการหล่อชิ้นงานหนาๆ เพราะ Fe_3P เปราะ และมีความแข็งแรงต่ำ ในชิ้นงานที่ต้องรับแรงกระแทกควรมีธาตุ P ต่ำๆ

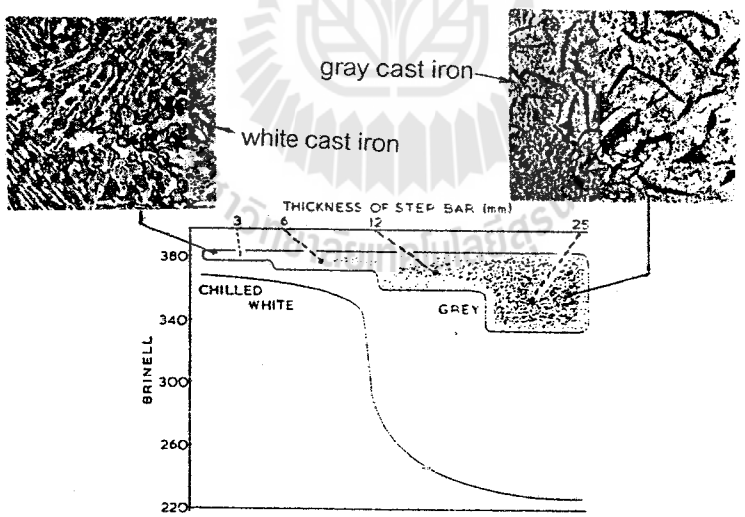
ตาราง 1A แสดงส่วนผสมของเหล็กหล่อสำหรับงานต่างๆ

ตาราง 1A: ส่วนผสมของเหล็กหล่อสำหรับงานทั่วไป

Composition (%)					Applications
C	Si	Mn	S	P	
3.30	1.90	0.65	0.08	0.15	Motor vehicle brake drums
3.25	2.25	0.65	0.10	0.15	Motor vehicle cylinder blocks
3.25	1.75	0.50	0.10	0.35	Medium machine castings
3.25	1.25	0.50	0.10	0.35	Heavy machine castings
3.60	1.75	0.50	0.10	0.80	Light and medium spun cast water pipes
3.50	2.75	0.50	0.10	0.9	Ornamental castings requiring maximum fluidity but only low strength

1.3 **อิทธิพลของอัตราการเย็นตัว** (cooling rates):

สำหรับเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมหนึ่ง อัตราการเย็นตัวยิ่งสูง ก็ยิ่งทำให้เหล็กหล่อที่มีแนวโน้มจะเป็น white iron มากกว่า gray iron นั่นคือเหล็กหล่อจะยิ่งแข็งขึ้นและเปราะขึ้น อิทธิพลเช่นนี้มีผลกระทบต่อการหล่อชิ้นงานบางๆ เพราะแม้ว่าจะพยายามให้อัตราการเย็นตัวในแบบหล่อช้าอย่างไร ก็ไม่อาจป้องกันการเกิด white iron ในส่วนที่บางได้ ดังในรูป 1A จะเห็นได้ว่า ความแข็งของส่วนที่บางสูงกว่าส่วนที่หนากว่า ทั้งนี้คาร์บอนในส่วนที่บางกว่าแยกตัวออกมาจาก austenite ไม่ทัน ทำให้เกิดเป็น cementite ที่มีความแข็งสูง แต่เปราะ ส่วนในหน้าตัดที่หนาจะมีอัตราการเย็นตัวช้ากว่าและเกิดเป็น graphite flake และ พื้นเป็น pearlite



รูป 1A: อิทธิพลของความหนาต่ออัตราการเย็นตัวและโครงสร้าง

1.4 **โครงสร้างจุลภาพในเหล็กหล่อ** (microstructures in cast irons):

- Primary cementite **และ** pearlite: เป็นลักษณะของเหล็กหล่อขาวที่แข็งและเปราะ มี Si ต่ำ, S สูง, เย็นตัวเร็ว; เกิด cementite ที่ประมาณ 1131°C และ austenite เปลี่ยนเป็น pearlite ที่ 723°C
- Primary cementite, graphite **และ** pearlite: นี่คือโครงสร้างของ mottled iron ซึ่งมีบางส่วนเป็น white iron ผสมกับ gray iron
- Graphite **และ** pearlite: คือโครงสร้างของเหล็กหล่อที่ใช้งานหนักทั่วๆไป โครงที่เกิดจากปฏิกิริยา

ยูเทคติค เป็น กราไฟต์-ออสเตไนต์ และออสเตไนต์ เปลี่ยนเป็น pearlite ด้วยปฏิกิริยายูเทคตอยที่ 723°C

- Graphite, pearlite **และ** ferrite: เป็นโครงสร้างของเหล็กหล่อเทาที่มี graphite หยาบ มีความแข็งแรงต่ำและอ่อนกว่าโครงสร้างที่แล้ว เกิดจากการเย็นตัวช้าและมี Si ผสมอยู่มาก ปฏิกิริยายูเทคติค เกิด austenite และ graphite; เมื่ออุณหภูมิต่ำลง carbon บางส่วนแยกออกมาจาก austenite มารวมกับ graphite flake ที่เกิดก่อน เกิดเป็น ferrite และ austenite ที่เหลือเปลี่ยนเป็น pearlite ด้วยปฏิกิริยายูเทคตอย
- Graphite **และ** ferrite: โครงสร้างชนิดนี้ส่วนมากเกิดขึ้นกับเหล็กหล่อที่มี Si ผสมอยู่มากๆ การเย็นตัวก็เกิดขึ้นช้ามากจนกระทั่ง carbon ที่แพร่ออกมาจาก austenite มีเวลาเพียงพอที่จะแพร่ออกมาได้**ทั้งหมด** เหล็กหล่อชนิดนี้อ่อน และตัด-กลึงได้ง่าย (machining)

1.5 **การอบชุบเหล็กหล่อเทา** (heat-treatment of gray cast iron):

การอบชุบเหล็กหล่อเทามีวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น เพื่อลดความเค้นตกค้าง, เพื่อปรับขนาดของเกรน, และ เพื่อทำให้ตัด-กลึงได้ง่าย เป็นต้น วิธีการอบชุบมีดังนี้:-

- Annealing: อบชิ้นงานเหล็กหล่อที่อุณหภูมิประมาณ 760°C จนกระทั่งชิ้นงานมีอุณหภูมิสม่ำเสมอเท่ากันหมด แล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นในเตาอย่างช้าๆ ระยะเวลาที่อบอยู่ในเตาขึ้นอยู่กับมวลและความหนาของชิ้นงาน การอบเช่นนี้ทำให้เกิด graphite flake และทำให้จุดแข็ง (จุดที่มีความแข็งมากกว่าบริเวณอื่น --เกิด white iron) อ่อนตัวลง เพราะ carbon แยกตัวออกจาก Fe_3C จุดแข็งเหล่านี้มักเกิดจากการเย็นตัวเร็วเกินไป
- Quench hardening: มักใช้กับ ferritic gray cast iron; วิธีการคือ ให้ความร้อนชิ้นงานจนมีอุณหภูมิเหนือ Ac_1 เล็กน้อย (ประมาณ 760 C) แล้วชุบลงในน้ำหรือในน้ำมัน เกิดโครงสร้างเป็น pearlite และ graphite ความแข็งและความเหนียวจะเพิ่มขึ้น (แต่ต้องระวังในการชุบ ไม่ให้เกิด white cast iron ขึ้นได้) หลังจากชุบแข็งแล้ว ต้องนำไปลดความเปราะด้วยการทำ tempering ที่อุณหภูมิประมาณ 450 – 475°C **ตามปกติในทางปฏิบัติของการใช้งานเหล็กหล่อทั่วไป ไม่นิยมการชุบแข็งเหล็กหล่อ**
- Stress relieving: เป็นการอบเพื่อลดความเค้นที่อยู่ภายในชิ้นงานหล่อ ที่เกิดจากการหดตัวของชิ้นงานขณะแข็งตัวในแบบหล่อ (mold) หรือเกิดจากความเค้นเนื่องจากการตัดโลหะ(ตัดหยาบครั้งแรก) ทำให้ชิ้นงานบิดงอ ตัวอย่างของปัญหานี้ ที่เห็นได้ชัดเจนก็คือ การทำแท่นเครื่องของเครื่องมือกล เช่น แท่นเครื่องกลึง(machine-tool bed); ในสมัยก่อน ภายหลังจากการตัดหยาบ (rough machining ผิวแท่นเครื่องที่เกิดจากการหล่อแล้ว) จะต้องทิ้งแท่นเครื่องตากแดดตากฝนเป็นเวลานาน (อาจหลายปี) ก่อนที่จะดำเนินการตัดละเอียด (finish machining)ชิ้นงานต่อไป วัตถุประสงค์คือเพื่อให้ความเค้นหายไป หรือเกิดการบิดตัวของชิ้นงานจนหมด

ในปัจจุบัน ใช้วิธีทำ stress relief แทน โดยใช้อุณหภูมิอบประมาณ 550°C เป็นเวลาประมาณ 7 ชั่วโมงหรือหลายวัน ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน หลังจากนั้นให้เย็นตัวอย่างช้าๆ

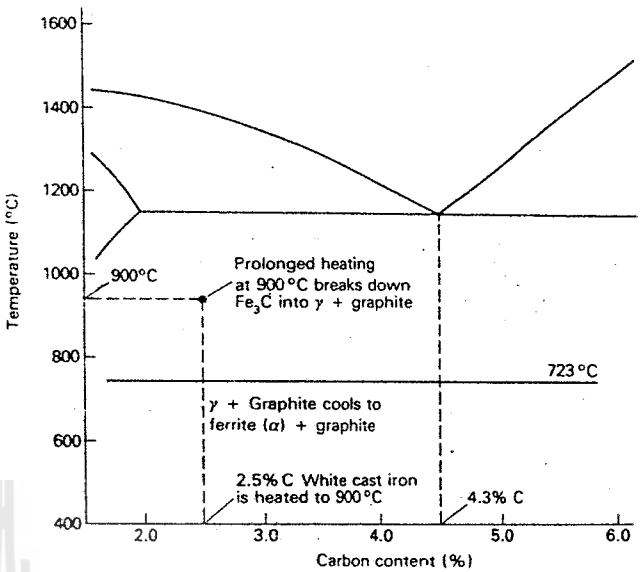
1.6 **เหล็กหล่อ malleable** (malleable cast iron):

เหล็กหล่อ malleable เป็นเหล็กหล่อที่มีความแข็งแรง, ความเหนียว, และความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้วยแรง (malleability) ดีกว่า เหล็กหล่อธรรมดา; มีวิธีการทำเหล็กหล่อ malleable อยู่หลายวิธีดังนี้:-

- Black-heart process: อบ**เหล็กหล่อขาว**ในกล่องทนไฟที่ปิดสนิทไม่ให้อากาศเข้าได้ ที่อุณหภูมิ 850 – 950°C (รูป 2A) เป็นเวลา 50 – 170 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานและความหนา การอบนานๆเช่นนี้ ทำให้ carbon แยกออกมาจาก carbide เป็น carbon อิสระ และจับตัวรวมกันเป็นรูปดอกกุหลาบ (rosette) (รูป 3A)

เนื่องจากรอยหักของเหล็กหล่อชนิดนี้มีสีดำ จึงเรียกกระบวนการทำเหล็กหล่อ malleable แบบนี้ว่า black-heart process

- White-heart process: ทำจาก white cast iron เช่นเช่นเดียวกัน แต่ต่างกันตรงที่มีการใส่ iron oxide (มักเป็น สินแร่ haematite ผง) เข้าไปในกล่องทนไฟที่บรรจุชิ้นงานด้วย อุณหภูมิอบประมาณ 1,000°C และใช้เวลาประมาณ 70 – 100 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน สินแร่จะอ๊อกซิไดซ์ carbon เกิด เป็น CO ออกไปจากเหล็กหล่อ ทำให้ผิวเหล็กหล่อ และส่วนที่อยู่ลึกลงไปจากผิวสูญเสีย carbon ผลก็คือ ชิ้นงานส่วนที่บาง จะเสีย carbon ไปหมด เกิดเป็นโครงสร้าง ferrite สำหรับชิ้นงานที่หนา อาจมี pearlite อยู่บ้าง



รูป 2A: Black-heart process

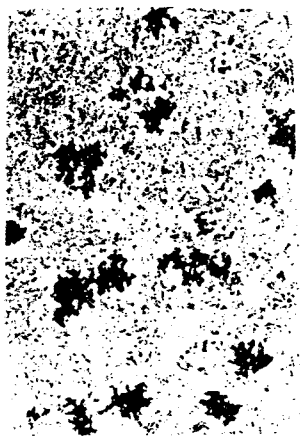
ในรูป 4A แสดงโครงสร้างจุลภาพของเหล็กหล่อ malleable ตรงบริเวณกลางชิ้นงาน (core)

เช่นเดียวกับ black-heart process คือ รอยหักมีสีขาวคล้ายสีของเหล็กหล้า ดังนั้นจึงเรียกวิธีการนี้ว่า white-heart process

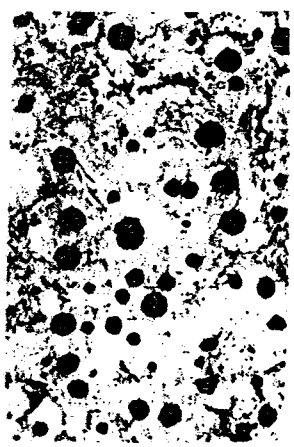
- Pearlitic malleable process: คล้ายกับ black-heart process คือ ใช้อุณหภูมิอบประมาณ 850 – 950°C เป็นเวลา 50 – 170 ชั่วโมง แต่ต่างกันตรงที่ เมื่อ carbon แยกตัวออกจาก cementite; บางส่วนละลายใน austenite และ บางส่วนเป็น graphite แล้ว แทนที่จะให้เย็นอย่างช้าๆเพื่อให้ austenite กลายเป็น ferrite กลับให้เย็นอย่างรวดเร็วเพื่อให้ austenite กลายเป็น pearlite (รูป 5A)

รูป 3A: Black-heart malleable iron

รูป 4A: White-heart malleable iron



รูป 5A: Pearlitic malleable iron

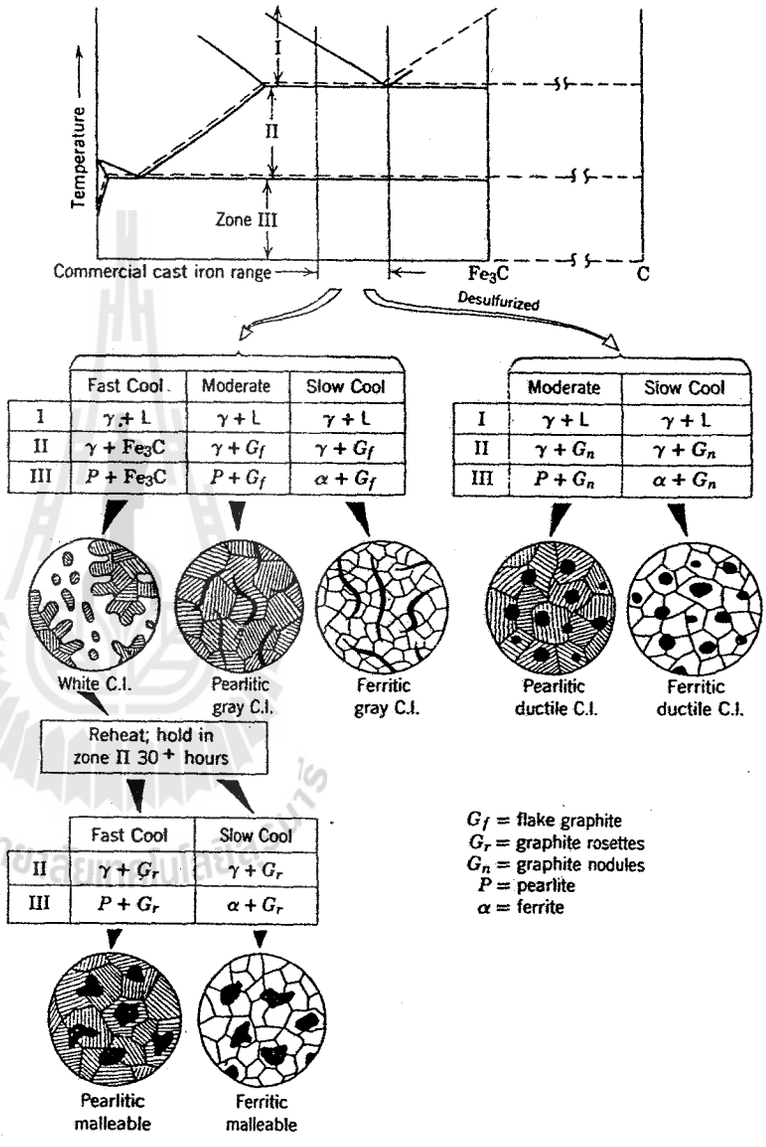


รูป 6A: Nodular iron

1.7 **เหล็กหล่อ** SG (spheroidal graphite cast iron):

เหล็กหล่อชนิดนี้มีชื่อเรียกหลายชื่อ เช่น nodular iron, ductile iron, และ high duty iron เป็นต้น การทำเหล็กหล่อ SG: ใช้วิธีการหล่อหลอมเหล็กหล่อธรรมดา แล้วเติม (inoculation) สารประกอบของธาตุบางอย่าง เช่น magnesium, หรือ titanium, หรือ cerium ลงไปในน้ำโลหะก่อนเทลงแบบ ทำให้เกิด graphite เป็นก้อนกลม (รูป 6A) ผลคือ จุดรวมความเค้น (stress concentration)เนื่องจาก graphite flake หมดไป; เหล็กหล่อมีความแข็งแรงสูงขึ้น, และ fatigue failure ดีขึ้น

ในรูป 7A แสดงการเกิดโครงสร้างจุลภาพที่อุณหภูมิต่างๆ รวมทั้งแสดงถึงผลของความเร็วในการเย็นตัวของเหล็กหล่อ ที่กล่าวมาแล้วทั้งหมด



รูป 7A: สรุปโครงสร้างจุลภาพของเหล็กหล่อ

1.8 **เหล็กหล่อโลหะผสม**:

เหล็กหล่อโลหะผสม(alloy cast iron)หมายถึงเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมของธาตุโลหะผสม(alloying elements) เหล่านี้: Ni, Cr, V, Mo และ Cu ซึ่งต่างก็มีอิทธิพลต่อเหล็กหล่อดังนี้

- Nickel: ทำให้เกรนเล็ก, เพิ่มความแข็งแรง, ทำให้เกิดกราไฟต์เพราะ ฉะนั้นเหล็กหล่อเหนียวขึ้น (toughness ดี)
- Chromium: ทำให้ cementite เสถียร, เพิ่มความแข็ง, ต้านทานการสึกหรอ, ทนต่อ corrosion (โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง) Cr มักใช้ร่วมกับ Ni
- Vanadium: ใช้สำหรับเหล็กหล่อทนความร้อนสูงเพราะ V ทำให้เกิด carbide เสถียร และไม่แยกตัวที่อุณหภูมิสูง
- Molybdenum: ละลายใน ferrite; ถ้าใช้น้อย (เช่น 0.5%), ทำให้ทนแรงกระแทกได้ดี; ถ้าใช้มากจะเกิด carbide ทำให้สามารถเพิ่มความแข็งให้กับหน้าตัดหนาๆได้ และทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาพที่สม่ำเสมอ

กระบวนการตัดโลหะ
(Metal Machining Processes)

กระบวนการตัดโลหะ เป็นกระบวนการแปรรูปโลหะโดยอาศัยเครื่องมือกล (machine-tools) ซึ่งใช้คมตัด (cutting tools) ทำให้เกิดเศษโลหะ(chips) หลุดออกจากชิ้นงาน และเกิดรูปทรงและขนาดตามที่กำหนดในแบบ วิศวกรที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการออกแบบผลิตภัณฑ์โลหะจะต้องมีความเข้าใจในขีดความสามารถของเครื่องมือกลและองค์ประกอบพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการตัดโลหะ เพื่อทำให้เกิด แบบของผลิตภัณฑ์ที่สามารถทำหน้าที่ได้ตามที่กำหนดและผลิตได้อย่างประหยัด

เรื่องกระบวนการตัดโลหะที่จะกล่าวถึงในที่นี้ ขอกล่าวเป็น 3 หัวข้อดังนี้คือ: (1) เครื่องมือวัด และ เครื่องมือร่างแบบ (measuring and layout instruments); (2) เครื่องมือกลและงานพื้นฐานของเครื่องมือกล (machine-tools and their operations); (3) เครื่องมือกลสมัยใหม่(modern machine-tools)

1. เครื่องมือวัดและเครื่องมือร่างแบบ(measuring and layout instruments)

การวัด เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสิ่งที่ไม่ทราบค่ากับสิ่งที่เป็นมาตรฐาน เช่น ใช้บรรทัดวัดความกว้าง-ยาวของหน้ากระดาษ, ใช้เทอร์โมคับเปิล(thermocouple) วัดอุณหภูมิในเตาอบ, และใช้นาฬิกาจับเวลาของแต่ละขั้นตอนของการทำงาน เป็นต้น ในที่นี้ บรรทัด, เทอร์โทคับเปิล, และนาฬิกาจับเวลา ต่างก็เป็นมาตรฐานใช้งานระดับหนึ่งของการวัดขนาด, อุณหภูมิ, และเวลา ตามลำดับ

มีเหตุผลที่ต้องทำการวัดขนาด, ปริมาณ, สถานภาพ, และเวลา ของสิ่งต่างๆอยู่ 3 อย่างคือ:(1) เพื่อการผลิต, (2) เพื่อใช้ควบคุมการผลิต; (3) เพื่ออธิบายให้เห็นภาพที่แท้จริง(scientific description)

การร่างแบบ (layout) หมายถึงการเขียนเส้นหรือทำเครื่องหมายลงบนผิวชิ้นงาน เพื่อใช้เป็นแนว(guideline) สำหรับการตัดด้วยเครื่องมือ หรือด้วยเครื่องจักร การร่างแบบช่วยให้การทำงานผิดพลาดน้อยลง แต่ความถูกต้องไม่ได้ขึ้นอยู่กับแบบที่ร่างอย่างเดียวแต่ขึ้นอยู่กับฝีมือของคนงาน, ความสามารถของเครื่องจักร และการใช้เครื่องมือวัด

เครื่องมือหลายอย่างที่ใช้กันอยู่ในโรงงานบางชนิดเป็นเครื่องมือวัดขนาดอย่างเดียว เช่น vernier caliper และ micrometer แต่บางชนิดเป็นได้ทั้งเครื่องมือวัดและเครื่องมือร่างแบบ เช่น บรรทัดเหล็ก, vernier height gage, และ combination set เป็นต้น

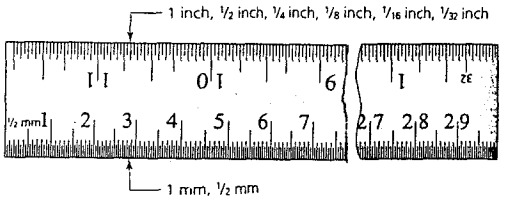
ต่อไปจะกล่าวถึงวิธีการวัดและเครื่องมือพื้นฐานที่ใช้วัดความยาวเชิงเส้นตรง(linear measurement) และ รูปทรงเชิงเรขาคณิตของผิวงาน (surface geometry measurement)

1.1 การวัดความยาว (length measurement): ในปัจจุบัน เป็นที่ยอมรับกันว่า หน่วย SI ขององค์การมาตรฐานสากล (International Standards Organization – ISO) เป็นหน่วยวัดสำหรับอ้างอิงในการผลิตและการควบคุมการผลิต โดยกำหนดความยาว1 เมตร มาตรฐานไว้ว่า "**ความยาว 1 เมตร เท่ากับความยาวของแสงเลเซอร์(ชนิด iodine stabilised helium-neon laser) ที่เคลื่อนที่ไปในเวลา 1/299792458 วินาที**" อย่างไรก็ตาม ในบางประเทศยังมีการใช้หน่วยความยาวเป็น "นิ้ว" อยู่ จึงมีการเทียบค่ากันดังนี้ : 1 นิ้ว = 0.0254 เมตร (หรือ = 25.4 mm)

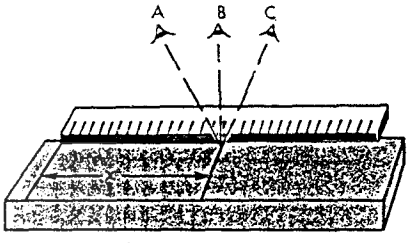
การวัดความยาวในบางครั้งกระทำระหว่างจุด, หรือระหว่างเส้นตรง, หรือระหว่างผิว 2 ผิว, หรือระหว่างเส้นกับผิว ซึ่งเราอาจจัดได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆคือ การวัดระหว่างเส้น และการวัดระหว่างผิวปลาย(line measurement and end measurement) ดังนั้นจึงเกิดมีอุปกรณ์วัด 2 อย่างคือ อุปกรณ์วัดแบบใช้เส้น(line-system measuring device) และอุปกรณ์วัดแบบใช้ปลาย(end-system measuring device) ดังนี้

- **บรรทัดเหล็ก** (steel rule): เป็นอุปกรณ์แบบใช้เส้น ทำด้วยเหล็กกล้าทำสปริงชนิดทนต่อการกัดกร่อน ผ่านการชุบแข็งและทำเทมเปอริ่ง; ขอบทั้งสองข้างได้รับการเจียรนัย มีเส้นแบ่งสเกลที่ผิว และขอบปลายเริ่มจาก 0 (รูป 4.1)

ความถูกต้อง(accuracy)ในการวัด นอกจากจะขึ้นอยู่กับความคลาดเคลื่อนของกระบวนการผลิตในการแบ่งสเกลบนผิวบรรทัด และสิ่งแวดล้อมในการใช้งานแล้ว ยังขึ้นอยู่กับวิธีการใช้บรรทัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอ่านค่า ถ้าหากแนวการมองไม่ตั้งฉากกับผิวตรงจุดที่ต้องการอ่านค่า จะทำให้ค่าที่ได้ ไม่ถูกต้อง(รูป 4.2) เราเรียก ความผิดพลาดที่เกิดจากแนวการมองเช่นนี้ว่า"parallax error" วิธีแก้ก็คือ พยายามทาบเส้นสเกลของบรรทัดให้อยู่ชิดกับเส้นหรือขอบที่ต้องการวัดให้มากที่สุด, และ พยายามให้แนวการมองตั้งฉากกับผิวตรงจุดที่ต้องการอ่านค่า ในรูป 4.3 แสดงตัวอย่างของการใช้บรรทัดเหล็กเพื่อให้ได้ค่าวัดที่ถูกต้อง



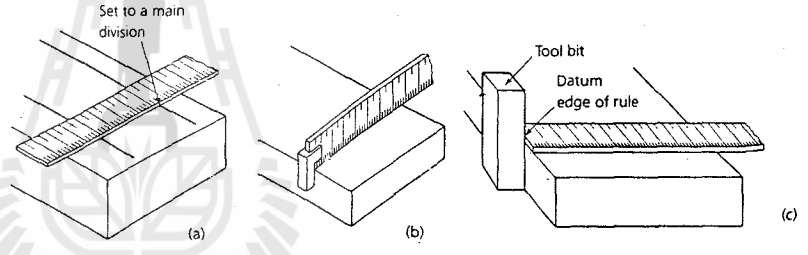
รูป 4.1: บรรทัดเหล็ก (Steel rule)



รูป 4.2: Parallax error

- Combination set: เป็นเครื่องมือสำหรับวัดขนาดและร่างแบบ ประกอบด้วยส่วนต่างๆคือ ((รูป 4.4) บรรทัดเหล็ก (steel rule), square head, bevel protractor, และ center head: โดยที่บรรทัดเหล็ก สามารถประกอบเข้ากับส่วนอื่นๆเพื่อทำหน้าที่เฉพาะอย่าง เช่น ถ้าประกอบบรรทัดเหล็กเข้ากับ square head จะเกิดเป็น ฉาก(square) สำหรับตรวจสอบความฉาก(squareness)ของผิว, วัดขนาด, หรือขีดเส้นตรงตั้งฉากกับผิว; ถ้าประกอบเข้ากับ bevel head จะกลายเป็น เครื่องมือวัดมุมหรือขีดเส้นตรงทำมุมกับผิว; และถ้าเข้ากับ center head จะได้เครื่องมือวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกระบอกกลม หรือสำหรับใช้หาตำแหน่งของจุดศูนย์กลาง

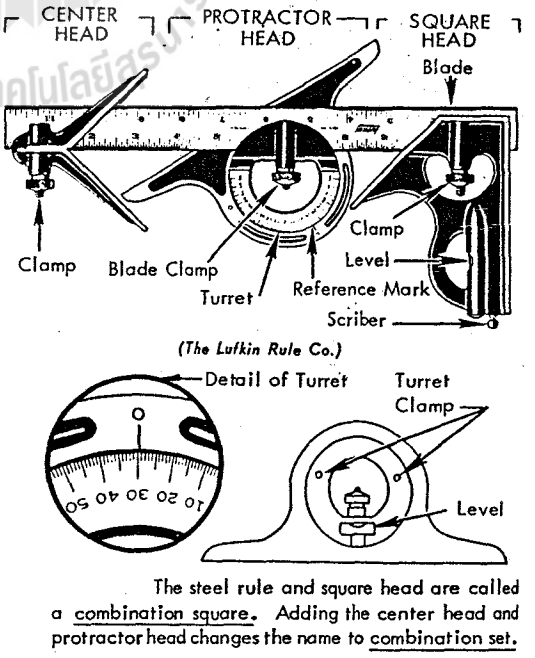
Use of a rule – measuring the distance between: (a) two scribed lines; (b) two faces using a hook rule; (c) two faces using a steel rule and a tool bit as an abutment



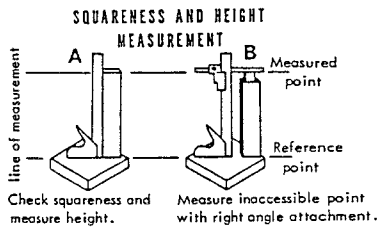
รูป 4.3: ตัวอย่างการใช้บรรทัดเหล็ก

รูป 4.5 แสดงตัวอย่างการใช้ combination set ในการวัดและร่างแบบ

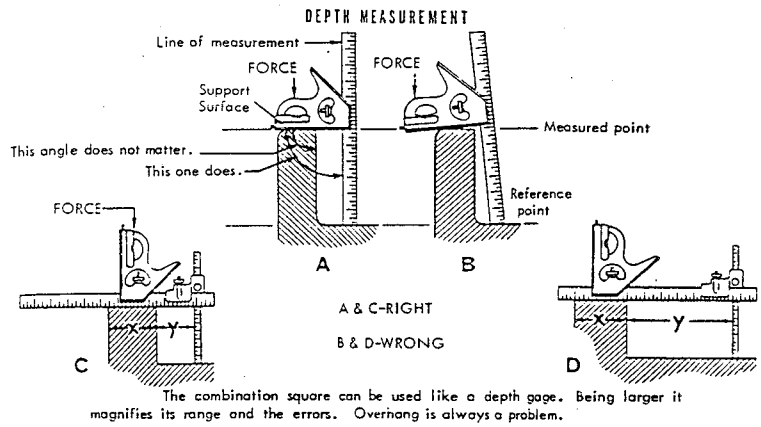
ในการประกอบบรรทัดเหล็กเข้ากับอุปกรณ์หลัก สิ่งที่จะต้องระมัดระวังคือ ต้องพยายามให้เกิดระยะยื่นของบรรทัดจากตัวอุปกรณ์น้อยที่สุด (minimum overhang) เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด



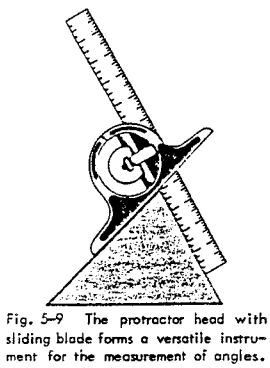
รูป 4.4: Combination set



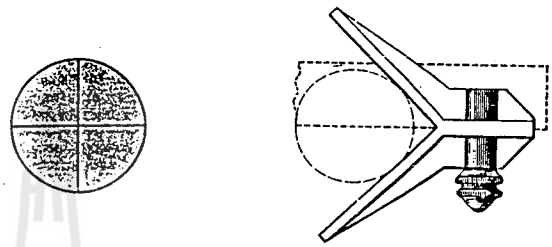
(ก) วัดความฉากและวัดความสูง



(ข) การวัดความลึกด้วย combination square



(ค) การวัดมุมด้วย protractor



(ง) แสดงการใช้ center head หาจุดศูนย์กลางของผิวทรงกระบอก

(จ) การวัดขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางด้วยชุด center head

รูป 4.5: แสดงการใช้ combination set

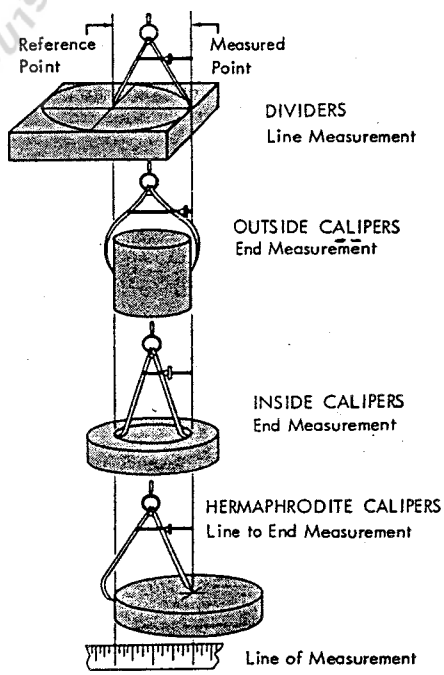
- Calipers: เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับถ่ายระยะระหว่างจุดอ้างอิงกับจุดที่ต้องการวัด รูป 4.6 แสดง caliper แบบต่างๆ ซึ่งได้แก่:

(1) Divider : ใช้สำหรับถ่ายระยะระหว่างจุด 2 จุด ไปยังสเกลบนบรรทัดเหล็ก หรือจากสเกลบนบรรทัดไปยังระยะจากจุดอ้างอิงบนผิวชิ้นงาน (รูป 4.7);

(2) Outside caliper: เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ระยะระหว่างปลายสองข้างถ่ายขนาดของชิ้นงาน เพื่อนำไปเทียบกับมาตรฐาน เช่น สเกลของบรรทัดเหล็ก เป็นต้น

outside caliper ใช้สำหรับวัดขนาดภายนอกของชิ้นงาน เช่น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางนอกของเพลา, ความหนาของลิ้น (tongue), และ ความหนาของสันต่างๆ (รูป 4.8)

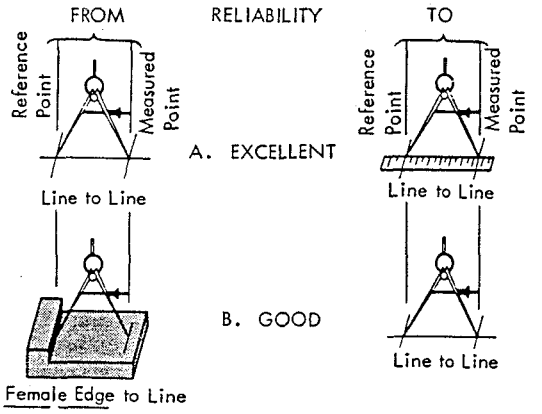
(3) Inside caliper: ใช้สำหรับวัดขนาดตรงกันข้ามกับ outside caliper คือวัดขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางใน หรือความกว้างของร่อง(รูป 4.8)



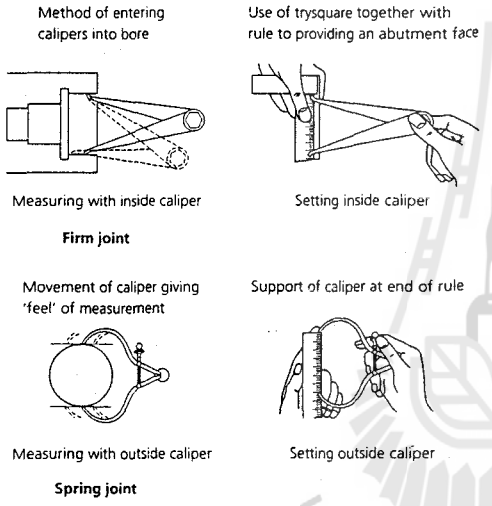
รูป 4.6: Calipers

(4) Hermaphrodite caliper: มีขาสองขาไม่เหมือนกัน ข้างหนึ่งมีปลายแหลม ส่วนอีกข้างหนึ่งเป็นผิวเรียบ ใช้สำหรับถ่ายความยาวระหว่างผิวหนึ่งและจุดหรือเส้น, หรือใช้ในการร่างแบบ(รูป 4.9)

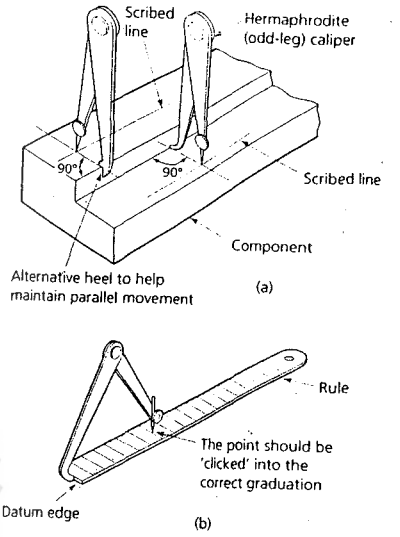
จะเห็นได้ว่าการใช้ caliper มักจะใช้ร่วมกับบรรทัดเหล็ก ซึ่งต้องอาศัยความชำนาญมาก ผู้ใช้จะต้องใช้"ความรู้สึก"ว่าปลายของ caliper สัมผัสผิวชิ้นงานอย่างไรถึงจะถือว่าพอดี และเวลาอ่านค่าบนบรรทัดเหล็กจะอ่านอย่างไรจึงจะถูกต้อง ดังนั้นจึงเกิดการพัฒนา caliper ให้มีสเกลสำหรับอ่านค่าจากการวัดได้โดยตรง ทำให้เกิดเป็น vernier caliper ขึ้น ซึ่งเราจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



รูป 4.7: การใช้ divider



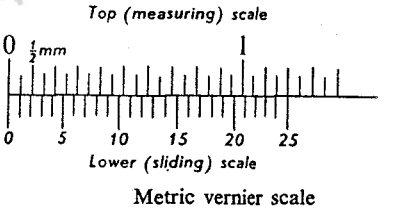
รูป 4.8: การใช้ outside และ inside calipers



รูป 4.9: การใช้ hermaphrodite calipers

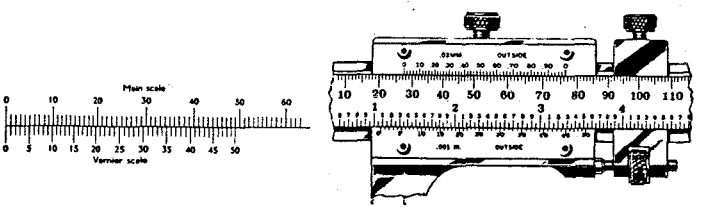
- Vernier instruments: เครื่องมือวัดความยาวที่จัดอยู่ในกลุ่มของเวอร์เนียร์หมายถึงเครื่องมือที่ใช้ vernier scale อ่านค่าความละเอียดของการวัด ซึ่งได้แก่ vernier caliper, vernier height gauge, และ vernier depth gauge

Vernier scale มีสองแบบคือ: แบบที่มี main scale แบ่งเป็นช่องละ ½ mm (รูป 4.10) และ แบบที่มี main scale แบ่งเป็นช่องละ 1 mm (รูป 4.11)



รูป 4.10: Vernier scale แบบ main scale ½ mm

Vernier scale แบบแรก(1 ช่อง main scale = ½ mm) มีความยาวของ main scale 12 mm เท่ากับ 25 ช่องของ vernier scale นั่นคือความยาว 1 ช่องของ vernier scale จะเท่ากับ 1/25 ของ 12 mm = (1/25)x(12) = 0.48 mm ซึ่งสั้นกว่าความยาว 1 ช่อง ของ main scale อยู่ = (0.5 – 0.48) = 0.02 mm และนี่ก็คือความละเอียดที่เราสามารถอ่านได้



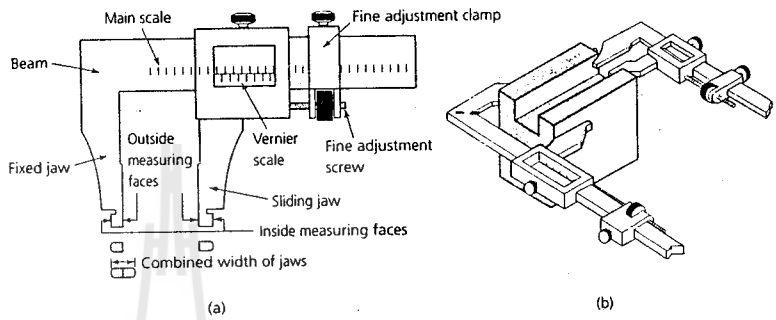
รูป 4.11: Vernier scale แบบ main scale 1 mm

จาก vernier scale

การอ่านค่าจาก vernier ให้อ่านค่าบน main scale เท่าที่เลข 0 (บน vernier scale)ชี้ไปได้ จากนั้นให้สังเกตขีดบน vernier scale ว่า ขีดที่เท่าใดที่อยู่ตรง(เป็นเส้นเดียว)กับขีดของ main scale มากที่สุด นี่คือจำนวนช่อง(ช่องละ 0.02 mm) ที่ต้องคำนวณให้เป็นความยาวแล้วเอาไปบวกกับค่าที่อ่านบน main scale ก่อนหน้านี้ ในรูป 4.12 แสดงตัวอย่างการอ่าน vernier ชนิดนี้

รูป 4.13 แสดงส่วนต่างๆของ vernier caliper และการใช้งาน ซึ่งสามารถวัดขนาดได้ทั้งภายนอกและภายใน (external and internal measurements) สิ่งที่ควรจำก็คือ ถ้าใช้วัดขนาดภายในจะต้องบวกความหนาของปาก vervier (jaws) เข้ากับค่าที่อ่านได้ด้วย

โดยทั่วไปแล้วความเที่ยงตรง (accuracy) ในการวัดของ vernier caliper จะต่ำกว่า micrometer caliper (ซึ่งกล่าวในหัวข้อต่อไป) เนื่องจาก vernier มีขนาดและน้ำหนักมากกว่า micrometer ทำให้ยากต่อการกำหนด"ความรู้สึก" ที่พอดีขณะที่ปาก vernier สัมผัสกับผิวงาน; และนอกจากนั้นสเกลของ vernier ยังอ่านค่าที่ถูกต้องได้ยากกว่าสเกลของ micrometer ถึงแม้ว่าจะมีเลนซ์ขยายก็ตาม



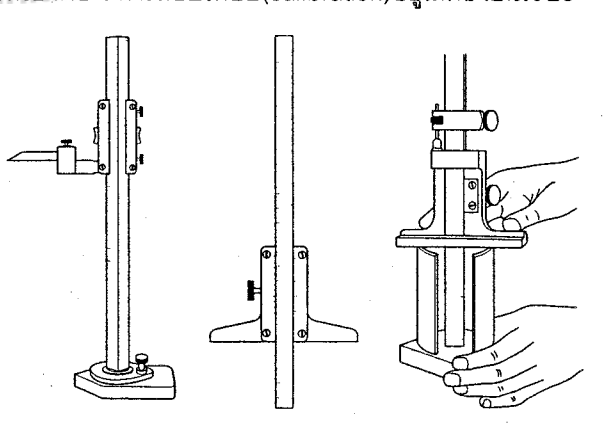
The vernier caliper: (a) construction; (b) use

รูป 4.13: Vernier caliper และการใช้งาน

ในปัจจุบันมีการเพิ่มความเที่ยงตรงในการอ่านค่าจาก vernier เช่นใช้เข็มชี้อ่านค่าตัวเลขจากหน้าปัดกลม (dial caliper) หรือแบบอ่านค่าตัวเลขจากจอโดยตรง (digital caliper)โดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ แต่อย่างไรก็ตาม vernier เหล่านี้มีราคาแพง และมีน้ำหนักมากกว่าปกติ

ก่อนที่จะใช้และภายหลังจากการใช้ vernier caliper จะต้องมีการตรวจสอบเสมอว่าขณะที่ปาก vernier ปิดสนิทค่าวัดเท่ากับ 0 หรือไม่: ถ้าไม่, แสดงว่า vernier บกพร่อง และไม่สามารถให้ค่าวัดที่ถูกต้องได้, ภายหลังจากการใช้จะต้องเก็บไว้ในกล่อง เพื่อป้องกันความเสียหาย, และนอกจากนี้ยังต้องมีการสอบเทียบ(calibration)อยู่เสมอ เป็นระยะเพื่อให้แน่ใจในมาตรฐานของเครื่องมือวัด

ในรูป 4.14 แสดง vernier height gauge และ vernier depth gauge ที่ใช้ vernier scale ในการอ่านค่าเช่นเดียวกับ vernier caliper ซึ่งเครื่องมือวัดชนิดหลัง ในปัจจุบันมีการใช้น้อยลง เพราะวัดให้ถูกต้องได้ยาก และสามารถใช้เครื่องมือวัดอื่นที่ถูกต้องมากกว่าทดแทนได้ เช่น micrometer depth gauge เป็นต้น. ส่วน vernier height gauge นั้น โดยทั่วไปใช้สำหรับวัดขนาดความสูงของระนาบ และต้องใช้ร่วมกับแท่นระดับ (surface plate) และใช้ในการร่างแบบ ดังตัวอย่างการใช้งานในรูป 4.15

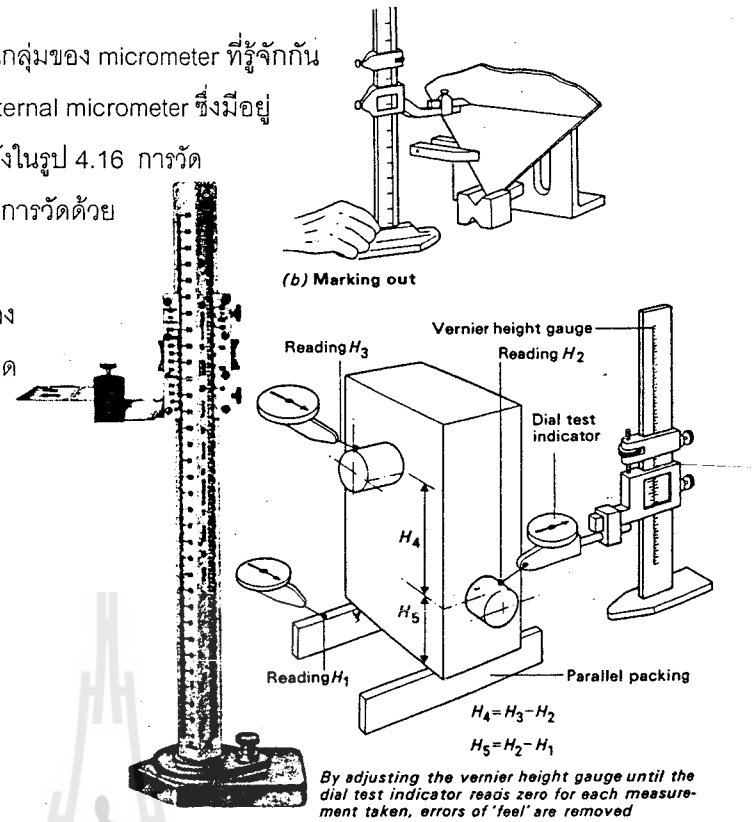


Vernier gauges: (a) height gauge; (b) depth gauge; (c) use of the depth gauge

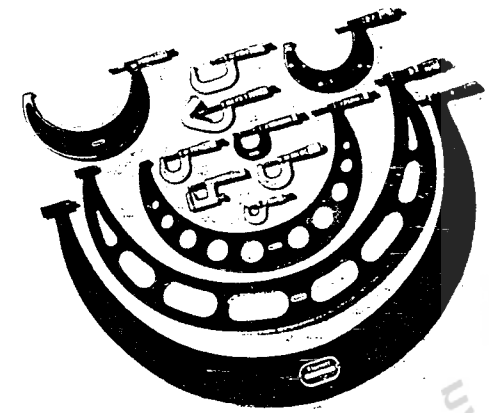
รูป 4.14: Vernier height gaugeและ vernier depth gauge

- Micrometer instruments: เครื่องมือวัดในกลุ่มของ micrometer ที่รู้จักกันแพร่หลายที่สุดคือ ไมโครมิเตอร์วัดนอก หรือ external micrometer ซึ่งมีอยู่หลายขนาด (ความยาวสูงสุดที่สามารถวัดได้) ดังในรูป 4.16 การวัดด้วยไมโครมิเตอร์ ถือได้ให้ความถูกต้องมากกว่าการวัดด้วย vernier ดังได้กล่าวแล้ว

หลักการวัดของไมโครมิเตอร์อาศัยระยะทางเคลื่อนที่ของสกรู(screw) ดังในรูป 4.17 ถ้าเราติดบรรทัดสำหรับวัดระยะทางเข้ากับส่วนที่เป็นแป้นเกลียว(nut) เราสามารถบอกระยะที่เกลียวเคลื่อนที่เข้า-ออกได้ และถ้าหากมีการแบ่งสเกลให้กับมือหมุนเกลียวด้วยแล้ว จะยิ่งทำให้อ่านระยะทางเคลื่อนที่ได้ละเอียดยิ่งขึ้น ไมโครมิเตอร์ทั้งหลายใช้หลักการนี้วัดขนาด

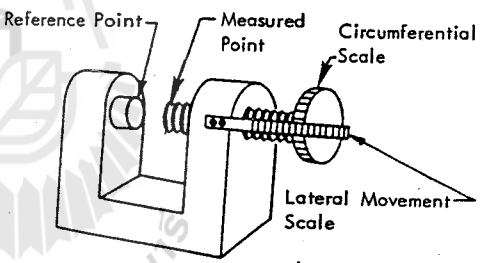


รูป 4.15: Vernier height gaugeและ การใช้งาน



A wide range of types and sizes of micrometers are used for measurement.

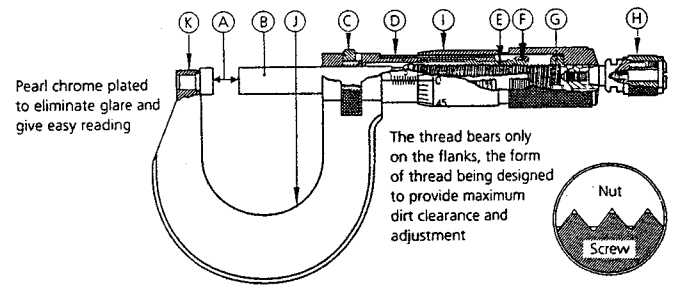
รูป 4.16: External micrometers



รูป 4.17: Basic micrometer

รูป 4.18 แสดงส่วนต่างๆของไมโครมิเตอร์วัดนอกซึ่งมัก เรียกกันสั้นๆว่า "ไมโครมิเตอร์" มีปลายของ spindleสัมผัสกับผิวงาน, ตัว spindle จะมีเกลียวที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ซึ่งถูกยึดให้ติดกับthimble ที่มีลักษณะเป็นเปลือกหุ้มเกลียวไว้; ตัวสกรูจะหมุนในแป้นเกลียว(nut)ที่ปลาย barrel ซึ่งติดอยู่กับ steel frame; เมื่อหมุน thimble สกรูจะเคลื่อนที่ และขอบของ thimble จะวิ่งอยู่บนผิวของ barrel.

The micrometer caliper (source: Moore and Wright Ltd)



A *Spindle and anvil faces* – Glass hard and optically flat, also available with tungsten carbide faces
B *Spindle* – Thread ground and made from alloy steel, hardened throughout, and stabilised
C *Locknut* – Effective at any position. Spindle retained in perfect alignment
D *Barrel* – Adjustable for zero setting. Accurately divided and clearly marked, pearl chrome plated
E *Main nut* – Length of thread ensures long working life
F *Screw adjusting nut* – For effective adjustment of mainnut
G *Thimble adjusting nut* – Controls position of thimble
H *Ratchet* – Ensures a constant measuring pressure
I *Thimble* – Accurately divided and every graduation clearly numbered
J *Steel frame* – Drop forged
K *Anvil end* – Cutaway frame facilitates usage in narrow slots

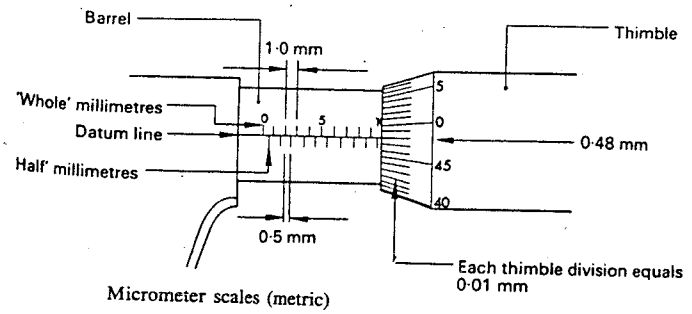
รูป 4.18: ส่วนต่างๆของ external micrometer

ไมโครมิเตอร์ทั่วไปใช้ สกรูซึ่งมีขนาดของ lead = 0.5 mm (ระยะทางในแนวแกนที่สกรูเคลื่อนที่ไปได้เมื่อหมุนครบ 1 รอบ) และกำหนดสเกลบนผิว barrel เป็น 1 ช่อง = 0.5 mm นั่นคือ เมื่อ thimble หมุนครบ 1 รอบ, ขอบของthimble จะเคลื่อนที่ไป 1 ช่อง ส่วนบนผิวของ thimble, มีการแบ่งเส้นรอบวงออกเป็น 50 ส่วนเท่าๆกัน ดังนั้น 1 ช่องของการหมุนของ thimble จะทำให้ปลายของสกรูเคลื่อนที่ไป = (1/50)x0.5 = 0.01 mm.จาก ตำแหน่งเดิม

ในรูป 4.19 แสดง สเกลของไมโครมิเตอร์ ซึ่งอ่านได้ละเอียด 0.01 mm สำหรับค่าที่อ่านได้จากรูปคือ 9.5 + 48x0.01 = 9.98 mm

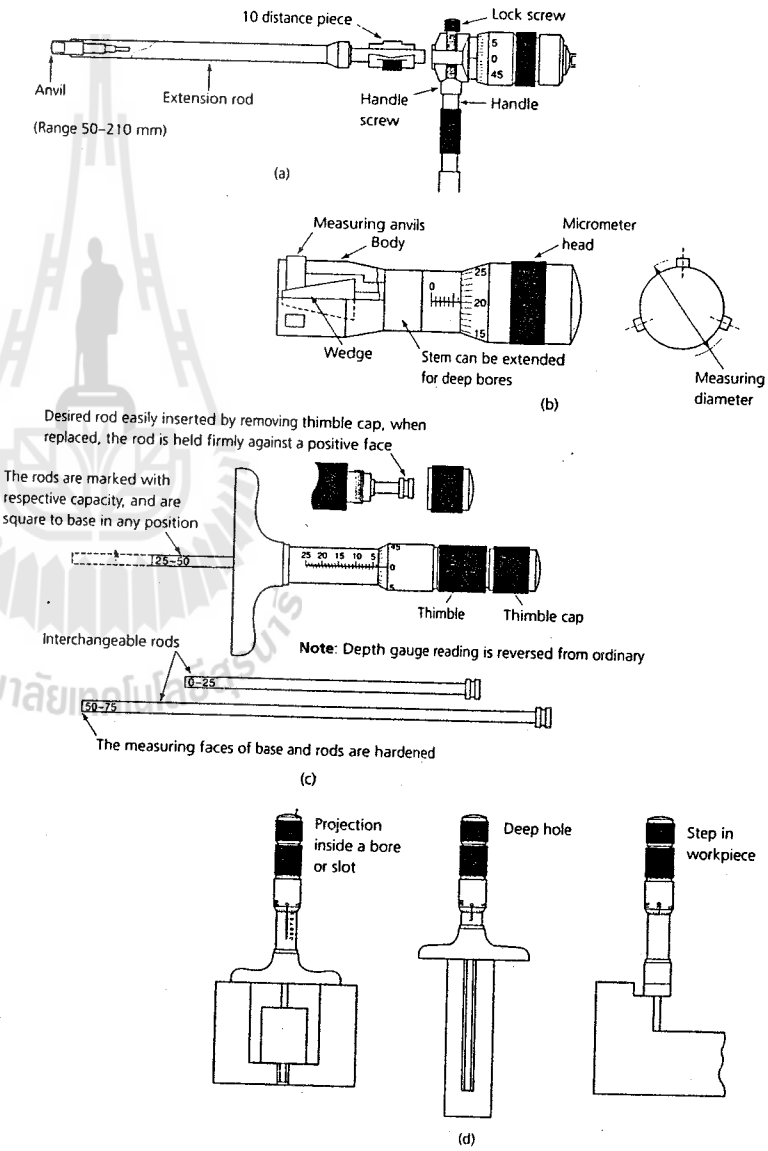
ข้อควรระวังพื้นฐานในการใช้ไมโครมิเตอร์ มีดังนี้:-

- เช็ดผิวชิ้นงานและปลายของแกนไมโครมิเตอร์(anvils)ก่อนทำการวัด
- ขณะทำการวัดอย่าให้ปลายเพลาออกแรงกดผิวงานมากเกินไป: หมุน ratchet "2 คลิก" ก็พอ
- อย่าวัดชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานกำลังเคลื่อนที่บนเครื่องมือกล (machine-tools) เพราะไม่เพียงแต่จะทำให้เครื่องเครื่องมือวัดเสียหาย ยังอาจเกิดอุบัติเหตุได้ด้วย
- จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่ง 0 เป็นระยะๆ ถ้าพบความเบี่ยงเบนของตำแหน่ง 0 ก็ให้ปรับไมโครมิเตอร์ เช่น ถ้าพบว่าสกรูหลวม, ก็ปรับให้ฟิตได้ด้วยการขันแป้นเกลียว F (รูป4.18) หรือ ถ้าพบว่าตำแหน่ง 0 บน thimble ไม่ตรงกับตำแหน่ง 0 ของ barrel, ก็ปรับตำแหน่งของ barrel โดยใช้ประแจรูปตัว "C" ขัน D (รูป 4.18)
- มีการสอบเทียบความถูกต้องของไมโครมิเตอร์อย่างสม่ำเสมอ



รูป 4.19: สเกลของไมโครมิเตอร์

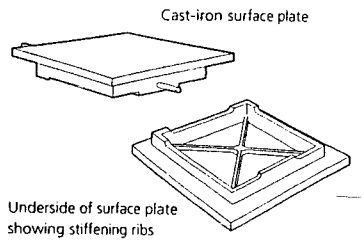
Further applications of the micrometer principles: (a) the internal micrometer; (b) the micrometer cylinder gauge; (c) micrometer depth gauge; (d) applications of the micrometer depth gauge



รูป 4.20: ไมโครมิเตอร์แบบต่าง ๆ

ในรูป 4.20 แสดง (ก) internal micrometer สำหรับวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูคว้าน (bore diameter) ไมโครมิเตอร์ชนิดนี้มีคล้ายกับไมโครมิเตอร์วัดนอกที่ไม่มีโครง(c-frame)สามารถใช้วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูในช่วง 50-210 mm(ไม่สามารถวัดรูที่มีขนาดต่ำ กว่า 50 mm); (ข) micrometer cylinder gauge ใช้สำหรับวัดรูที่ต้องการความถูกต้องสูงๆ; และ (ค) depth micrometer ใช้สำหรับวัดความลึกของรูหรือความลึกของร่อง(slot) สิ่งที่ต้องระวังในการใช้ก็คือสเกลจะกลับกันกับไมโครมิเตอร์วัดนอกทั่วๆไป

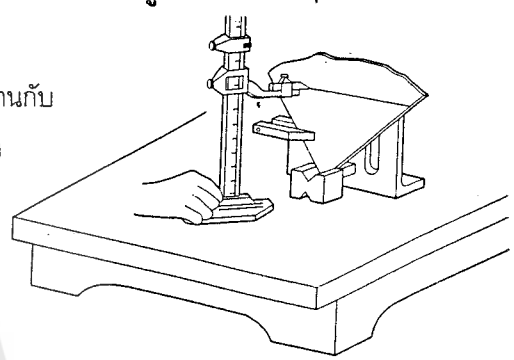
- Surface plate: Surface plate หรือ แท่นระดับ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวางชิ้นงานเพื่อให้สะดวกต่อการร่างแบบหรือวัดขนาดของชิ้นงาน มีลักษณะเป็นระนาบมีส่วนรองรับเป็นเอ็น (รูป 4.21) อาจทำด้วยเหล็กหล่อโลหะผสมหรือ เป็นหินแกรนิต (granite)

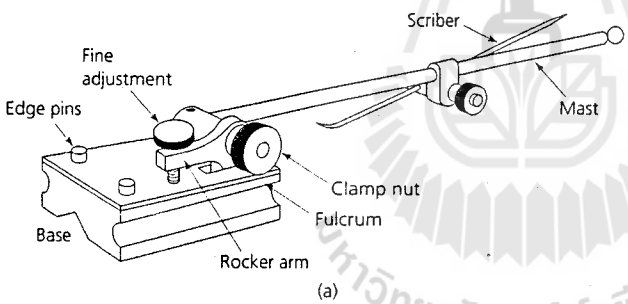


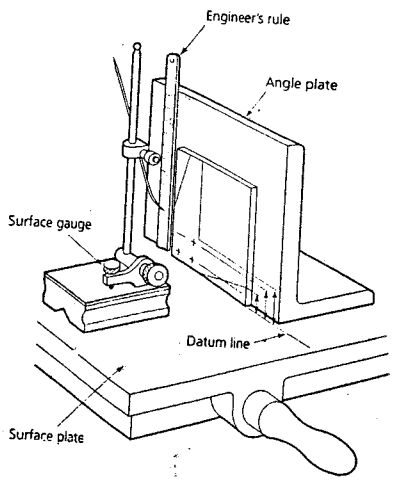
รูป 4.21: Surface plate

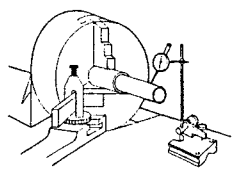
ในรูป 4.22 แสดงการใช้ surface plate ร่างแบบร่วมกับ vernier height gauge และ surface gauge

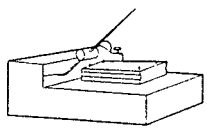
- Surface gauge (scribing block): ใช้สำหรับขีดเส้นตรงให้ขนานกับขอบ หรือใช้เป็นขาให้กับ dial gaugeตามปกติก่อนร่างแบบ จะต้องเซ็ตระดับให้กับ surface gauge ก่อน จากนั้นจึงนำความสูงไปขีดลงบนผิวชิ้นงานในรูป 4.22 และ 4.23 แสดงลักษณะและการใช้ surface gauge

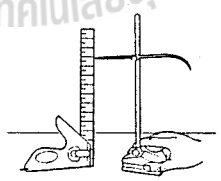




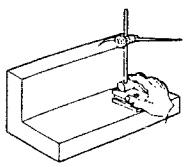


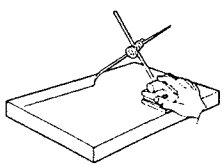

As a dial gauge stand

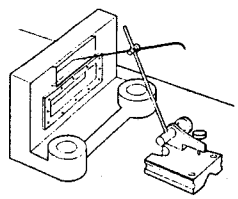

Scribing a line parallel to a surface


Setting to a combination square rule

รูป 4.22: การใช้ surface plate


Checking a surface for parallelism


Using the setting pins to scribe parallel to an edge


Marking out a casting

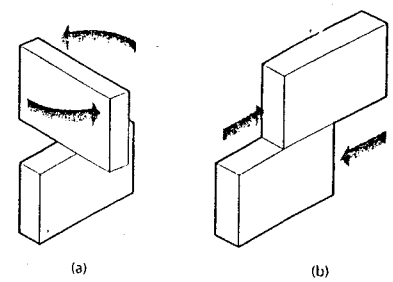
(b)

รูป 4.23: Surface gauge และการใช้งาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- Slip gauges (gauge blocks): เป็นก้อนเหล็กกล้าโลหะผสมที่ผ่านการอบชุบให้มีความแข็ง ทนต่อการสึกหรอ ได้รับการเจียรนัยและขัดผิวจนได้ขนาดที่มีความถูกต้องสูง และถือได้ว่าเป็นมาตรฐานอย่างหนึ่งของความยาว

เนื่องจากผิวของ slip gauges มีความเที่ยงตรงสูง ทำให้สามารถนำ slip gauge หลายๆอันมาบิด("wring")ให้ติดกันได้ ในรูป 4.24 แสดงวิธีบิดต่อ slip gauge และถอดแยกจากกัน



รูป 4.24: (a) Wring **ให้ติดกัน**; (b) **แยกจากกัน**

ชุดของ slip gauge ชุดหนึ่ง (หรือ set หนึ่ง) อาจมีจำนวนชิ้นไม่เท่ากัน ยิ่งมากชิ้น ยิ่งมีขนาดให้เลือกใช้มากขึ้นและราคาก็ยิ่งสูง ตัวอย่างเช่น set no 78 มี 78 ชิ้น ซึ่งประกอบด้วย slip gauge ดังในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 Slip gauge set no. 78

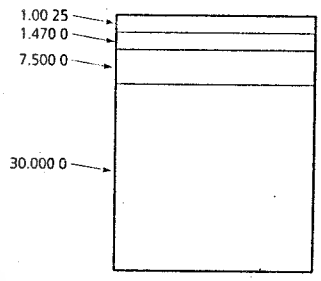
Range (mm)	Steps (mm)	Pieces
1·01 to 1·49	0·01	49
0·50 to 9·50	0·50	19
10·00 to 50·00	10·00	5
75·00 and 100·00	—	2
1·002 5	—	1
1·005	—	1
1·007 5	—	1

เพื่อให้ได้ความยาวที่ถูกต้อง(accuracy) การเรียง slip gauge ควรยึดหลักต่อไปนี้:-

(1) พยายามใช้ slip gauge จำนวนน้อยที่สุด;

(2) ก่อนบิดให้ติดกันต้องทำความสะอาดผิว slip gauge

(3) บิดให้ติดกันที่ละชิ้น

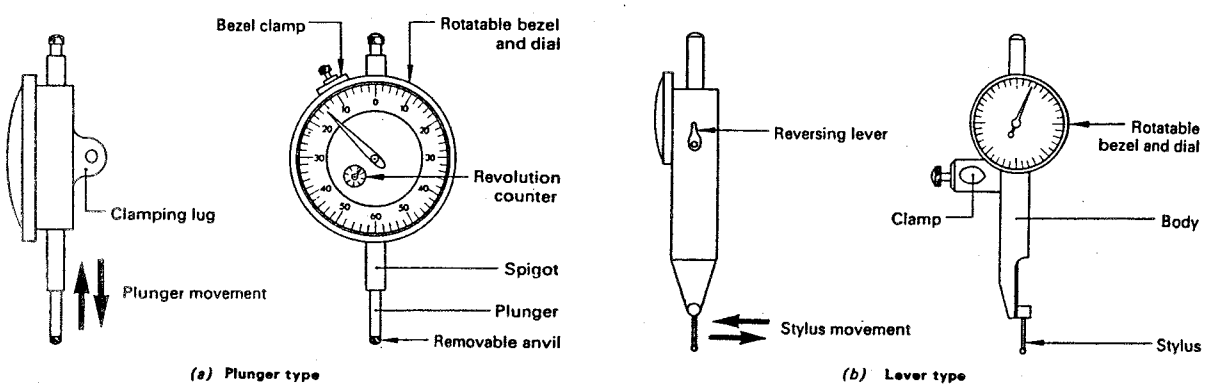


รูป 4.25: **การเรียง** slip gauge **ตามตัวอย่าง**

ตัวอย่างเช่น ต้องการต่อ slip gauge ให้ได้ความยาว 39.9725 mm ต้องเริ่มจาก หลักของตัวเลขขวามือสุดก่อนเสมอ ในที่นี้ก็คือ 1.0025 mm; จากนั้นเลือก slip gauge ก้อนที่สองและสามเพื่อให้จุดทศนิยมที่เหลือหมดไป นั่นคือ 1.47+7.50 = 8.970 mm; และก้อนสุดท้ายจะเท่ากับขนาดความยาวที่เหลือ คือ 39.9725 – 1.0025 – 1.470 – 7.50 = 30 mm

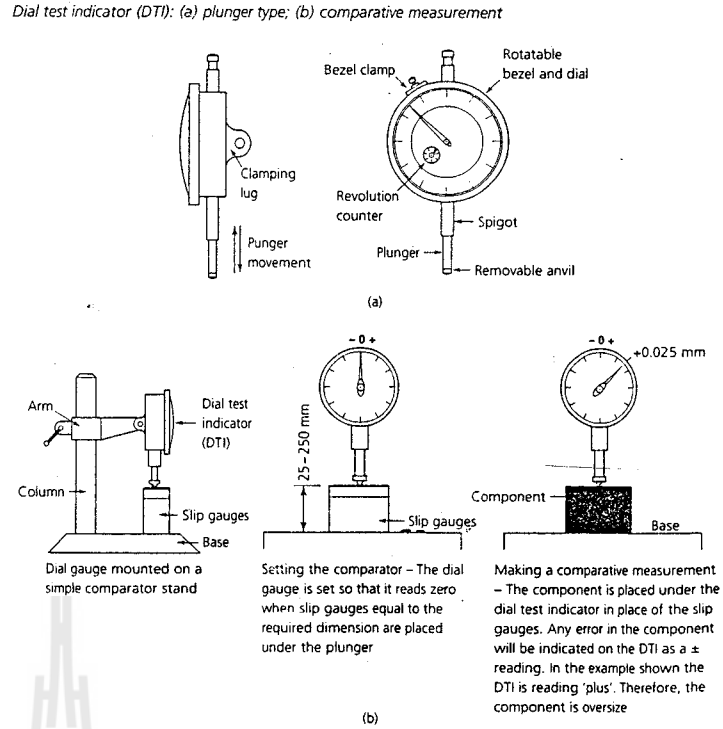
Slip gauge ที่ใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายเกรด คือ เกรด0 สำหรับตรวจสอบ(inspection grade); เกรด 1 สำหรับการทำงานละเอียด(precision applications); และเกรด 2 สำหรับใช้งานทั่วไป (general workshop applications)

- Dial Test Indicator (DTI) **หรือ** dial gauge: มีลักษณะเป็นหน้าปัดกลมมีเข็มชี้บอกระยะของการเคลื่อนที่ของก้านที่ยื่นออกมาจากตัวเครื่องวัด DTI ที่ใช้กันอยู่ มี 2 แบบ คือ แบบ plunger type และ แบบ lever type (รูป 4.26)

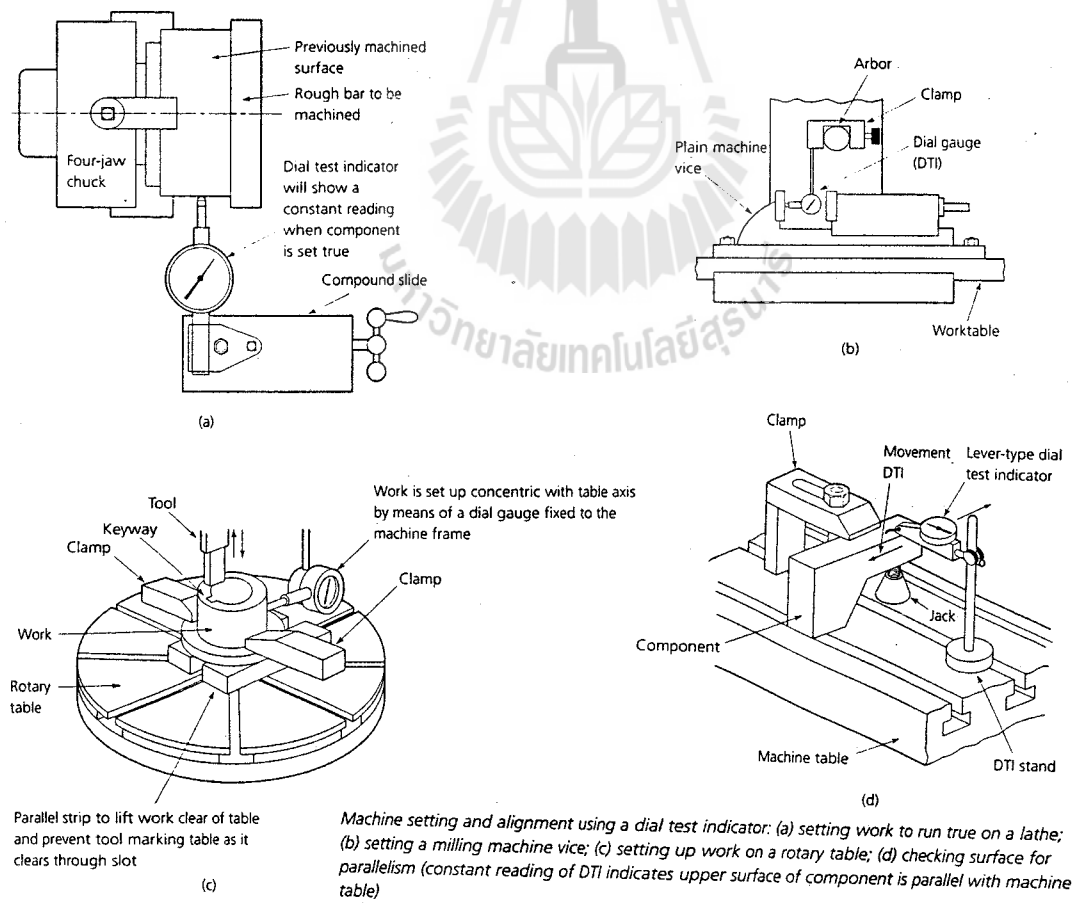


รูป 4.26: Dial Test Indicator

- Plunger type: เป็นแบบที่ใช้กลไกภายในเป็น เฟืองสะพาน(rack) กับเฟืองฟันตรง(pinion) เปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงเส้นตรงของก้านเพลา (plunger) เป็นการหมุนของเข็มในหน้าปัด นอกจากนี้ยังมีการใช้ชุดเฟืองทดเพื่อขยายการหมุนของเข็ม ทำให้สามารถแบ่งสเกลของหน้าปัดให้อ่านค่าได้ชัดเจนขึ้น ที่หน้าปัดของ DTI มีสเกลอยู่ 2 สเกล คือ สเกลหลัก(main scale) อยู่ตรงกลางของหน้าปัด ใช้เข็มยาวชี้ และ สเกลรอง (secondary scale) ใช้เข็มสั้นชี้ ซึ่งสเกลรองนี้บอกจำนวนรอบของการหมุนของสเกลหลัก
- Lever Type: ใช้ระบบคานเป็นกลไกทำให้เข็มที่หน้าปัดหมุน DTI แบบนี้มีขอบเขตของการเคลื่อนที่ของปลายสัมผัส(stylus)น้อยกว่า และมีรูปร่างเล็กกระทัดรัดกว่าแบบแรก ส่วนมากนิยมใช้กับการ set เครื่องจักร และเครื่องมือ หรือใช้ในการตรวจสอบตำแหน่งของส่วนต่างๆของรูปลักษณ์(machined features) ในชิ้นงาน รูป 4.27 - 4.28 แสดงการใช้ DTI ทั้งสองชนิด ในงานต่างๆ



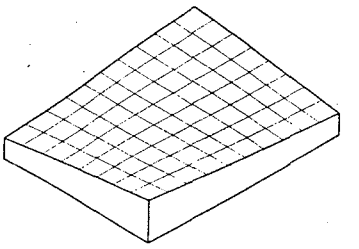
รูป4.27: Plunger-type DTI



Machine setting and alignment using a dial test indicator: (a) setting work to run true on a lathe; (b) setting a milling machine vice; (c) setting up work on a rotary table; (d) checking surface for parallelism (constant reading of DTI indicates upper surface of component is parallel with machine table)

รูป 4.28: การใช้ DTI เซ็ตเครื่อง

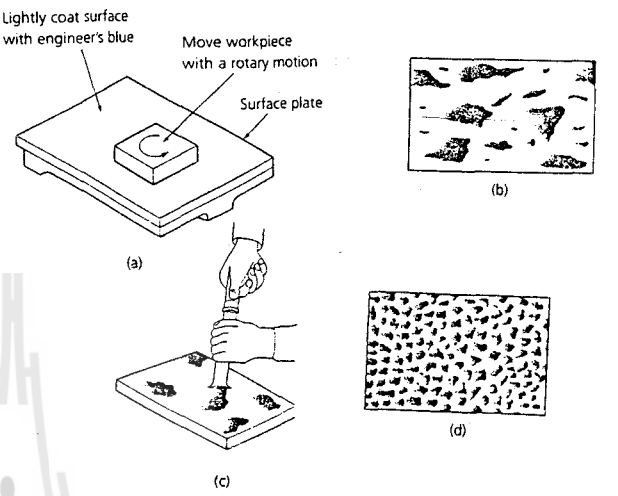
1.2 การตรวจสอบเรขาคณิตของผิว



รูป 4.29: ผิวที่ไม่ราบ

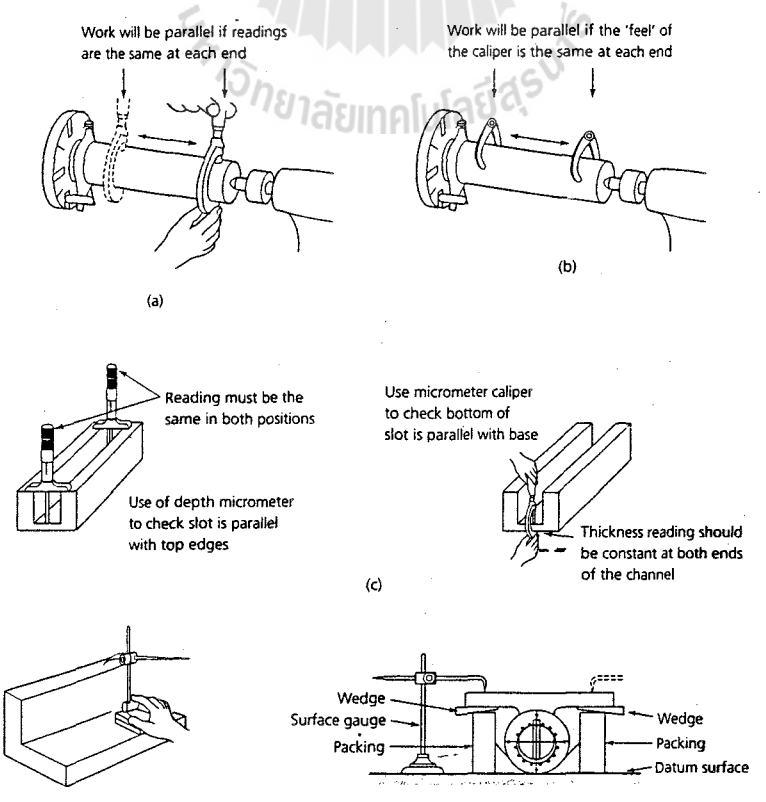
- **ความราบ** (Flatness): หมายถึงการที่ทุกจุดของผิวอยู่ในระนาบเดียวกัน ในรูป 4.29 แสดงผิวที่มีเส้นตรงที่ขนานกับขอบ ซึ่งไม่ใช่ผิวราบ เพราะเส้นตรงทุกเส้นไม่ได้อยู่ในระนาบเดียวกัน ผิวแบบนี้ถ้าเราตรวจสอบความราบโดยเอาสันบรรทัดทาบในทิศทางที่ขนานกับขอบ เราจะไม่เห็นความเบี่ยงเบนของผิวจากระนาบ แต่ถ้าทาบสันบรรทัดในแนวทแยงมุม ก็จะเห็นความบกพร่องของผิวได้

การตรวจสอบความราบ(flatness)ของผิว หมายถึงการตรวจสอบว่าผิวที่ถูกตรวจสอบเบี่ยงเบนไปจากระนาบที่แท้จริง(true plane)เท่าใด ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี ด้วยการใช้เครื่องมือทางแสง หรือทางไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนมาก หรือใช้เครื่องมือธรรมดาๆ ใน workshop เช่นใช้ วิธีเปรียบเทียบกับ surface plate ซึ่งเป็นวิธีที่มักใช้กันอยู่เสมอ วิธีนี้ใช้สีน้ำเงินที่ใช้ร่างแบบ (engineering blue) ทาบนผิวของ surface plate แล้วนำชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบความราบมาหมุนเคลื่อนที่บน surface plate (รูป 4.30 a) สีจาก surface plate จะติดที่ผิวงานบริเวณที่สูงกว่าส่วนอื่นๆ (รูป 4.30 b) การแต่งผิวให้ราบ ทำได้ด้วยการทำขูด(scraping)ด้วย scraper (รูป 30 c) และทำเช่นนี้จนกระทั่ง เมื่อชิ้นงานหมุนกับ surface plate แล้ว มีสีติดกระจายสม่ำเสมอทั่วผิว (รูป 4.30 d)



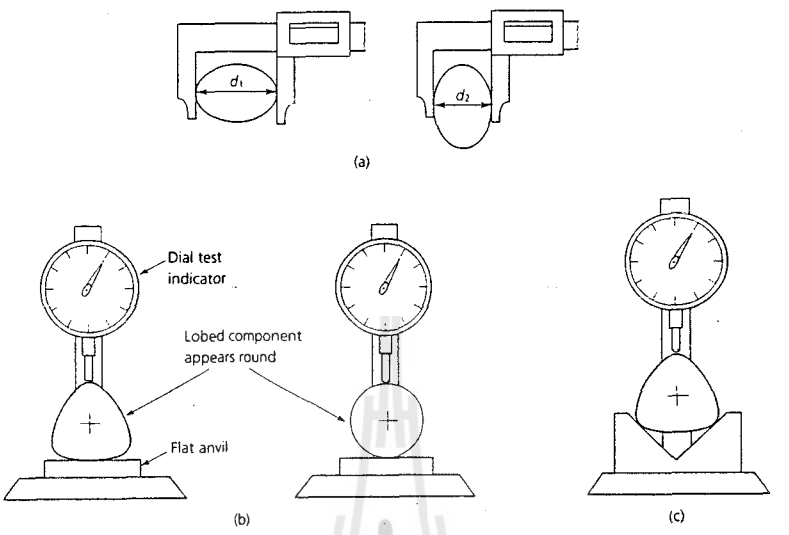
รูป 4.30: การตรวจสอบความราบและการปรับผิว

- **ความขนาน** (parallelism): หมายถึงระยะห่างเท่าๆกันระหว่างเส้น 2 เส้นหรือผิว 2 ผิว ตลอดความยาว ซึ่งสามารถวัดได้หลายวิธี ดังในรูป 4.31



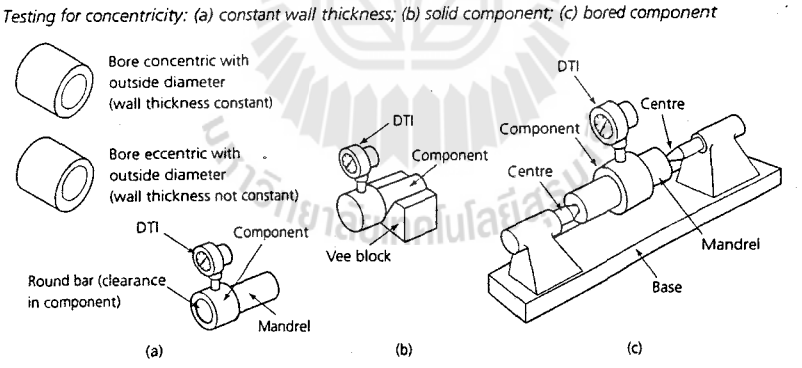
รูป 4.31: การตรวจสอบความขนาน

- **ความกลม** (roundness): ของผิวชิ้นงานหมายถึงความใกล้เคียงของผิวชิ้นงานกับความกลมที่แท้จริง งานบางอย่างเราสามารถตรวจสอบความกลมของผิวได้ด้วยการวัดเช่น ถ้าชิ้นงานเป็นรูปวงรี (รูป 4.32 a) เป็นต้น แต่ในบางกรณีอาจจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อื่นช่วยเช่น ในรูป 4.32 b จะไม่สามารถตรวจสอบความเบี่ยงเบนของความกลมได้ ต้องใช้ v - block ช่วยในรูป 4.32 c



รูป 4.32: **การตรวจสอบความกลม**

- **ความร่วมศูนย์** (concentricity): หมายถึงการที่วงกลมหรือผิวทรงกระบอกมากกว่า 1 ผิวมีแกนกลางร่วมกัน รูป 4.33 แสดงวิธีตรวจสอบความร่วมศูนย์

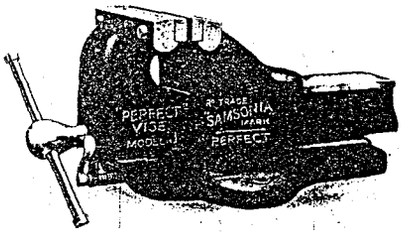


รูป 4.33: **การตรวจสอบความร่วมศูนย์**

2. **เครื่องมือช่างปรับ** (fitting tools)

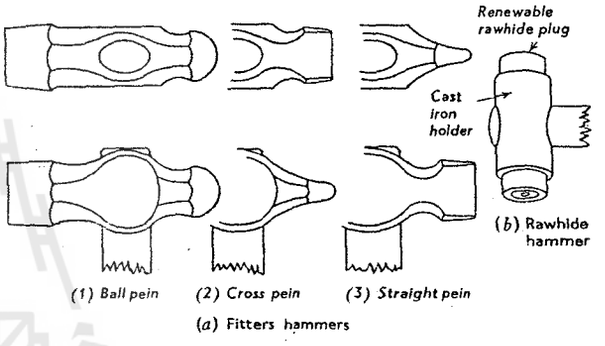
เป็นเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการปรับแต่งชิ้นงานด้วยมือ ซึ่งความรู้เรื่องเครื่องมือเหล่านี้เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับช่างเครื่องมือกล(machinist) เครื่องมือปรับที่เราจะกล่าวถึงในที่นี้ได้แก่

- **โต๊ะทำงานและปากกาจับงาน** (bench and vice): โต๊ะทำงานเป็นจุดสำหรับปรับแต่งชิ้นงาน มีปากกาจับงาน (vise or vice—รูป 4.34)ซึ่งถูกยึดติดแน่นกับโต๊ะทำหน้าจับชิ้นงาน ตามปกติแล้วโต๊ะทำงานควรมีความสูงในระดับที่ทำให้ผิวของปากกาจับงานอยู่ตรงระดับข้อศอกของผู้ปฏิบัติงาน



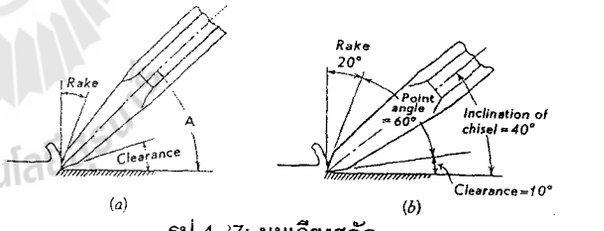
รูป 4.34: ปากกาจับงาน

- **ค้อนมือ** (hand-hammer): ทำด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (มีคาร์บอนประมาณ 0.6%C) โดยวิธีการตีขึ้นรูป(forging) ที่ปลายทั้งสองข้าง,มีการชุบแข็ง และอบคืนตัว(tempering) ค้อนสำหรับงานเหล็กมีหลายแบบ (รูป 4.35) และมีขนาดตั้งแต่ 1/8 กก ถึง 1.5 กก แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือขนาดในช่วง 0:25 กก ถึง 1 กก ค้อนบางชนิดทำด้วยยางหรือหนังสัตว์ หรือโลหะอ่อน(เช่นตะกั่ว)ใช้สำหรับเคาะแต่งขั้นสุดท้ายและไม่ต้องการให้เกิดรอยเคาะ(รูป 4.35 b)

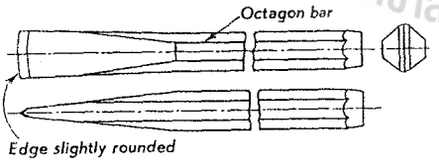


รูป 4.35: ค้อนมือแบบต่าง ๆ

- **สกัด(chisel)**: ที่พบเห็นกันอยู่บ่อยๆคือ สกัดแบน (flat chisel – รูป 4.36) ซึ่งทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ (tool steel)หรือเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ในตาราง 4.2 แสดงมุมสกัด(chisel angle)ที่เหมาะสมสำหรับโลหะแต่ละอย่าง ในการใช้สกัดแบบนี้ มีสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือพยามยามให้เกิดมุมหลบ(clearance angle) ประมาณ = 10 °, ดังนั้นมุมที่แกนสกัดทำกับผิวระนาบคือ (A) = (ครึ่งหนึ่งของมุมสกัด) + (มุมหลบ): เช่น ถ้ามุมสกัด = 60°, ควรเอียงแกนของสกัดประมาณ = 30+10 = 40° เป็นต้น (รูป 4.37) และ ในรูป 4.38 แสดงตัวอย่างของการใช้สกัดแบน



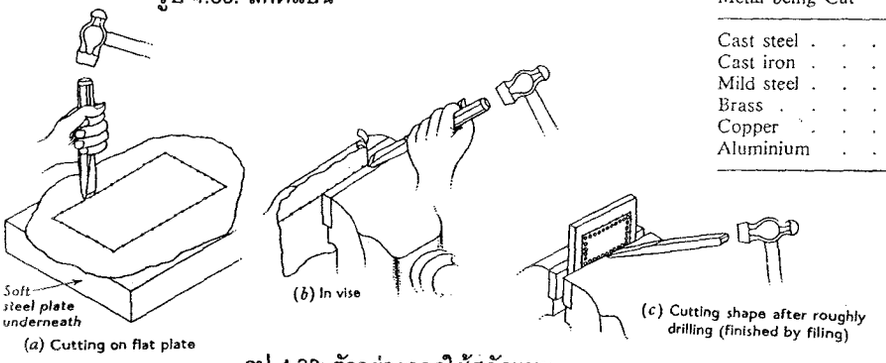
รูป 4.37: มุมเอียงสกัด



รูป 4.36: สกัดแบน

ตาราง 4.2: แสดงมุมสกัด

Metal being Cut	Angle of Chisel Point
Cast steel	65°
Cast iron	60°
Mild steel	55°
Brass	50°
Copper	45°
Aluminium	30°



รูป 4.38: ตัวอย่างการใช้สกัดแบน

- **เหล็กตอกนำศูนย์** (center punch): เป็นแท่งเหล็กปลายเรียวและแหลม (รูป 4.39) ใช้ร่วมกับค้อน สำหรับตอกให้เป็นจุดบนผิวงาน เพื่อกำหนดตำแหน่งรูที่จะเจาะ

รูป 4.39: Center punch

- **เลื่อยมือ** (hacksaw): เลื่อยมือ (รูป 4.40) มีให้เลือกใช้อยู่ 3 ขนาดตามความยาวของใบเลื่อย ซึ่งมีความยาว 200, 250, และ 300 mm (หรือ 8", 10" และ 12") สำหรับขนาดที่ใช้ในงานทั่วๆไปคือ ขนาด (ยาวxกว้าง) = 300x12 mm (หนาประมาณ 0.6 mm) มีใบเลื่อยให้เลือกใช้ 2 ชนิดคือ ใบเลื่อยเหล็กกล้าคาร์บอนสูง และ ใบเลื่อย เหล็กกล้าความเร็วสูง(high speed steel, HSS) ซึ่งแต่ละชนิดอาจเป็นแบบแข็งเฉพาะที่ฟัน (soft-backed or flexible blade) หรือเป็นแบบแข็งทั้งใบ (all hard or solid blade) แบบแรกเหมาะกับกรณีที่ไม่สามารถควบคุมแนวการเลื่อยได้แน่นอน เช่น ต้องทำการเลื่อยในบริเวณจำกัด จึงจำเป็นต้องบิดใบเลื่อยบ้างในขณะเลื่อย เป็นต้น ส่วนแบบหลัง ใช้ในกรณีที่สามารถจับชิ้นงานได้แน่นและสามารถควบคุมแนวการเลื่อยได้ดี

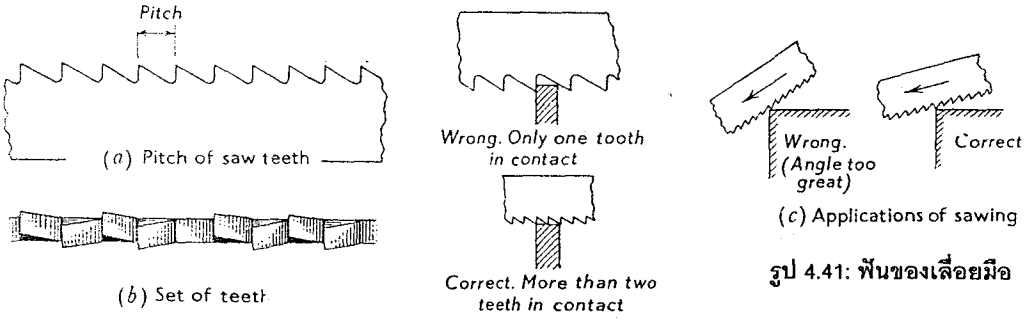
รูป 4.40: Hacksaw

ฟันใบเลื่อยจะถูกดัดให้เอียงออกไปจากแนวของสันใบเลื่อย (set) ซึ่งทำให้เกิดคลองเลื่อย (kerf) ที่มีขนาดความกว้างกว่าความหนาของใบเรื่อย (รูป 4.41 b) เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวใบเลื่อยติดกับร่องของลอยตัดในขณะเลื่อย

การเลือกใช้ขนาดของฟันใบเลื่อยขึ้นอยู่กับ ชนิดและความหนาของโลหะที่ถูกตัด มีหลักการเลือกกว้างๆอยู่ว่า **ฟันหยาบใช้กับโลหะอ่อน ฟันละเอียดใช้กับโลหะแข็ง และจะต้องมีจำนวนฟันอย่างน้อย 2 ฟันสัมผัสตลอดความหนาของชิ้นงาน** (รูป 4.41 c) ซึ่งการบอกความหยาบหรือละเอียดของฟัน ใช้วิธีบอกด้วยระยะ พิตช์ (pitch – รูป 4.41 a) ของฟัน (หรือบอกเป็นระบบนิ้ว – จำนวนฟันต่อระยะ 1 นิ้ว หรือ teeth per inch: ย่อว่า TPI)

ใบเลื่อยที่มีฟันขนาดพิตช์ 1.5 mm (หรือ 18 TPI) เป็นใบเลื่อยที่ใช้สำหรับงานทั่วๆไป ส่วนฟันขนาดอื่นและตัวอย่างการใช้งาน เป็นดังนี้:- (1) พิตช์ ขนาด 1.75 mm (หรือ 14 TPI) ใช้กับทองเหลือง, ทองแดง, และเหล็กหล่อ; (2) พิตช์ ขนาด 1 mm (24 TPI) ใช้กับเหล็กกล้า(silver steel rods)ท่อน, เหล็กกล้าหล่อ; และ เหล็กกล้าโครงสร้างหน้าตัดบาง; (3) พิตช์ ขนาด 0.75 mm ใช้กับโลหะแผ่นบาง(steel sheet) และท่อบางๆ

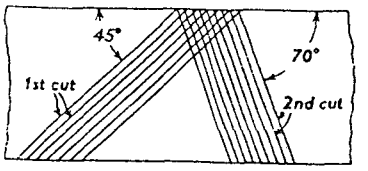
ความเร็วในการเลื่อย ควรใช้ประมาณ 50-60 สโตกต่อ นาที (strokes / min) และในสโตกกลับ ควรจะยกใบเลื่อยเล็กน้อย สาเหตุที่ทำให้ใบเลื่อยหักมีหลายอย่างเช่น (1) เลื่อยผิดวิธี และเลื่อยเร็วเกินไป; (2) ออกแรงกดใบเลื่อยมากเกินไป; (3) ขึ้นใบเลื่อยไม่ตึง; (4) เลื่อยซ้ำในรอยเลื่อยที่ไม่สม่ำเสมอ; (4) จับงานไม่แน่น



รูป 4.41: ฟันของเลื่อยมือ

- **ตะไบ** (files): เป็นเครื่องมือสำหรับปรับแต่งผิวโลหะที่สำคัญ มักทำด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนสูง และมีหลายแบบ เราสามารถจัดกลุ่มตะไบได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆคือ:-

- Single-cut files: เป็นตะไบที่มีแนวคมตัดเป็นเส้นๆในแนวเดียว ตะไบกลุ่มนี้ใช้สำหรับแต่งผิวให้เรียบ (smooth finish) หรือ ใช้กับวัสดุแข็ง
- Double-cut files: มีแนวคมตัด 2 แนวทำมุมทแยงกัน (รูป4.41) เพื่อให้กินเนื้อโลหะได้มากขึ้น



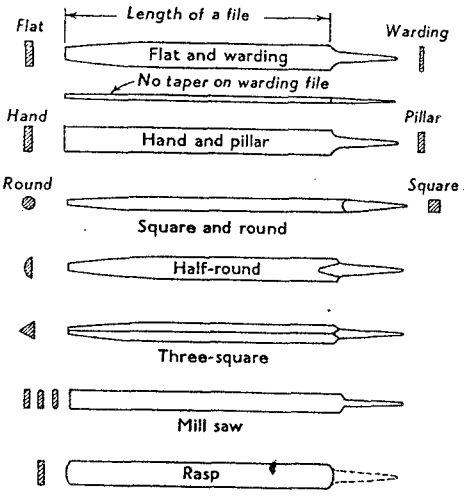
รูป 4.41: ร่องที่ทำให้เกิดฟันตะไบ

ตะไบที่ช่างเครื่องมือกลใช้อยู่เสมอได้แก่ (รูป 4.42)

(1) **ตะไบแบน** (flat file): มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าสม่ำเสมอเป็นระยะ 2/3 ของความยาวตะไบ หลังจากนั้นความกว้างจะเรียว (taper) เข้าหาปลายตะไบ

(2) **ตะไบมือ** (hand file): แตกต่างจากชนิดแรกตรงที่ปลายไม่เรียว

ตะไบสองชนิดแรกนี้ จัดว่าเป็นตะไบสำหรับใช้งานทั่วไป ซึ่งบางแบบจะมีสันตะไบสันหนึ่งไม่มีฟัน (เป็นผิวเรียบธรรมดา) เราเรียกสันตะไบเช่นนี้ว่า safe edge เพราะเป็นสันที่ป้องกันไม่ให้เกิดการขูดผิวของส่วนที่ไม่ต้องการตะไบออก เช่นใช้ในเวลาตะไบผนังของร่องสี่เหลี่ยมและไม่ต้องการให้ตะไบกินผิวของก้นร่อง เป็นต้น



รูป 4.42: ชนิดของตะไบ

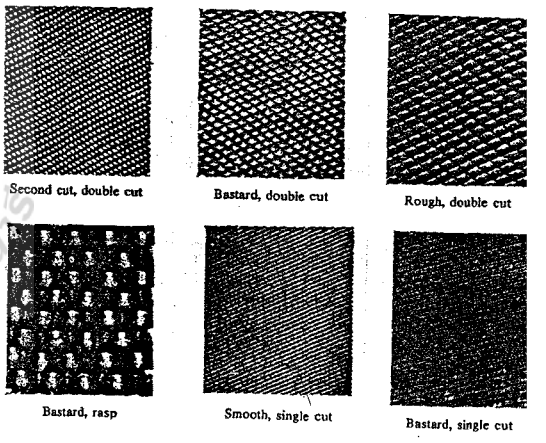
(3) **ตะไบสี่เหลี่ยม** (square file): ใช้สำหรับตะไบร่องหรือรูสี่เหลี่ยม

(4) **ตะไบกลม** (round file): สำหรับตะไบรูกลม

(5) **ตะไบท้องปลิง** (half round file): สำหรับแต่งผิวโค้งหรือผิวราบ

(6) **ตะไบสามเหลี่ยม** (three square file): สำหรับตะไบแต่งมุมที่มีขนาดเล็กกว่า 90°

นอกจากนี้แล้วยังมีตะไบชนิดอื่นอีก เช่น warding file – เป็นตะไบบางๆ สำหรับแต่งร่องแคบๆ; pillar file – เหมือนตะไบมือแต่มีหน้ากว้างที่แคบกว่า; mill files – ใช้สำหรับลับคมใบเลื่อยตัดไม้ เป็นต้น

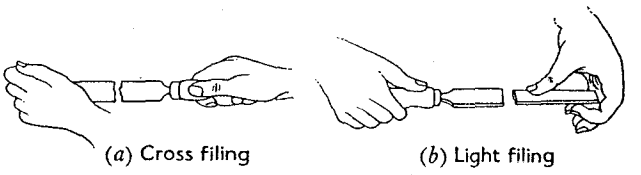


รูป 4.43: เกรดของตะไบ(ยาว 300 mm)

ความหยาบของตะไบหรือเกรดของตะไบ (coarseness or grade of cut): มีการแบ่งระดับความหยาบของฟันตะไบไม่ว่าจะเป็นแบบ single-cut หรือแบบ double-cut ก็ตาม ออกเป็น: rough, coarse, bastard, second-cut, smooth, และ dead smooth ในรูป 4.43 เปรียบเทียบลักษณะของความหยาบของตะไบ (ขนาดความยาว 300 mm) แต่โดยทั่วไปแล้ว เรามักใช้เพียง 3 เกรดคือ coarse, bastard และ smooth

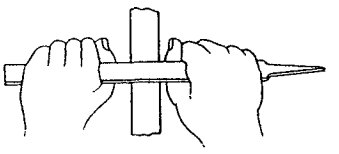
การใช้ตะไบ: มีวิธีตะไบผิวระนาบอยู่ 2 วิธีคือ **ตะไบขวาง** (cross filing) และ **ตะไบลาก** (draw filing) วิธีแรกเป็นการตะไบเพื่อให้เกิดผิวระนาบ โดยการสลับทิศทางการตะไบเพื่อให้เกิดรอยตะไบที่ขวางกัน วิธีการเช่นนี้จะช่วยให้เห็นผิวของส่วนที่สูงกว่าหรือต่ำกว่าส่วนอื่น จึงทำให้สามารถปรับผิวให้ราบสม่ำเสมอกันได้ ในขณะตะไบ, จะต้องใช้แรงกดและผลักตะไบไปข้างหน้า แต่ตอนดึงตะไบกลับให้ถอนกดออก การใช้แรงกดมากหรือน้อย อาศัยวิธีการจับตะไบ (รูป 4.44) ซึ่งจะมีผลต่อการความมากหรือน้อยในการกินเนื้อโลหะของตะไบ

ส่วนวิธี draw filing เป็นการปรับผิวขั้นสุดท้ายเพื่อให้ผิวเรียบและมีรอยละเอียด (good finish) ส่วนมากมักใช้ตะไบละเอียด ในรูป 4.45 แสดงการจับตะไบทำ draw filing



รูป 4.44: การจับตะไบ

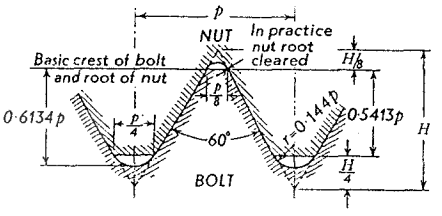
ในการตะไบโลหะอ่อนๆ เศษโลหะมักอุดติดอยู่ในร่องฟันตะไบ ทำให้ตะไบลื่นและไม่กินเนื้อโลหะเราเรียกเหตุการณ์เช่นนี้ว่า "pinning" วิธีป้องกัน คือใช้ชอล์กถูบนผิวตะไบ เพื่อให้ผงชอล์กแทรกรองที่ก้นร่องตะไบทำให้เศษโลหะจากการตะไบหลุดจากร่องตะไบได้ง่าย



รูป 4.45: Draw filing

- **เกลียวของสกรู (screw threads):**

ในปัจจุบัน เกลียวเมตริก ISO (ISO metric thread) เป็นเกลียวมาตรฐานสำหรับสกรูยึด (fastening screws)ที่ใช้แพร่หลายมากที่สุด (รูป 4.46) ก่อนที่จะมีเกลียวชนิดนี้ อังกฤษ อเมริกา และ คานาดา ได้ทำการตกลงใช้เกลียวมาตรฐานชนิดเดียวกัน(1949) และ เป็นเกลียวที่เรียกว่า " Unified Thread" (รูป 4.47) ซึ่งประกอบด้วยเกลียวหยาบ (Unified National Coarse thread – UNC thread) และ เกลียวละเอียด (Unified National Fine thread -- UNF thread)



Recommended* Bolt Diameter (mm)	ISO metric Coarse				ISO metric Fine			
	Designation	Pitch (mm)	Bolt Root Dia. (mm)	Nut Core Dia. (mm)	Designation	Pitch (mm)	Bolt Root Dia. (mm)	Nut Core Dia. (mm)
1·6	M1·6×0·35	0·35	1·17	1·22				
2	M2×0·4	0·4	1·51	1·57				
2·5	M2·5×0·45	0·45	1·95	2·01				
3	M3×0·5	0·5	2·39	2·46				
4	M4×0·7	0·7	3·14	3·24				
5	M5×0·8	0·8	4·02	4·13				
6	M6×1	1	4·77	4·92				
8	M8×1·25	1·25	6·47	6·65	M8×1	1	6·77	6·92
10	M10×1·5	1·5	8·16	8·38	M10×1·25	1·25	8·47	8·65
12	M12×1·75	1·75	9·85	10·11	M12×1·25	1·25	10·47	10·65
16	M16×2	2	13·55	13·84	M16×1·5	1·5	14·16	14·38
20	M20×2·5	2·5	16·93	17·29	M20×1·5	1·5	18·16	18·38
24	M24×3	3	20·32	20·75	M24×2	2	19·55	21·84
30	M30×3·5	3·5	25·71	26·21	M30×2	2	25·55	27·84
36	M36×4	4	31·09	31·67	M36×3	3	32·32	32·75
42	M42×4·5	4·5	36·48	37·13	M42×4	4	37·09	37·67
48	M48×5	5	41·87	42·59	M48×4	4	43·09	43·67
56	M56×5·5	5·5	49·25	50·05	M56×4	4	51·09	51·67
64	M64×6	6	56·64	57·50	M64×4	4	59·09	59·67

Note method of designating thread: M(Dia)×(Pitch), e.g. M10×1·5.
* BS 3643 also specifies second choice and third choice.

รูป 4.46: The ISO metric thread

- **การทำเกลียวในด้วยดอกแท๊ป:**

ดอกแท๊ป(tap) มีลักษณะคล้ายสกรู แต่มีร่อง 4 ร่องบนผิวเพื่อทำให้เกิดคมตัด ดอกแท๊ปส่วนใหญ่ทำ ด้วยเหล็กกล้าความเร็วสูง (HSS) ดอกแท๊ปชุดหนึ่งสำหรับทำเกลียวในขนาดหนึ่งประกอบด้วยดอกแท๊ป 3 ตัว: ดอกเรียว (taper tap); ดอกที่สอง (second tap) และ ดอกสุดท้าย (finishing or bottoming tap – รูป 4.48)

การทำเกลียวเริ่มต้นจากดอกเรียวก่อน แล้วต่อด้วยดอกที่สองและในบางกรณีอาจจำเป็นต้องใช้ดอกสุดท้าย เช่นในกรณีของการทำเกลียวในรูตันเป็นต้น

รูที่ต้องเจาะก่อนทำเกลียวควรมีขนาดเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแกนของเกลียวใน (core diameter) ดังนั้นขนาดของดอกสว่านที่ใช้เจาะรู

Thread form profile identical with the ISO metric thread on Appendix 2.
Particulars of Diameters and Pitches

Bolt Diameter (in)	Unified Coarse				Unified Fine			
	Designation	Thread per in	Bolt Root Dia. (in)	Nut Core Dia. (in)	Designation	Thread per in	Bolt Root Dia. (in)	Nut Core Dia. (in)
1/4 (0·250)	1/4–20. UNC	20	0·1887	0·1959	1/4–28. UNF	28	0·2062	0·2113
5/16 (0·3125)	5/16–18. UNC	18	0·2443	0·2524	5/16–24. UNF	24	0·2614	0·2674
3/8 (0·375)	3/8–16. UNC	16	0·2983	0·3073	3/8–24. UNF	24	0·3239	0·3299
7/16 (0·4375)	7/16–14. UNC	14	0·3499	0·3602	7/16–20. UNF	20	0·3762	0·3834
1/2 (0·50)	1/2–13. UNC	13	0·4056	0·4167	1/2–20. UNF	20	0·4387	0·4459
9/16 (0·5625)	9/16–12. UNC	12	0·4603	0·4723	9/16–18. UNF	18	0·4943	0·5024
5/8 (0·625)	5/8–11. UNC	11	0·5135	0·5266	5/8–18. UNF	18	0·5568	0·5649
3/4 (0·750)	3/4–10. UNC	10	0·6273	0·6417	3/4–16. UNF	16	0·6733	0·6823
7/8 (0·875)	7/8–9. UNC	9	0·7387	0·7547	7/8–14. UNF	14	0·7874	0·7977
1 (1·00)	1–8. UNC	8	0·8466	0·8647	1–12. UNF	12	0·8978	0·9098
1 1/8 (1·125)	1 1/8–7. UNC	7	0·9497	0·9704	1 1/8–12. UNF	12	1·0228	1·0348
1 1/4 (1·250)	1 1/4–7. UNC	7	1·0747	1·0954	1 1/4–12. UNF	12	1·1478	1·1598
1 3/8 (1·375)	1 3/8–6. UNC	6	1·1705	1·1946	1 3/8–12. UNF	12	1·2728	1·2848
1 1/2 (1·50)	1 1/2–6. UNC	6	1·2955	1·3196	1 1/2–12. UNF	12	1·3978	1·4098
1 3/4 (1·750)	1 3/4–5. UNC	5	1·5046	1·5335				
2 (2·00)	2–4 1/2. UNC	4 1/2	1·7274	1·7594				
Thence by steps of 1/4 in to 4 in								

(The clearing of the root of the nut by a radius as shown causes this diameter to be increased by 0·072*p*.)

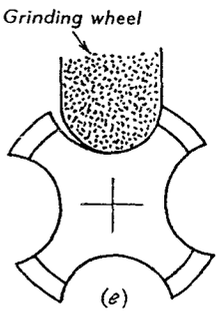
รูป 4.47: The Unified thread

(tap drill size)จึงต้องมีขนาดเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางนี้ ซึ่งเราสามารถอ่านได้ตารางในรู 4.46 และ 4.47 หรือจากคำนวณ ตัวอย่างเช่น tap drill size สำหรับทำเกลียวขนาด M20x2.5 คือ 20-2x0.5413x(2.5) = 17.29 mm เนื่องจาก core dia. ของเกลียวในจะอยู่ในช่วงประมาณ 88% - 90% ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางนอกของเกลียว เพราะฉะนั้น เราอาจใช้สูตรประมาณค่า tap drill size ได้ดังนี้: **tap drill size = OD – p** โดยที่ OD คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางนอกของเกลียว และ p คือระยะพิตช์(pitch)ของเกลียว

(*a*) Taper tap

(*b*) Second tap

(*c*) Plug tap

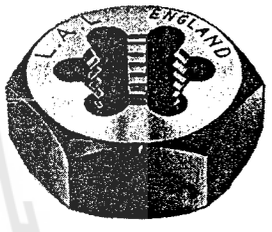


John Hall (Tools), Ltd.

(*d*) Adjustable tap wrench

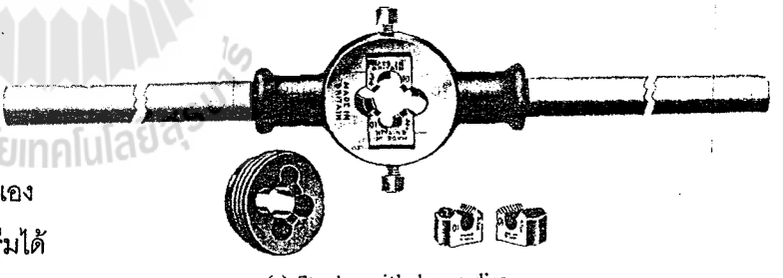
รูป 4.48 : ชุดดอกแท๊ป และ ด้ามจับ (wrench)

❑ **การทำเกลียวในด้วยดาย** (dying a thread): ดาย (dies) เป็นเครื่องมือสำหรับทำเกลียวนอก มีลักษณะคล้ายกับแป้นเกลียว (nut) ทำด้วยเหล็กกล้า HSS มีให้เลือกใช้หลายแบบ (รูป 4.49) เช่น แบบแป้นเกลียว(solid die nut) – ใช้สำหรับซ่อมหรือปรับเกลียวที่มีอยู่ก่อน; แบบมีร่องผ่า (split die) และ แบบแยกชิ้นได้ (loose dies) ซึ่ง 2 แบบหลังนี้ ใช้สำหรับ ทำเกลียวใหม่ บนเพลาซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ OD ของเกลียว



(*a*) Solid die nut

(*b*) Split die and stocks



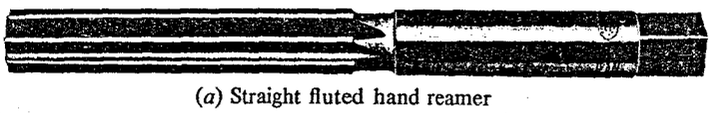
(*c*) Stocks with loose dies

รูป 4.49: Dies and stocks

• **ดอกรีม (reamer)**: เป็นเครื่องมือสำหรับปรับผิวรูให้เรียบและทำให้รูมีขนาดเที่ยงตรง ตัวดอกรีมเองไม่ทำให้เกิดรู ต้องมีรูอยู่ก่อนจึงจะสามารถใช้ดอกรีมได้ เราเรียกวิธีการปรับขนาดและผิวรูแบบนี้ว่า "reaming" ซึ่งสามารถทำได้ด้วยมือ และใช้เครื่องมือกล เช่นเครื่องเจาะ หรือ เครื่องกลึง เป็นต้น

มีดอกรีมให้เลือกใช้หลายแบบ เช่น

❑ Hand reamer: เป็นดอกรีมที่ใช้มือหมุนเข้าไปในรู ดอกรีมแบบนี้จะมีปลายด้ามจับเหมือนกับดอกแท๊ป (รูป4.50 a) คือ เป็นหัวสี่เหลี่ยมเพื่อให้มือหมุนดอกแท๊ป(wrench)จับ (reaming และ tapping ใช้มือหมุนอันเดียวกัน)

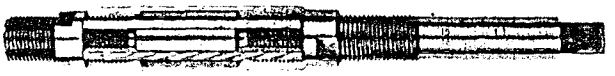


(*a*) Straight fluted hand reamer

(*b*) Machine reamer (spiral fluted)

รูป 4.50 : Hand and machine reamers

- Machine reamer: มีด้ามเรียวสำหรับสวมเข้ากับเพลาหรืออุปกรณ์จับบนเครื่องมือกล (รูป 4.50 b)
- Expanding reamer: เป็นดอกรีมชนิดที่ปรับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางได้ (รูป 4.51)
- Taper pin reamer: ในรูป 4.52 สำหรับทำรูเรียวเพื่อสวมหมุดเรียว (taper pin)



รูป 4.51: Expanding reamer

รูป 4.52: Taper pin reamer

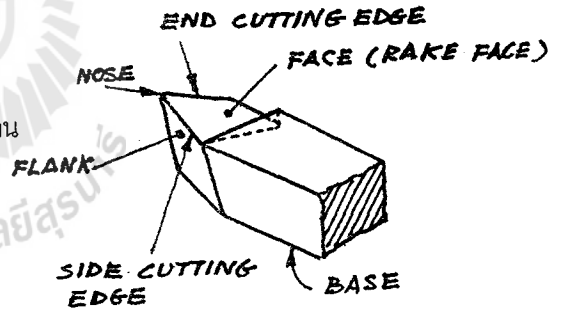
จะสังเกตเห็นได้อย่างหนึ่งว่าฟันของดอกรีม มีทั้งชนิดที่เป็นฟันตรงและเป็นฟันบิด (helix flute) ในการใช้งาน จะต้องไม่นำดอกรีมฟันตรงไปใช้กับรู ที่มีร่องอยู่ที่ผิว เพราะจะทำให้ฟันของดอกรีมหักได้ง่ายในขณะทำ reaming นอกจากนั้น ขนาดของรูที่เจาะก่อน reaming ควรเหลือเนื้อโลหะสำหรับทำ reaming ให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยทั่วไปมักจะเผื่อไว้ประมาณ 0.05 – 0.15 mm

3. **เครื่องมือกล** (machine-tools): เป็นเครื่องมือที่มีกลไกขับเคลื่อนชิ้นงานหรือมีดตัด(cutting tool) โดยอาศัยกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าที่ติดตั้งภายในเครื่อง ซึ่งการเคลื่อนที่อย่างมีความสัมพันธ์กันระหว่างชิ้นงานและมีดตัด ทำให้เกิดการตัดโลหะชิ้นงานให้เป็นรูปทรงและมีขนาดตามที่ต้องการ

3.1 **รูปร่างของมีดตัด** (cutting tool geometry): เราอาจแบ่งประเภทของมีดตัดที่ใช้กับเครื่องมือกล ได้เป็น 2 ประเภทคือ ; (1) มีดตัดคมเดี่ยว(single-point cutting tool) เช่น มีดกลึง และ มีดไส เป็นต้น; (2) มีดตัดหลายคม (multiple-point cutting tool) เช่น ดอกสว่าน, ดอกรีม และ ดอกแท๊ป เป็นต้น อาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่ามีดตัดหลายคมคือ มีดตัดคมเดี่ยวหลายๆอันรวมอยู่ด้วยกัน ทั้งนี้เพราะว่าหลักการตัดของคมตัดแต่ละคมของมีดตัดหลายคมจะเหมือนกับมีดตัดคมเดี่ยวทุกอย่าง

ในรูป 4.53 แสดงส่วนต่างๆ ของมีดตัดคมเดี่ยวกล่าวคือ:

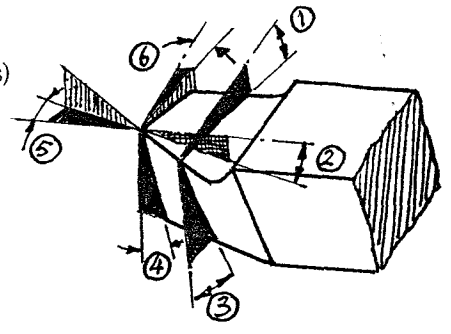
- Flank: เป็นผิวของมีดบริเวณที่ผิวงานที่เพิ่งถูกตัดเคลื่อนที่ผ่าน
- Base: ผิวล่างของมีดตัด
- Nose: ปลายคมตัดที่เป็นมุมมนเป็นรัศมี
- Face: ผิวของมีดตัดตรงส่วนที่เศษโลหะเคลื่อนที่ผ่าน
- Cutting edges: คือส่วนที่ใช้ตัดโลหะ ซึ่งมี 2 ส่วนคือ คมตัดด้านข้าง(side cutting edge) และคมตัดด้านปลาย (end cutting edge)



รูป 4.53: Single-point cutting tool

ผิวมีดเหล่านี้ประกอบกันขึ้นเป็นมุมมีดตัด (tool angles)

(1) **มุมคายด้านข้าง** (side rake angle);
(2) **มุมคายด้านหน้า** (front rake or back rake);
(3) **มุมหลบด้านข้าง** (side clearance angle);
(4) **มุมหลบด้านหน้า** (front clearance angle);
(5) **มุมคมตัดด้านข้าง** (side cutting edge angle);
(6) **มุมคมตัดด้านหน้า** (front cutting edge angle)



รูป 4.54: Tool angles

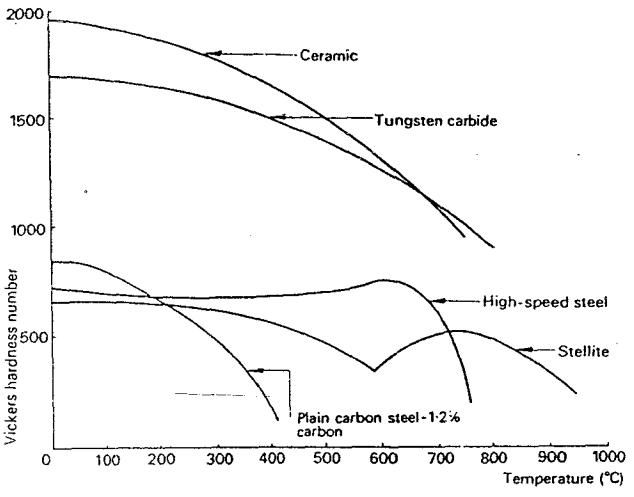
วัสดุสำหรับทำมีดตัดจะต้องมีคุณสมบัติคือ :-

(1) มีความแข็งแรงมากเพียงพอที่จะด้านแรงตัดโลหะได้

(2) มีความแข็งสูง สามารถทนต่อการสึกหรอได้ดี

(3) คงความแข็งที่อุณหภูมิสูงได้

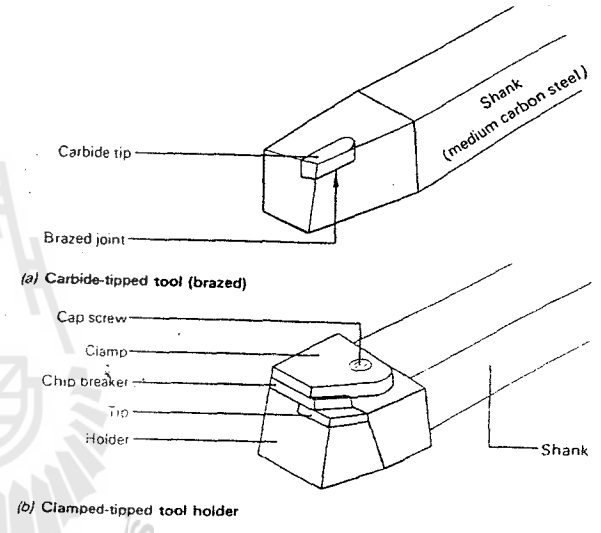
ในรูป 4.56 แสดงคุณสมบัติของวัสดุมีดตัดต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้:-



รูป 4.56: Hardness – Temperature Curve

❑ High-carbon steel: มีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.87 % – 1.2 % เมื่อชุบแข็งแล้วมีความแข็งสูง แต่ความแข็งจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพราะฉะนั้น มีดตัดที่ทำด้วยวัสดุชนิดนี้ มักจะเป็นมีดตัดสำหรับงานไม้เป็นส่วนใหญ่ เช่น สิ่ว, ใบมีดกบไสไม้ และดอกสว่านเจาะไม้ เป็นต้น

❑ High-Speed-Steel (HSS): เป็นเหล็กกล้าโลหะผสมชนิดที่รู้จักกันดี มีส่วนผสมของ Tungsten 18%, Chromium 4% และ Vanadium 1%: เรียกว่า 18-4-1 HSS เหล็กกล้าชนิดนี้ หลังจากได้รับการอบอ่อน(annealing) แล้ว สามารถนำไปตัดแปรรูปได้ง่าย และเมื่อได้รับการชุบแข็ง จะมีความแข็งสูง และคงความแข็งที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่า high-carbon steel ในขณะเดียวกันก็มีความเหนียว(toughness) และบิดหรืองอตัวได้บ้าง เพราะฉะนั้น จึงมักใช้ทำมีดตัดโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีดตัดที่มีมุมคายเป็นบวก (positive rake)



รูป 4.57: Carbide-tip single-point tool

❑ Stellite: เป็นโลหะผสมที่มี Cobalt เป็นส่วนผสมหลัก อาจมีเหล็กผสมอยู่เพียงเล็กน้อย หรือไม่มีเลย ตัวอย่าง เช่น Cobalt 50%, Tungsten 33%, Carbon 3% และ ธาตุอื่นๆอีก 14% เป็นต้น ใช้วิธีหล่อหลอมให้เป็นคมตัด และเจียรนัยให้เป็นมุมมีดตัด ไม่มีการชุบแข็ง วัสดุมีดตัดชนิดนี้อ่อนกว่า HSS เล็กน้อย แต่คงความแข็งได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า มักใช้เป็นมีดตัดที่มีมุมคายเป็นบวกมากๆ

❑ Cemented carbide: เกิดจากการอัดผงคาร์ไบด์ของโลหะชนิดเดียวหรือหลายชนิดเข้าด้วยกันให้เป็นก้อนคมตัดเล็ก ๆ(tool bit) แล้วนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน ทำให้ผงคาร์ไบด์ยึดติดกันแข็ง และหลังจากการเจียรนัยมุมคมตัดแล้ว สามารถใช้เป็นมีดตัดโลหะได้ดี ตามปกติจะใช้วิธี brazing หรือยึดด้วยสกรู ให้ติดกับด้ามมีดตัด (เช่น ด้ามมีดกลึง, ด้ามมีดไส) หรือ ติดกับตัวของคัตเตอร์ (เช่น ทำเป็นฟันของ milling cutter) ดังในรูป4.57

มีคมตัดคาร์ไบด์ให้เลือกใช้อยู่หลายชนิด เช่น:-

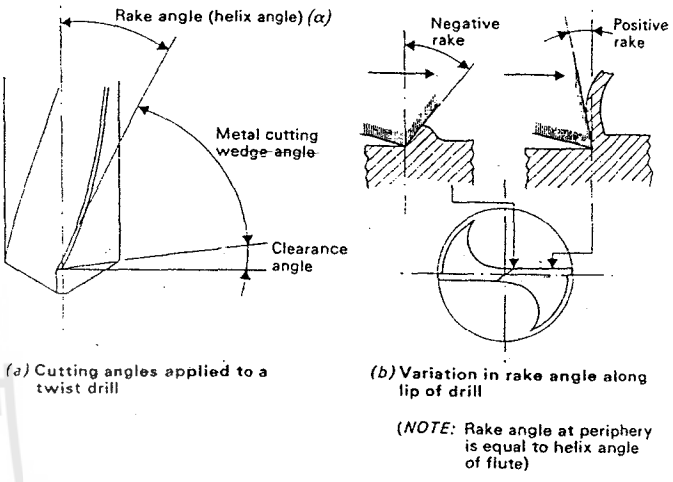
Tungsten carbide: มีความแข็งสูงแต่เปราะมาก เหมาะสำหรับตัดโลหะที่มีเศษโลหะไม่ต่อเนื่อง (discontinuous chips) เช่น เหล็กหล่อ หรือบรอนซ์ ซึ่งโลหะเหล่านี้ถึงแม้ว่าจะมีความแข็งแรงไม่สูงมากนัก แต่จะมีผิวค่อนข้างแข็ง อันเป็นผลจากการแข็งตัวในขณะหล่อหลอม การใช้ tungsten carbide อย่างเดียวมีข้อเสียที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ เนื้อ tungsten carbide มีรูพรุนเล็กๆ ทำให้เศษโลหะจากการตัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะที่เป็น ductile metal มักเข้าไป

หลอมติดกับปลายคมตัดเกิดเป็นเศษโลหะอีกชนิดหนึ่งเรียกว่า "built-up edge chip" เศษโลหะชนิดนี้หัก หลุดออกจากคมตัดได้ง่าย ทำให้มีดตัดเสียหาย และเกิดผิวงานไม่ดี

Mixed carbide: ใช้ผง tungsten carbide ผสมกับ ผง titanium carbide การทำเช่นนี้ทำให้ความแข็งของคมตัดลดลงบ้าง แต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้น จึงทำให้สามารถตัดโลหะที่มีความแข็งแรงสูงๆได้

นอกจากนี้ยังมี cemented carbide ชนิดที่ใช้เคลือบเฉพาะผิว (coated carbide) ซึ่งสามารถใช้กับความเร็วตัด (cutting speed) ได้สูงกว่า 2 ชนิดแรกถึง 30%

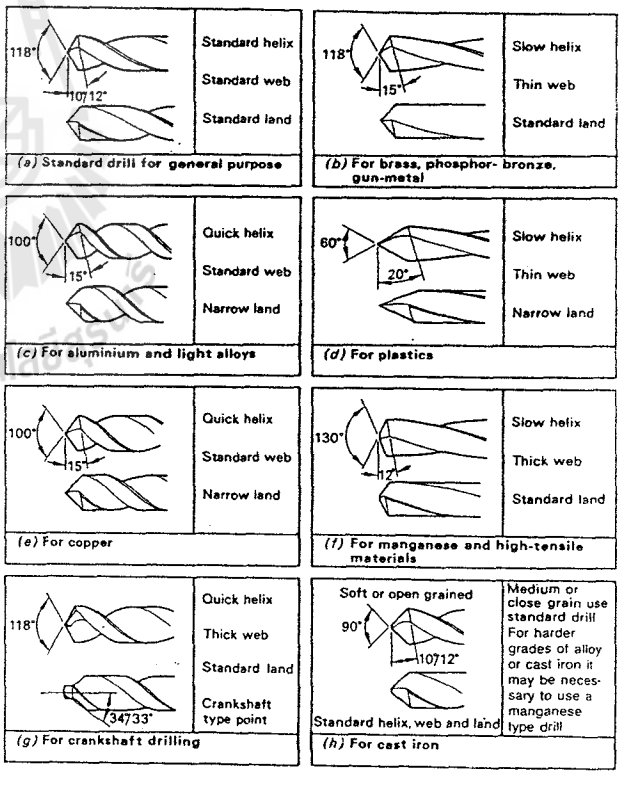
- Ceramics: คมตัดที่ทำจากเซรามิก มีความแข็งมากกว่า cemented carbide แต่จะเปราะมาก หากได้รับแรงกระแทกเพียงเล็กน้อยคมตัดอาจแตกหรือบิ่นได้ง่าย ดังนั้นคมตัดที่เป็นเซรามิกจึงต้องใช้มุมคายที่เป็นลบ (-5°) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับคมตัด และส่วนใหญ่แล้วใช้กับงานตัดขั้นสุดท้าย(finishing cut) โดยใช้ความเร็วตัดสูง(high cutting speed เช่น 150-300 m/min), ความลึกในการตัดต่ำ(low depth of cut) และ อัตราป้อนต่ำ(low feed rate)



รูป 4.58: Rake and clearance angles.

3.3 **ดอกสว่านร่องบิด** (twist drill): เป็นมีดตัดที่มีคมตัด 2 คม แต่ละคมตัดทำหน้าที่เหมือนกับมีดตัดคมเดี่ยวทุกอย่างหลาย ในรูป 4.58 แสดงลักษณะของมุมหลบ (clearance angle) และมุมคาย (rake angle) จะเห็นได้ว่า มุมคายของดอกสว่านคือมุม helix (α) ของร่องบิดดอกสว่าน ซึ่งเกิดจากการผลิตดอกสว่าน และ ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ มุมคายนี้จะมีค่าไม่คงที่ตลอดความยาวของคมตัด คือจะเปลี่ยนแปลงตั้งแต่เป็นมุมบวกที่ขอบคมตัดที่ผิวดอกสว่าน จนเป็นมุมลบตรงกึ่งกลางดอกสว่าน การลับคมดอกสว่านคือ การลับมุมหลบ และควบคุมมุมของปลายดอกสว่าน (point angle)

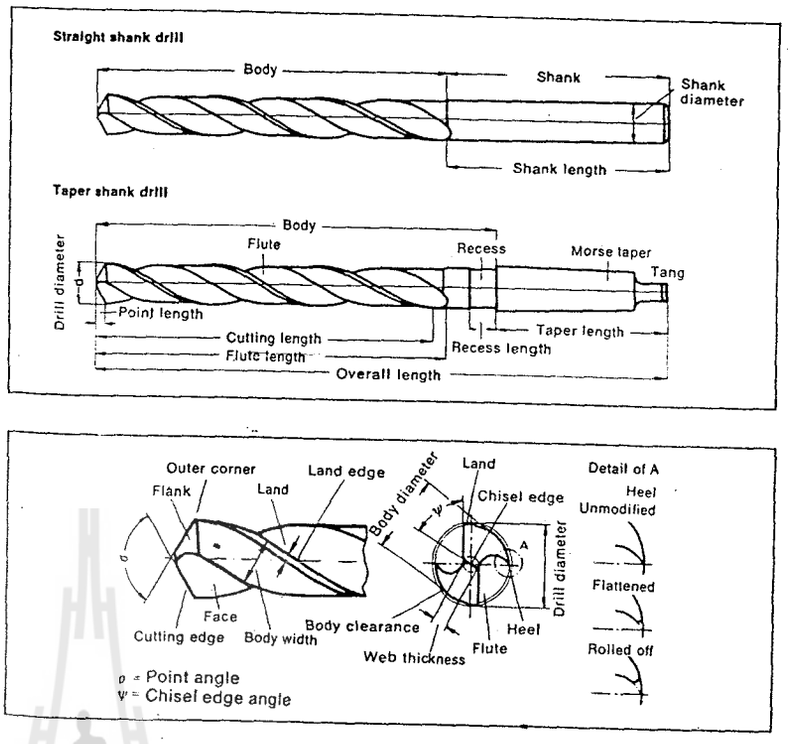
โดยทั่วไปขนาดของ point angle ของดอกสว่านมาตรฐานมีขนาด 118° แต่เนื่องจากวัสดุแต่ละอย่างมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นจึงควรใช้ค่า point angle ให้เหมาะสม ในรูป 4.59 แสดงตารางแนะนำ ขนาดของ point angle ของดอกสว่านสำหรับเจาะวัสดุต่างๆ



รูป 4.59: Twist drill point and helix angles

ดอกสว่านสำหรับเจาะโลหะทั่วไป มักทำด้วยเหล็กกล้า HSS แต่ดอกสว่านอาจทำจากวัสดุเครื่องมือ (tool materials)ชนิดอื่น เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนสูง หรือ cemented carbide เป็นต้น

ในรูป 4.60 แสดงลักษณะของดอกสว่านด้ามตรง(straight shank drill) และดอกสว่านด้ามเรียว(taper shank drill) ซึ่งแบบด้ามตรงมักเป็นดอกสว่านขนาดเล็กและใช้กับ หัวจับดอกสว่าน (drill chuck – รูป 4.61)



รูป 4.60: Straight and taper shank drills

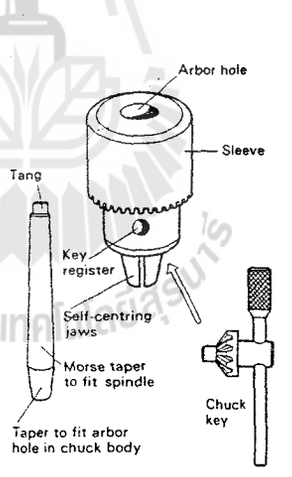
3.4 เครื่องเจาะด้วยดอกสว่านร่องบิด (drill machine):

ในรูป 4.62 แสดงเครื่องเจาะรูด้วยดอกสว่าน ซึ่งเป็นเครื่องขนาดเล็ก เรียกว่า "sensitive drilling machine" ขับเคลื่อนเพลาเจาะด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า และสายพานส่งกำลัง

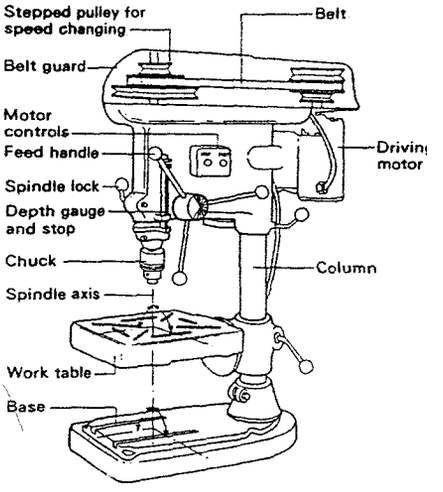
นอกจากเจาะรูแล้วเครื่องเจาะยังสามารถทำงานอื่นๆได้อีก เช่น (4.63) ทำ countersink, ทำ counterbore, และ spot facing เป็นต้น

- **ความเร็วตัดสำหรับการเจาะรู (cutting speeds):** ความเร็วตัดหรือ cutting speed หมายถึง **"ระยะทางเป็น(เมตร)ที่มีดตัด ตัดเนื้อโลหะในหนึ่งนาที"** ในเรื่องของการเจาะรู, cutting speed คือระยะทางเชิงเส้นที่คมตัดที่ผิวดอกสว่าน ตัดเนื้อโลหะ เพราะฉะนั้น ถ้า C คือ cutting speed; d คือขนาดของดอกสว่าน(mm); และ N คือความเร็วรอบในการหมุนของดอกสว่าน (rpm, or rev/min), เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง cutting speed และ ความเร็วรอบของดอกสว่านดังนี้:- $C = \pi dN/1000$ (เป็น m/min)

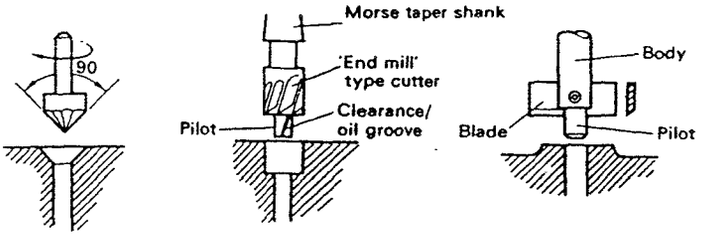
ขนาดของ cutting speed สำหรับทำงานอย่างใดอย่างหนึ่ง ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น วัสดุชิ้นงาน – ชิ้นงานอ่อนสามารถใช้ cutting speed ได้สูง; วัสดุที่เป็นมีดตัด – บางชนิดสึกหรอเร็วถ้าใช้ cutting speed สูง; อายุการใช้งานของมีดตัด; มีการหล่อเย็นในขณะตัดหรือไม่ และอื่นๆ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการเลือกใช้ cutting speed จึงมีตารางแนะนำการกำหนด cutting speed สำหรับทำงานแต่ละอย่าง ดังเช่น



รูป 4.61: Drill chuck and accessories



รูป 4.62: Drilling machine



(iii) Countersinking (iv) Counterboring (v) Spot facing

รูป 4.63: Operations on drilling machine

ตารางในรูป 4.64

Recommended Cutting Speeds

Material to be cut	Approx tensile strength (N/mm^2)	Cutting speed for general purposes (m/min)					
		High-speed steel cutting tools (18% tungsten)				Stellite 0-40	Tungsten carbide and similar tools
				Form			
		Turn, face and bore	Ream and screw	Rough	Finish	Turn, face and bore	Turn, face and bore
*Free-cutting bright mild steel	310–385	37–60	6·0–9·0	37	7·3	73–90	90–180
*Black reeled mild steel bar	340–385	28–30	4·5–6·0	28	4·5	55–60	75–150
*0·20 Carbon steel bar	385–460	24–30	4·5–6·0	12	2·5	50–60	60–140
*0·30 Carbon steel bar	430–540	24–30	4·5–6·0	4·5	1·8	50–60	60–140
†0·40 Carbon steel bar	460–620	23–28	3·5–4·5	4·5	1·8	50–55	60–140
†0·50 Carbon steel bar	700–770	21–24	3·5–4·5	3·5	1·8	43–50	60–110
†3% Nickel steel bar	620–650	18–24	3·5–4·5	3·5	1·8	37–50	60–110
†Nickel-chrome case-hardening steel	700–770	18–24	3·5–4·5	3·5	1·8	37–50	60–110
*Mild-steel stampings	385–460	28–37	4·5–7·5	18	4·5	55–60	90–180
†High-tensile steel stampings	770–925	12–15	2·5–3·0	3·5	1·8	18–24	60–110
‡Cast-iron castings, Brinell 150	—	18–24	3·5–4·5	15	3·0	28–37	60–75
‡Cast-iron castings, Brinell 200	—	15—18	3·0–3·5	12	2·5	24–28	50–55
‡Cast-iron castings, Brinell 230	—	9–15	1·8–3·0	2·5	2·0	15–23	30–35
‡Malleable-iron castings	—	15–21	3·0–4·5	4·3	2·0	30–43	50–55
‡Malleable-iron castings (well annealed)	—	24–34	4·5–6·0	18	3·5	50–70	60–90
*Mild-steel castings	385–460	15–25	3·0–4·5	12	4·5	23–37	50–110
*Brass bar	—	75–125	30–37	37	18	75—180	150–300
‡Gun-metal castings	—	14–21	3·0–4·5	18	18	18–30	90–150
‡Aluminium castings	—	75–125	15–24	75	15	75–180	185–300

* Indicate that soluble oil is the most suitable coolant.
† Indicates that a straight cutting oil is the most suitable coolant.
‡ Indicates that a coolant is generally unnecessary.

Metric conversion of data supplied by H. W. Ward Ltd

รูป 4.64: Recommended cutting speeds

ตารางในรูป 4.64 ไม่ได้แสดงค่า cutting speed สำหรับงานเจาะรูไว้ แต่เราสามารถใช้ค่าในช่องของ การกลึงปอก, กลึงปาดหน้า และกลึงคว้านรู (turn, face, bore)

การเลือกความเร็วรอบของสว่านให้เหมาะสม (ซึ่งก็คือความเร็วรอบของเพลาของเครื่องเจาะ) ทำได้ดังนี้ (1) เลือก cutting speed; (2) คำนวณความเร็วรอบด้วยสูตร : $C = \pi dN/1000$.ตัวอย่างเช่น ดอกสว่านขนาด ϕ 20 mm, เป็น HSS; ใช้เจาะเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ; จากตารางได้ C= 30 m/min (สำหรับ 0.2%C steel); จะได้ความเร็วรอบของเพลาเจาะ , $N = (30 \times 1000)/(\pi \times 20) = 477.46$ rpm ; ซึ่งเราจะต้องพยายามปรับความเร็วรอบของเครื่องเจาะให้ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้นี้ให้มากที่สุดเท่าที่เครื่องจะทำได้

❑ **การป้อนหรืออัตราการป้อน** (feed rate): หมายถึงระยะทางในแนวแกนของดอกสว่านที่คมตัดเคลื่อนที่ ต่อ 1 รอบของการหมุนของดอกสว่าน (มีหน่วยเป็น mm/rev)

การกำหนดอัตราป้อนสำหรับงานเจาะมีหลักกว้างๆอยู่ว่า "ดอกสว่านขนาดเล็ก (ต่ำกว่า 20 mm) ขนาดของดอกสว่านจะเป็นตัวกำหนดอัตราป้อน; ดอกสว่านขนาดใหญ่, กำลังของมอเตอร์จะเป็นตัวกำหนดอัตราป้อน"

การใช้อัตราป้อนสูงเกินไปสำหรับดอกสว่านขนาดเล็กจะทำให้ดอกสว่านหักได้ เพราะฉะนั้นเมื่อใช้ดอกสว่านขนาดเล็กจะต้องระมัดระวังในการเลือกใช้อัตราป้อน แต่ถ้าเป็นดอกสว่านขนาดใหญ่ ดอกสว่านสามารถทนแรงบิดได้สูง เพราะฉะนั้น ถ้าใช้อัตราป้อนสูงเกินไป สว่านจะไม่หักแต่จะหยุดหมุนเพราะสายพานลื่น เนื่องจากเกินกำลังของมอเตอร์

นอกจากนี้ เราอาจใช้ตารางต่อไปนี้เป็นแนวทางในการกำหนดขนาดอัตราป้อนด้วยก็ได้

ϕ ของดอกสว่าน(mm)	3	6	8	10	11	13	16	19	22 ถึง 26	32
อัตราป้อน(1/100 mm/rev)	7	12	15	18	20	23	25	28	30	37

❑ **ปัญหาและข้อแนะนำในการใช้ดอกสว่าน:** ปัญหาส่วนใหญ่ที่เกิดจากการใช้ดอกสว่านคือ คมตัดบิ่น, คมตัดสึกหรอเร็วเกินไป, ดอกสว่านหัก และขนาดของรูเจาะใหญ่เกินไป เป็นต้น ปัญหาเหล่านี้มักเกิดจากการใช้เงื่อนไขของการตัดโลหะไม่เหมาะสม เช่น ใช้ความเร็วรอบสูงมากเกินไป, ใช้อัตราป้อนมากเกินไป และ มุมและความยาวของคมตัดจากการลับไม่ถูกต้อง (รูป 4.65)

ข้อแนะนำอื่นๆของการใช้ดอกสว่านมีดังนี้:-

(1) โลหะอ่อนใช้ fast helix, โลหะแข็งใช้ slow helix

(2) เจาะรูเหล็กกล้า และmalleable iron ใช้สารละลายหล่อเย็น(soluble oil) และ ถ้าเหล็กกล้ามีความแข็งมาก ใช้น้ำมันก๊าดหรือน้ำมันสน

(3) ถ้ามุมคมตัดสึกอย่างรวดเร็ว, ลดความเร็วรอบ

(4) คมตัดบิ่น, ลดอัตราป้อน

(5) สว่านไม่กินงานตั้งแต่เริ่มเจาะ, มุมหลบไม่พอ

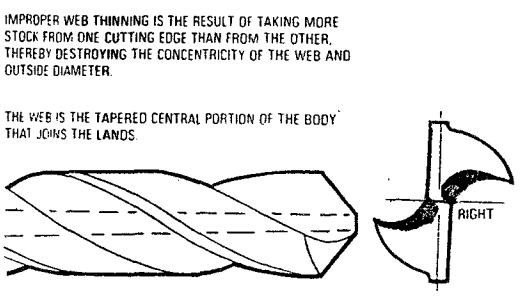
(6) รูเจาะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดดอกสว่าน, ความยาวของคมตัดหรือมุมคมตัดไม่เท่ากัน (รูป 4.66)

(7) เศษโลหะไหลออกจากร่องบิดเพียงร่องเดียว, ลับคมตัดไม่เท่ากัน

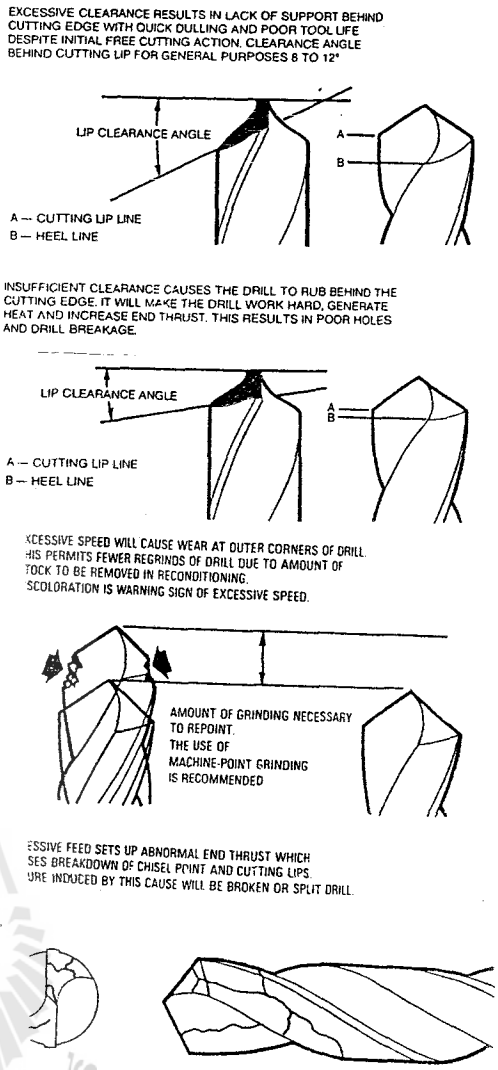
(8) ดอกสว่านหัก, อาจเกิดจาก อัตราป้อนสูงเกินไป, ไม่ผ่อนน้ำหนักกดเมื่อดอกสว่านจะทะลุงาน, ดอกสว่านติดในรู เนื่องจากรูลึกเกินไป

(9) ถ้าเจาะรูลึกๆ, ควรช่วยคายเศษโลหะโดยการดึงสว่านออกจากรู เป็นครั้งคราวระหว่างเจาะ

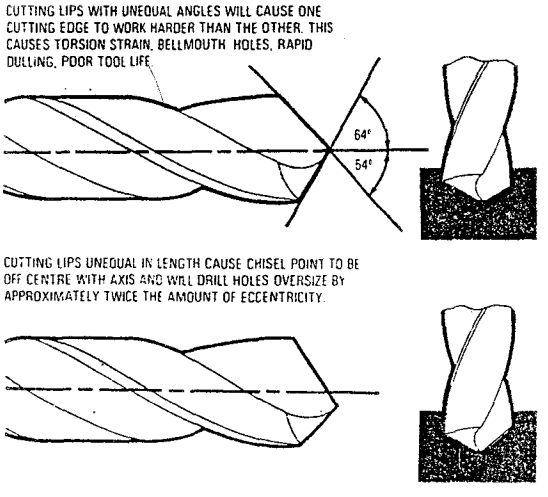
(10) ถ้า web ของดอกสว่านหนาขึ้น, ควรทำ web thinning เพื่อให้ลิ่มที่ปลายดอกสว่านบางลง ทำให้แรงกดลดลง และลดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งรูเจาะ (รูป 4.67)



รูป 4.67: web thinning



รูป 4.65: ปัญหาที่เกิดจากการใช้ดอกสว่าน



รูป 4.66: **ความยาวและมุมคมตัดไม่เท่ากัน**

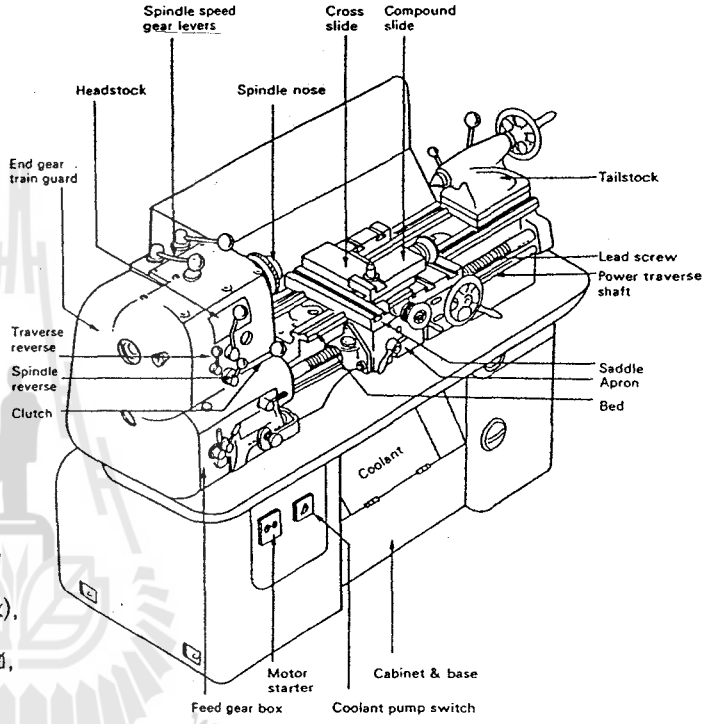
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูป 4.68: Early tree lathe

3.5 **เครื่องกลึง** (lathe): เครื่องกลึงเป็นบิดาของเครื่องมือกลทุกชนิด เครื่องกลึงดั้งเดิม น่าจะเกิดจากการกลึงไม้(รูป 4.68) โดยอาศัยเชือกดึงให้ท่อนไม้หมุน ซึ่งต่อมาได้มีการนำแผ่นไม้ที่เรียกว่า **ลาธ** (lath) มารองเส้นเชือกที่ชักหมุน ดังนั้นเมื่อเกิดเป็นเครื่องกลึงในภายหลัง จึงเรียกเครื่องมือกลชนิดนี้ว่า lathe

เครื่องกลึง(lathe) คือเครื่องมือกลที่ทำให้เกิดผิวของทรงกระบอกและผิวราบ บนชิ้นงาน โดยการหมุนของชิ้นงานและการเคลื่อนที่ตัดของมีดตัด อย่างมีความสัมพันธ์กัน

ในปัจจุบัน มีเครื่องกลึงหลายชนิด หลายขนาด และสามารถทำงานได้หลายอย่าง ในรูป 4.69 แสดงลักษณะของเครื่องกลึง ที่พบอยู่เสมอใน workshop ทั่วๆไป ซึ่งมีส่วนต่างๆที่สำคัญดังนี้:-

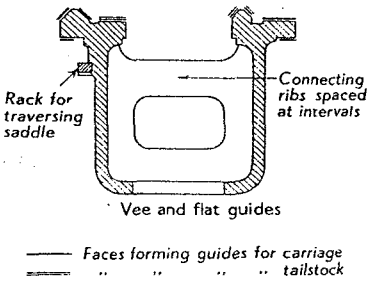


รูป 4.69: **ส่วนต่าง ๆของเครื่องกลึง**

(1) Spindle: หรือเพลาหัวเครื่อง เป็นเพลากลวง เราเรียกปลายเพลาด้านหนึ่งว่า spindle nose เพลาส่วนนี้มีอุปกรณ์ยึดชิ้นงานติดอยู่ และมีรูเพลาเป็นรูเรียว (taper) สำหรับยึด ศูนย์ (center)ในขณะที่จับชิ้นงานแบบยันศูนย์สองข้าง

(2) Headstock: หรือหัวเครื่อง คือส่วนของเครื่องกลึงที่อยู่ด้านซ้ายมือของผู้ปฏิบัติงาน เป็นส่วนที่ติดตั้งเพลาหัวเครื่อง, ห้องเกียร์ควบคุมความเร็วรอบ(speed gear box), ห้องเกียร์สำหรับอัตราป้อน(feed gear box), คันโยกครัช, ปุ่มปิด-เปิดเครื่อง

(3) Bed: หรือแท่นเครื่อง เป็นโครงสร้างหลักของเครื่องกลึง มีลักษณะเป็นกล่อง มีความแข็งแรง บิดงอได้ยาก บนผิวแท่นเครื่องเป็นสันสามเหลี่ยม(guides) เป็นทางวิ่งของ carriage และมีทางวิ่งราบสำหรับ Tailstock หรือ ท้ายเครื่อง.



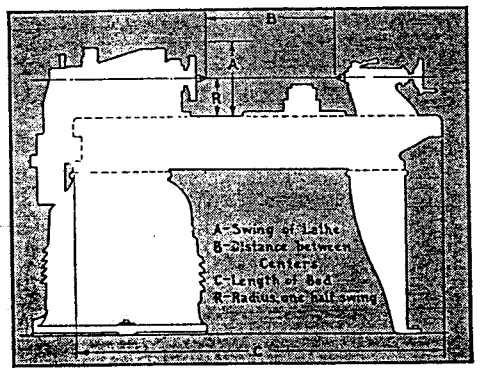
รูป 4.70: Lathe bed

(4) Saddle: ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ carriage และ apron: carriage อยู่บนแท่นเครื่องมีรางวิ่งอยู่บนทางวิ่ง การเคลื่อนที่ของ carriage จะทำให้ saddle เคลื่อนที่ไปด้วย มือหมุนสำหรับควบคุม saddle อยู่ทางด้านหน้าของ apron ในขณะกลึง เราสามารถใช้การเคลื่อนที่ของ saddle แบบอัตโนมัติได้: อาศัยการหมุนพาของ feed rod หรือ power traverse shaft ที่อยู่ตอนล่างของ saddle แต่ในขณะกลึงเกลียว saddle จะเคลื่อนที่ด้วยเกลียวนำ หรือ lead screw

บน carriage มีสไลด์ป้อนขวาง หรือ cross slide สำหรับป้อนมีดตัดในแนวที่ตั้งฉากกับแกนกลางของเพลาหัวเครื่อง; บนสไลด์ตัวนี้ มีสไลด์อีกตัวหนึ่งเรียกว่า compound slide ซึ่งสามารถหมุนตั้งมุมได้ อุปกรณ์สำหรับยึดมีดตัดจะอยู่บน compound slide นี้

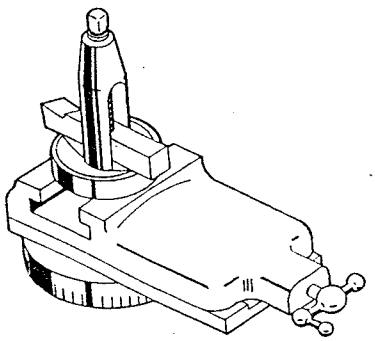
(5) Tailstock หรือ ท้ายเครื่อง เป็นส่วนที่อยู่บนทางวิ่งราบ (flat bed way) บนแท่นเครื่อง อยู่ตรงข้ามกับหัวเครื่อง ใช้สำหรับใส่ศูนย์(center)ยันปลายชิ้นงานในขณะจับชิ้นงานระหว่างศูนย์, หรือใช้จับดอกสว่าน, หัวจับดอกสว่าน(drill chuck) และดอกรีม เมื่อต้องการเจาะรู, หรือรีมรู บนเครื่องกลึง; tailstock มีเพลากลวงเป็นรูเรียว(taper) สามารถสวมเข้ากับด้ามเรียวของดอกสว่านและดอกรีม

3.6 **ขนาดของเครื่องกลึง:** ในรูป 4.71 แสดงมิติที่นิยมใช้บอกขนาดของเครื่องกลึง ในอเมริกาบอกขนาดโดยใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสูงสุด (swing over) ของชิ้นงานที่หมุนได้บนเครื่องกลึง (A) และขนาดความยาวของแท่นเครื่อง(bed length -- C) เช่น เครื่องกลึงขนาด 380 x 2438 mm แต่ผู้ผลิตเครื่องมือกลในยุโรป นิยมใช้ความยาวของรัศมีชิ้นงาน (R) และบางครั้งบอกความยาวของเครื่องเป็นระยะระหว่างศูนย์ (B)

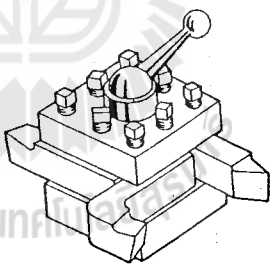


รูป 4.71: มิติสำหรับบอกขนาดเครื่องกลึง

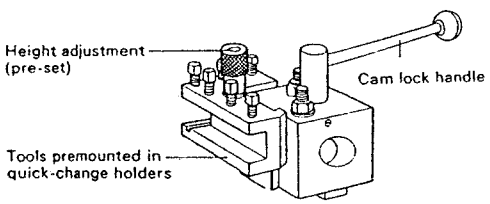
3.7 **การยึดมีดตัดและชิ้นงานบนเครื่องกลึง:** เครื่องกลึงยึดมีดกลึงด้วย tool post ซึ่งมีหลายแบบ ดังตัวอย่างในรูป 4.72 (a) เป็น tool post แบบธรรมดายึดมีดได้อันเดียว สามารถปรับระดับความสูงของปลายมีดตัดโดยการเลื่อนแผ่นรองที่มีผิวล่างเป็นส่วนโค้งซึ่งนั่งอยู่บนผิวเว้าของแหวนที่สวมอยู่ในเสาของ tool post; (b) เป็นป้อมมีดแบบจับมีดตัดได้ 4 อัน เราสามารถหมุนป้อมมีดเลือกใช้มีดได้ตามต้องการ; (c) เป็นแบบปลดมีดได้เร็ว (quick-release type) ซึ่งมีดตัดจะถูกยึดอยู่ในอุปกรณ์ที่สามารถประกอบหรือ ถอดออกจาก tool post ได้อย่างรวดเร็ว tool post ชนิดนี้มีราคาแพงกว่าสองแบบแรก



(a) Tool post and compound slide



(b) Four-way tool post

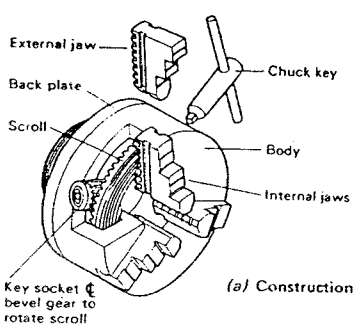


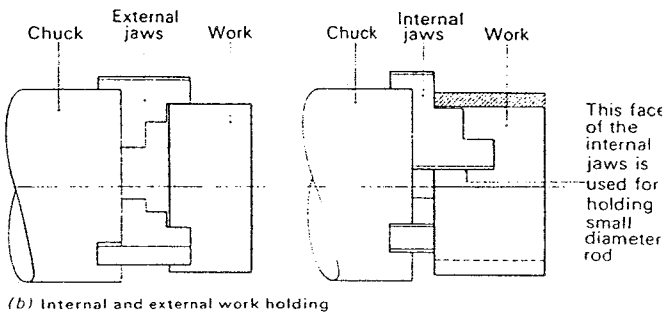
(c) Quick-release tool post

รูป 4.72: Tool posts

การยึดชิ้นงานบนเครื่องกลึง ทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับรูปทรงของชิ้นงาน วิธีที่ใช้กันอยู่เสมอได้แก่

- **ใช้หัวจับแบบสามจับฟันพร้อม**(3-jaw chuck): หัวจับชิ้นงานแบบนี้ใช้กับชิ้นงานหน้าตัดกลมเป็นส่วนใหญ่ เป็นหัวจับที่สามารถจับงานให้งานตรงศูนย์ได้เอง (self-centering chuck) ทั้งนี้เพราะฟันที่จับยึดชิ้นงานจะเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงานและออกแรงกดพร้อมๆกัน (รูป 4.73)



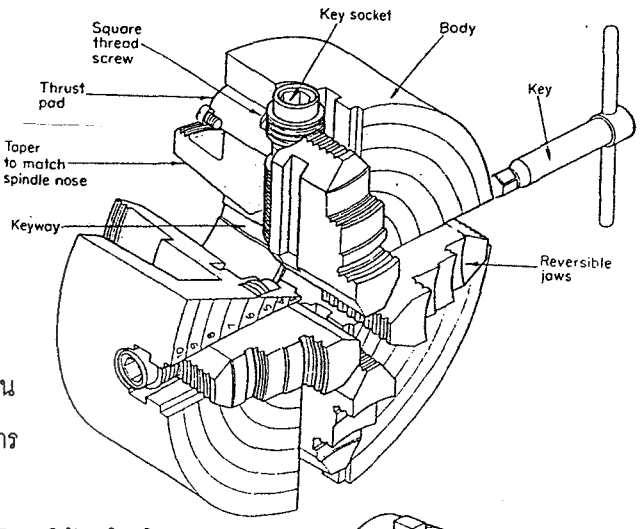


รูป 4.73: Three-jaw chuck

ชุดฟันของหัวจับ 3 จับ มี 2 แบบคือ ฟันจับนอก(external jaws) และ ฟันจับใน(internal jaws) ซึ่งหมายถึงฟันหัวจับที่ใช้จับเส้นผ่าศูนย์กลางนอก และเส้นผ่าศูนย์ในของชิ้นงานตามลำดับ เราไม่สามารถที่จะใช้ฟันจับนอกเป็นฟันจับในได้ (รูป 4.73 b) การประกอบฟันเข้ากับหัวจับจะต้องใส่ตามลำดับหมายเลขฟันและหมายเลขที่หัวจับ

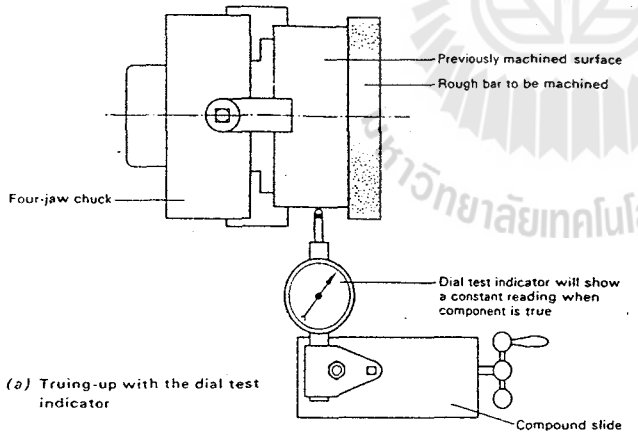
ความเที่ยงตรงของหัวจับจะลดลงตามความสึกหรอของร่องสไปราล(spiral) ที่ใช้ขับเคลื่อนฟัน และขึ้นอยู่กับความชำรุดของตัวฟัน ดังนั้นเพื่อรักษาหัวจับให้สามารถคงความเที่ยงตรงไว้ได้นานๆ เวลาใช้งานจะต้อง (1) ไม่ใช้ค้อนเคาะชิ้นงานให้ได้ศูนย์; (2) ไม่ใช้จับงานที่มีผิวไม่สม่ำเสมอ; และ (3) ไม่ใช้ปลายฟันจับชิ้นงาน

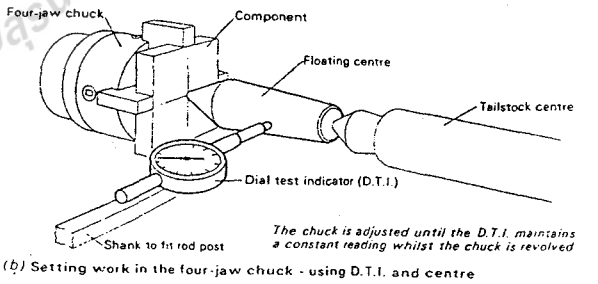
- **ใช้หัวจับแบบสี่จับ** (4-jaw chuck): เป็นหัวจับที่มีฟันจับชิ้นงาน 4 ฟัน (รูป 4.74) แต่ละฟันเคลื่อนที่เป็นอิสระต่อกัน(4-jaw independent chuck) โดยการควบคุมของสกรูแต่ละตัว หัวจับแบบนี้มีขนาดของโครงสร้างใหญ่กว่าแบบ 3 จับ ดังนั้นจึงสามารถจับงานได้แน่นและมั่นคงกว่า นอกจากนั้นฟันของ 4 จับยังสามารถกลับข้างใช้ได้ด้วย ส่วนใหญ่ใช้สำหรับ: (1) จับยึดงานที่มีผิวมากกว่าหรือเท่ากับ 4 ด้าน; (2) งานที่มีรูปร่างหน้าตัดไม่สม่ำเสมอ; (3) งานที่ต้องการให้ตรงศูนย์เครื่อง(concentricity); และ (4) งานที่ต้องการให้เกิดการเยื้องศูนย์(eccentricity)

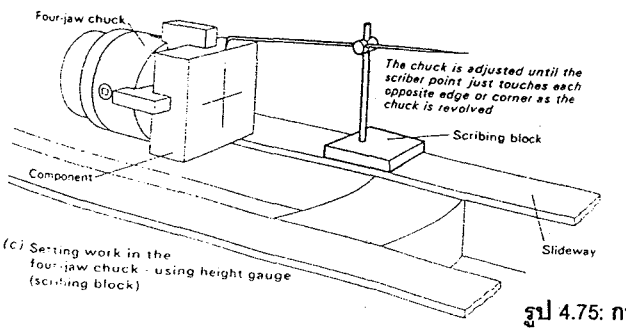


รูป 4.74: 4-jaw chuck

ในการใช้หัวจับแบบ 4 จับ จำเป็นจะต้องตั้งศูนย์กลางของชิ้นงานให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ เช่น ให้อยู่ตรงกับศูนย์กลางของเพลาหัวเครื่อง หรือให้มีระยะเยื้องตามที่กำหนด เป็นต้น เรามีวิธีการตั้งศูนย์อยู่หลายวิธี ในรูป 4.75 แสดงวิธีตั้งศูนย์ 3 วิธี

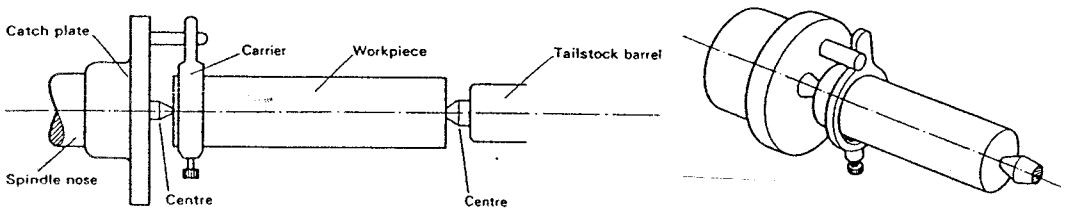






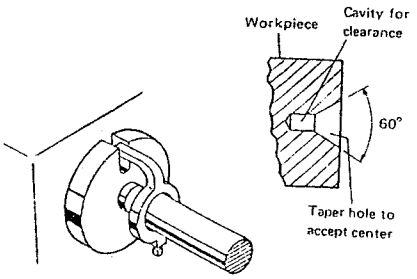
รูป 4.75: การตั้งหัวจับ 4 จับ

❑ **การจับงานระหว่างศูนย์(Between centers):** หรือการจับงานแบบยันศูนย์ (รูป 4.76) ใช้จานพา(face plate)ยึดติดกับ spindle nose ของเพลาหัวเครื่อง(แทนหัวจับ) และขายึดชิ้นงาน (carrier or dog) ซึ่งลักษณะของขายึดชิ้นงานและจานพา มีสองแบบคือ แบบขาตรง(รูป 4.76) และแบบขางอ (รูป4.77) การจับชิ้นงานด้วยวิธีนี้ จะต้องมีการเจาะรูเรียว(taper hole)ที่ปลายทั้งสองของชิ้นงานเพื่อรองรับศูนย์ (centers) ที่หัวเครื่องและท้ายเครื่อง

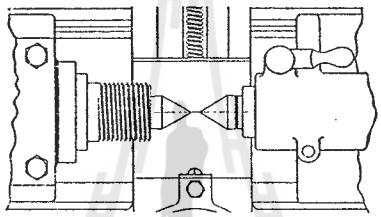


รูป 4.76: Work-holding between centers

สิ่งสำคัญในการกลึงปอกด้วยการจับงานแบบนี้ก็คือ ศูนย์หัวและศูนย์ท้ายจะต้องตรงกัน ถ้าเยื้องกันแล้ว ชิ้นงานที่ได้จะเป็นทรงกระบอกเรียว (tapered cylinder) วิธีการตรวจสอบคือ ใส่ศูนย์ตาย(dead center) ที่เพลาหัวเครื่องและท้ายเครื่องแล้วเลื่อนศูนย์ท้ายเข้าหาศูนย์หัวเครื่อง ถ้าปลายแหลมของศูนย์ทั้งสองไม่ตรงกัน ให้ปรับศูนย์ที่ท้ายเครื่อง(รูป4.78)

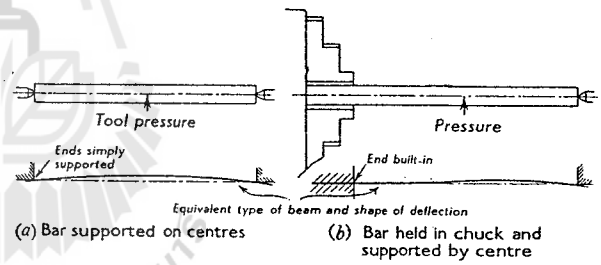


รูป 4.77: Face plate and lathe dog



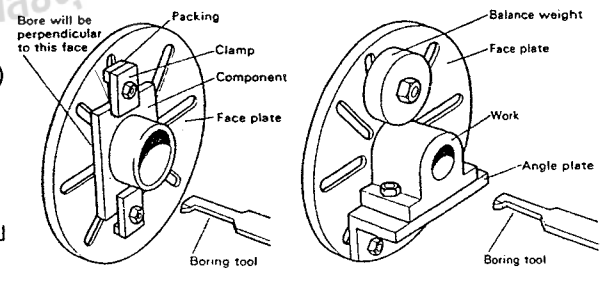
รูป 4.78: Alignment checking

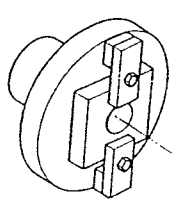
❑ **การใช้หัวจับและศูนย์ท้ายจับชิ้นงาน:** ในการจับชิ้นงานระหว่างศูนย์ ศูนย์ทั้งสองเป็นเพียงส่วนที่รองรับชิ้นงานเท่านั้น ไม่ได้ทำให้เกิดความมั่นคงในชิ้นงาน ดังนั้นเมื่อได้รับแรงจากการตัดโลหะ ชิ้นงานที่เป็นเพลายาวๆอาจโก่งได้ ดังนั้นเพื่อลดปัญหานี้ เราอาจใช้วิธีจับชิ้นงานด้านหนึ่งด้วยหัวจับ และยันศูนย์ที่ปลายอีกด้านหนึ่ง (รูป 4.79)



รูป 4.79: Deflection of work supported in the lathe

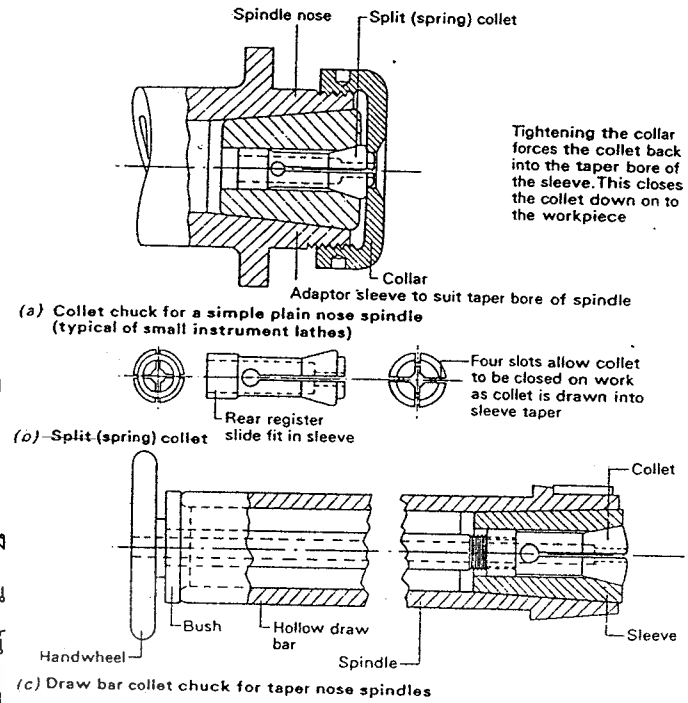
❑ **การใช้จานพา** (face plate): นอกจากจานพา(face plate) จะถูกใช้กับการจับงานยันศูนย์แล้ว ยังมีจานพาอีกแบบหนึ่งซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นวงกลม มีเกลียวยึดติดกับ spindle nose ของเพลาหัวเครื่อง และมีร่อง(slots)สำหรับยึดชิ้นงาน (หรือใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ยึดชิ้นงาน -- fixture) ในรูป 4.80 (a) แสดงการจับชิ้นงานด้วยจานพาสำหรับงานคว้านรู (boring); ใน รูป (b) ชิ้นงานถูกยึดติดกับเหล็กฉากซึ่งถูกยึดติดกับจานพา ในรูปนี้มีการใช้น้ำหนักถ่วงเพื่อให้เกิดความสมดุลของน้ำหนักในการหมุน เป็นการลดความสั่นสะเทือนของเครื่องซึ่งอาจเป็นผลให้แบริ่งที่หัวเพลาเสียหายหรือทำให้ผิวจากการกลึงไม่ดี (poor surface finish)





รูป 4.80: The face plate

❑ การใช้หัวจับจำปา (collet chuck): ในรูป 4.81 แสดงหัวจับจำปา หรือ หัวจับคอลเล็ต ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนคือ (1) ปลอก(sleave)สำหรับสวมเข้ากับรูเรียวของหัวเพลา (spindle nose), (2) ตัวจำปา หรือ ตัวคอลเล็ต (รูป b) ซึ่งมีลักษณะเป็นปลอก มีผิวนอกเรียวจากปลายเปิดด้านหนึ่งเป็นระยะทางสั้นๆ และ (3) คอลลาร์(collar) เป็นผาเกลียวในเพื่อขันดันคอลเล็ต ให้หุบจับชิ้นงานที่สอดอยู่ภายใน(รูป a) ในหัวจับบางแบบ อาจใช้แท่งเกลียว(draw bar) สำหรับขันดึงคอลเล็ต(รูป c)



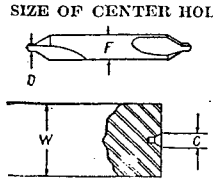
รูป 4.81: Collet chuck

3.8 **งานกลึง** (lathe operations): ผิวงานที่เกิดจากการกลึงบนเครื่องกลึงมีมากมายหลายแบบ โดยอาศัยการหมุนของชิ้นงานหรือมีดตัด, การป้อนตัดกินเนื้อโลหะ, และ การใช้อุปกรณ์อื่นๆช่วย เราสามารถทำได้ตั้งแต่กลึงเพลากลม, จนกระทั่งถึงตัดเฟืองฟันตรงบนเครื่องกลึง แต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะงานกลึงพื้นฐานที่พบกันอยู่เสมอเท่านั้น ซึ่งได้แก่ (รูป 4.82) การกลึงปอก(cylindrical turning), การกลึงเรียว (taper turning), การกลึงเกลียว(thread cutting) และ การกลึงปาดหน้า (facing or surfacing)

❑ **การเจาะรูยันศูนย์**: วิธีเจาะรูยันศูนย์บนเครื่องกลึงที่นิยมกันมากที่สุดคือ การใช้ ดอกสว่านนำศูนย์ (combination center drill and countersink) หรือเรียกกันสั้นๆว่า center drill (รูป 4.83) ตามปกติใช้ดอกที่มีมุมเรียว 60° (แต่ถ้าเป็นชิ้นงานใหญ่อาจใช้มุม 75° หรือ 90°)

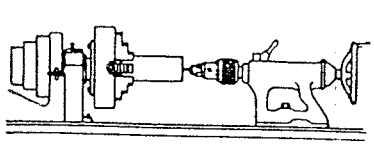
วิธีเจาะ (รูป 4.84)จับดอกสว่านด้วย drill chuck ซึ่งถูกยึดอยู่ในเพลาของ tailstock แล้วเจาะให้ลึกจนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ขอบนอกประมาณ(ระยะ C ในรูป 4.83) ให้มีลักษณะของรูเจาะยันศูนย์ที่ถูกต้อง (รูป4.85)

SIZE OF CENTER HOLE FOR $\frac{1}{8}$ IN. TO 4 IN. DIAMETER SHAFTS

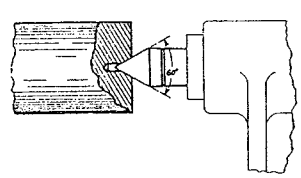


Diameter of Work W	Large Diameter of Countersunk Hole C	Diameter of Drill D	Diameter of Body F
$\frac{1}{8}$ in. to $\frac{3}{8}$ in.	$\frac{1}{8}$ in.	$\frac{5}{64}$ in.	$\frac{1}{8}$ in.
$\frac{3}{8}$ in. to 1 in.	$\frac{3}{16}$ in.	$\frac{7}{64}$ in.	$\frac{1}{4}$ in.
1 $\frac{1}{4}$ in. to 2 in.	$\frac{1}{4}$ in.	$\frac{1}{8}$ in.	$\frac{5}{16}$ in.
2 $\frac{1}{4}$ in. to 4 in.	$\frac{5}{16}$ in.	$\frac{5}{32}$ in.	$\frac{3}{8}$ in.

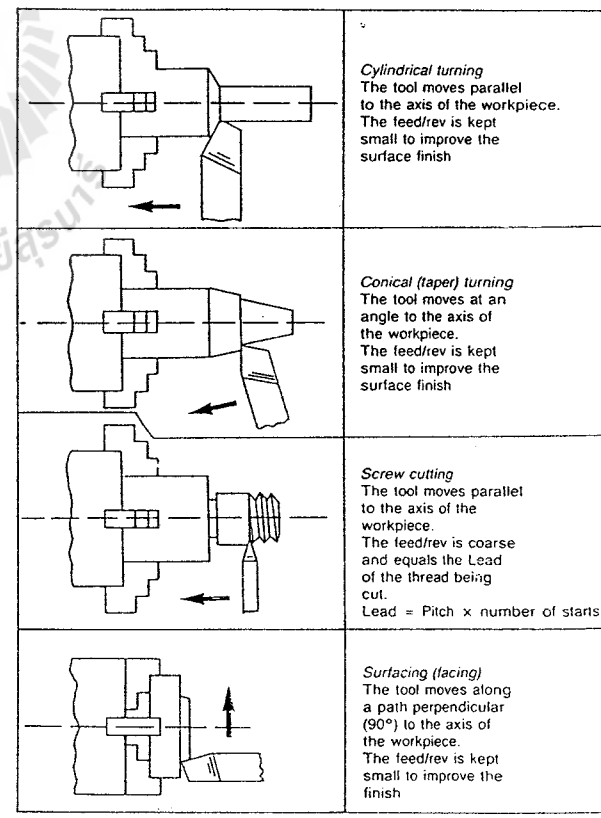
รูป 4.83: ตารางเลือกขนาด center drill และขนาดรูเจาะ



รูป 4.84: Center drilling

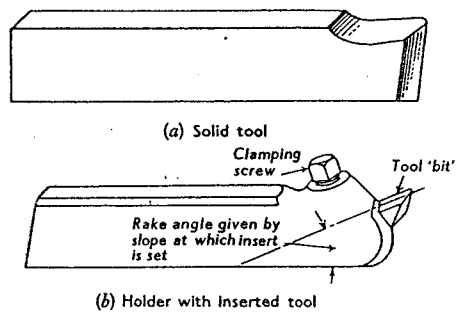


รูป 4.85: Correctly drilled center hole



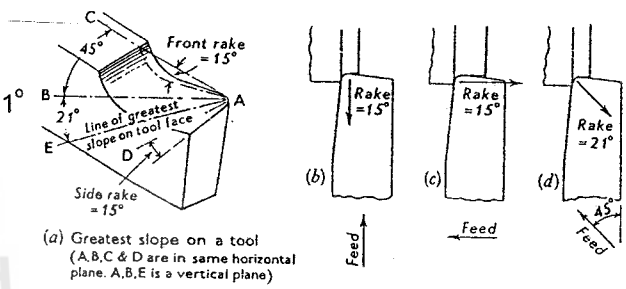
รูป 4.82: Basic operations on the lathe

3.9 **มุมมีดกลึง(lathe tool angles):** มีดกลึงเป็นมีดตัดคมเดี่ยว (single-point cutting tool) ซึ่งอาจเป็นแท่ง(solid tool)ใช้กับ 4-way tool box (รูป4.86a), หรือ สวมในด้ามมีดเพื่อยึดใน tool post อีกทีหนึ่ง(รูป b), หรือ เป็นคมตัดเล็กๆ (carbide tip) เชื่อมประสานหรือถูกยึดให้ติดบนด้ามมีด(รูป 4.57) มีดตัดเหล่านี้ต่างก็มีมุมมีดเหมือนกัน คือประกอบด้วยมุมทั้งหลายในรูป 4.54 และที่สำคัญคือ มุมคาย (rake angle) และ มุมหลบ (clearance angle)

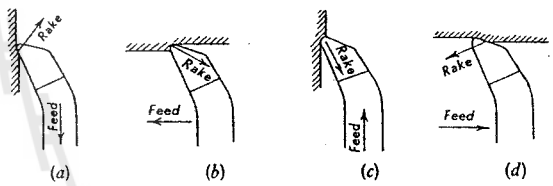


รูป 4.86: Lathe tools

❑ **มุมคาย**(rake angle): พิจารณารูป 4.87(a) มีดกลึงมีมุม front rake = 15°, และ side rake = 15° มุมทั้งสองทำให้แนว AE เป็นระนาบที่ผิวหน้ามีดเอียงมากที่สุดคือ = 21° ดังถ้าหากป้อนมีดกินชิ้นงานในทิศทางตามรูป (b) มุม side rake จะมีอิทธิพลต่อการตัดโลหะน้อยมาก และมุม front rake ก็คือมุม rake ที่แท้จริงของการตัดโลหะ แต่ถ้าป้อนมีดตัดตามรูป (c) มุม side rake จะกลายเป็นมุม rake ที่แท้จริง และถ้าป้อนตามรูป(d) มุม rake ทั้งสองต่างมีอิทธิพลต่อการตัดโลหะเท่าๆกัน มุม rake ที่แท้จริงอยู่ในแนว AE คือเท่ากับ 21°. จะเห็นได้ว่ามุม rake ที่แท้จริงในขณะตัดโลหะขึ้นอยู่กับทิศทางการวางแนวของคมตัดและทิศทางการป้อนมีดตัด ดังนั้นถ้าหากเราใช้มีดตัดอันเดียวทำงานหลายอย่าง มุม rake ที่เกิดจากการทำงานแต่ละอย่างอาจไม่เท่ากัน และไม่อยู่ในทิศทางเดียวกัน ดังตัวอย่างในรูป 4.88 ทิศทาง R คือแนวของระนาบที่ปรากฏมุม rake ที่แท้จริง

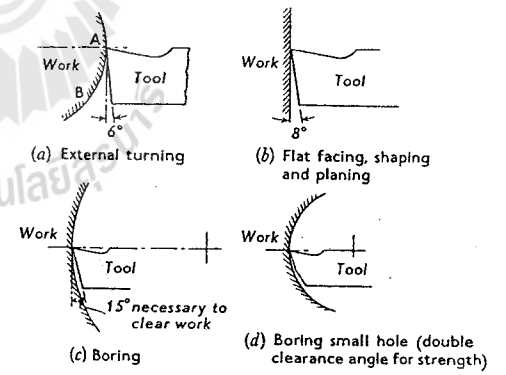


รูป 4.87: Effect of cut disposition on rake value

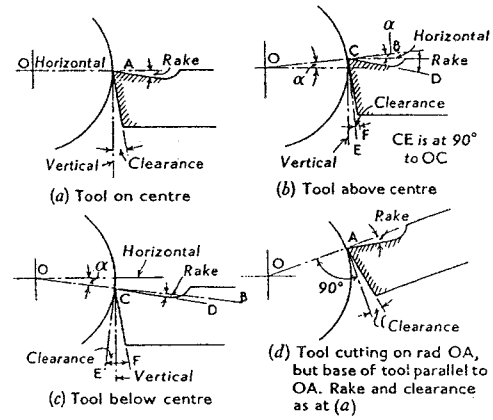


รูป 4.88: Direction of rake for different conditions

❑ **มุมหลบ**(clearance angle): มีดตัดโลหะทุกชนิดต้องมีมุมหลบ มิฉะนั้นมีดตัดจะไม่สามารถตัดเนื้อชิ้นงานได้ ขนาดของมุมหลบไม่ควรมากเกินไป เพราะจะทำให้มีดอ่อนแอ เนื่องจากมีเนื้อโลหะระบายความร้อนน้อย ทำให้เกิดความร้อนสะสมที่คมตัดมาก และมีดตัดสึกหรอได้ง่าย ขนาดของมุมหลบโดยทั่วไป ประมาณ 5°-10° การกำหนดขนาดของมุมหลบต้องคำนึงถึงสภาวะในการตัดโลหะด้วย ในรูป 4.89 b, c, และ d แสดง สภาวะของการตัดที่ต้องใช้มุมหลบมากกว่าปกติ ส่วนในรูป 4.90 แสดงการเปลี่ยนแปลงของมุมคายและมุมหลบอันเป็นผลจากการตั้งมีดตัด



รูป 4.89: Effect of cutting condition on clearance



รูป 4.90: Effect of tool setting on angles

ในตารางในรูป 4.91 แนะนำขนาดของมุมคายที่แท้จริง และขนาดมุมหลบ สำหรับการตัดโลหะแบบต่างๆ(รูป 4.92)

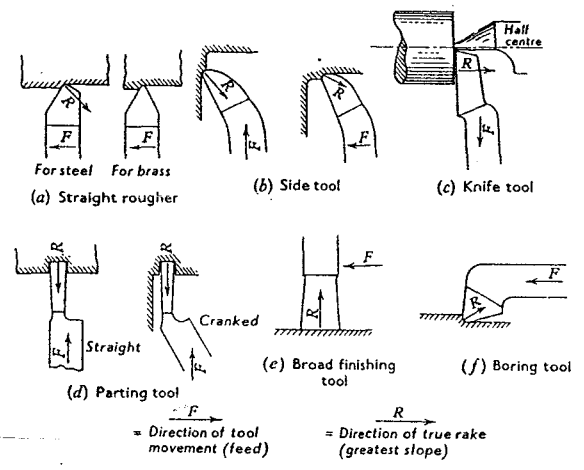
Angle given is that of the true rake on the tool (see รูป 4.92

Metal being Cut	Hard Brass, Bronze and Cast-iron	Hard Steel, Medium Cast Iron, Brass and Bronze	Medium Steel, Soft Cast Iron, Brass and Bronze	Mild and Soft Steel	Aluminium and light Alloys
Rake	0°	8°	14°	20° to 27°	40°

CLEARANCE

This should be no more than is necessary to allow the tool to cut efficiently and may be approximately as follows:
External turning, 6° to 10°.
Facing, shaping and planing, 8° to 17°.
Boring, sufficient to allow heel of tool to clear.

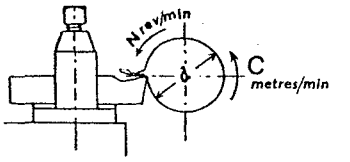
รูป 4.91: Rake angles for cutting various metals



รูป 4.92: Top profiles of tools

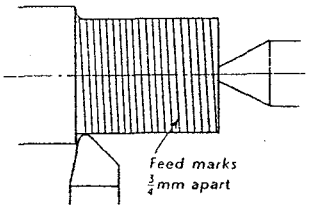
3.10 ความเร็วตัดสำหรับงานกลึง(cutting speeds):

❑ **ความเร็วตัด:** ความเร็วตัดของการกลึงปอกผิว (turning) มีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบของการหมุนของชิ้นงานดังนี้: (รูป 4.93) $C = (\pi dN)/1000$; โดยที่ C = ความเร็วตัด(cutting speed – m/min); d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงาน (mm); และ N = ความเร็วรอบของชิ้นงาน (rpm) จากความสัมพันธ์นี้เราสามารถคำนวณความเร็วรอบได้จาก $N = (1000.C)/(\pi d)$ ตัวอย่างเช่น ชิ้นงานมีขนาด ϕ 50 mm ใช้ความเร็วตัด = 25 m/min; จะได้ $N = (1000x25)/(\pi x50) = 159$ rev/min.



รูป 4.93

ความเร็วตัดขึ้นอยู่กับ (1) ชนิดของวัสดุชิ้นงาน โลหะแข็ง, ความเร็วตัดต่ำ โลหะอ่อน, ความเร็วตัดสูง; (2) สภาพของเครื่องมือกล: เครื่องเก่า, หลวม, ยึดงานได้ไม่ดี, ต้องใช้ความเร็วตัดต่ำ; (3) ชนิดของมีดตัด: HSS ใช้ความเร็วตัดได้สูงกว่า high carbon steel; (4) สภาวะของการตัด (cutting conditions – depth and feed) เช่น ใช้ความลึก หรือใช้อัตราป้อนสูง ต้องใช้ความเร็วตัดต่ำ



รูป 4.94: Turning with feed ¾ mm

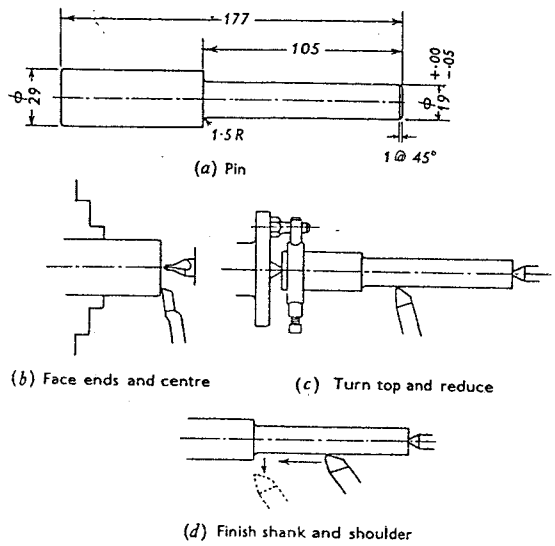
เราสามารถเลือกใช้ความเร็วตัดที่เหมาะสมได้จาก รูป 4.64 ถ้าหากเป็นการตัดขั้นสุดท้าย (finishing cut) เราสามารถใช้ความเร็วตัดได้สูงกว่าในตาราง และในทำนองตรงกันข้าม ถ้าเป็นการตัดหยาบ (roughing cut) ก็ต้องลดความเร็วตัดให้ต่ำกว่าค่าที่แนะนำในตาราง

❑ **อัตราป้อนในการกลึง(cutting feeds):** การป้อน(feed – mm/rev) ทำให้มีดตัด กินเนื้อโลหะเกิดเป็นผิวงาน ดังนั้นผิวงานก็คือรอยคมตัดที่เรียงซ้อนกันอย่างต่อเนื่อง ถ้าหากเราใช้อัตราการป้อนสูง รอยคมตัดปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน (รูป4.94) ผิวงานจะหยาบ แต่ถ้าใช้อัตราการป้อนต่ำ จะมองไม่เห็นรอยคมตัด ผิวจะเรียบ เพราะฉะนั้นในการกลึงหยาบ เรามักจะใช้อัตราป้อนสูง เพื่อให้ทำงานได้เร็ว แต่จะใช้อัตราการป้อนต่ำตอนกลึงขั้นสุดท้าย เมื่อต้องการผิวเรียบ

❑ **เวลาในการกลึงปอก:** ถ้าความยาวของส่วนที่ต้องการกลึงปอกเท่ากับ l (mm); ใช้อัตราป้อน f (feed –mm/rev); และใช้ความเร็วรอบ = N (rpm); เวลาที่ใช้ในการกลึง (t_m) = l/(f.N); ตัวอย่างเช่น l = 75 mm; N = 900 rpm; และ f = 0.07 mm/rev จะได้ $t_m = (75)/(0.7x900) = 1.19$ min.

❑ **ตัวอย่างแสดงการวางแผนงานกลึง:** ขั้นตอนของการกลึงหมุด (pin) ในรูป 4.95(a)จากแท่งเหล็กกล้าละมุน (mild steel) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 32 mm ยาว 185 mm, เป็นดังนี้:-

1. จับงานด้วยหัวจับแบบ 3 จับ (3-jaw chuck) กลึงปาดหน้าด้านหนึ่ง แล้วเจาะรูยันศูนย์ (center drilling); กลับข้างอีกด้านหนึ่งทำเช่นเดียวกัน คือปาดหน้า แล้วเจาะรูยันศูนย์ (รูป 4.95b)
2. ใช้ lathe dog (หรือ carrier) ยึดปลายข้างหนึ่งของชิ้นงาน แล้วจับงานระหว่างศูนย์ กลึงให้ได้ ϕ 30 mm เป็นระยะทางจากปลายจนถึงใกล้ๆ กับบริเวณที่ lathe dog จับงาน ขั้นตอนนี้เป็นการตัดหยาบ(roughing cut)
3. เปลี่ยนปลายจับ lathe dog กลึงปอกผิวที่เหลือ (จากข้อ 2) โดยกลึงหยาบให้ได้ ϕ 20 mm และลึกจากปลาย 104 mm, ปรับมีดกลึงแล้ว กลึงบ่าตั้งฉากกับผิวงาน (รูป 4.95c)
4. เจียรนัยแต่งมุมของมีดกลึงให้มีรัศมีประมาณ 1.5 mm ตั้งมีดให้อยู่ในลักษณะที่เมื่อกลึงปอกแล้วสามารถแต่งบ่าให้ฉากได้โดยไม่ต้องปรับมีดใหม่ แล้วกลึงปอกจนได้ ϕ 19.25 mm, ยาว 105 mm (จากปลาย) ในการเดินมีดตัดในช่วงนี้ ขณะที่มีดเข้าใกล้บ่าประมาณ 1-2 mm ให้หยุดการเดินอัตโนมัติ แล้วให้เดินด้วยมือแทน เมื่อปลายมีดสัมผัสบ่าให้ถอนมีดออกจากงานด้วย cross slide ในการเดินครั้งสุดท้าย(finishing cut) ให้ทดลองกลึงปลายเล็กน้อย (ยาวประมาณ 10mm) แล้ววัดขนาด จนได้ 19 mm แล้วจึงเดินอัตโนมัติ จนใกล้กับบ่าเดิม ให้หยุดแล้วเดินด้วยมือเพื่อทำบ่าขั้นสุดท้าย ในการเดินครั้งนี้จะได้ขนาดของชิ้นงานพอดีคือ ϕ 19 mm, ยาว105 mm (รูป 4.95d)
5. ตั้งมีดใหม่ ให้คมตัดทำมุมกับผิวงานประมาณ 45° แล้วกลึงลบมุม (chamfering) ที่บ่าและที่ปลาย
6. เปลี่ยนข้างจับ lathe dog, แต่ก่อนจับต้องพันชิ้นงานด้วยแผ่นทองแดงหรือทองเหลืองหรืออลูมิเนียมเพื่อป้องกันผิวงาน ไม่ให้เสียหายจากการยึดด้วย lathe dog แล้วกลึงให้ได้ ϕ 29 mm จากนั้น ลบมุมคมต่างๆให้เรียบร้อย

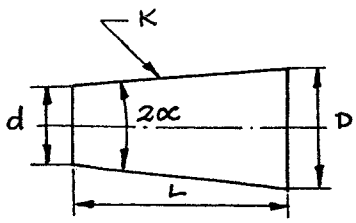


รูป 4.95: Turning a pin

3.10 **การกลึงเรียว**(taper turning on a lathe):

□ **ความเรียว** (taper) หมายถึงความเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไปตามความยาวของชิ้นงาน

ในระบบเมตริก บอกขนาดของความเรียวเป็นอัตราส่วนระหว่าง ความแตกต่างในขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm ต่อความยาว ระหว่างระนาบของเส้นผ่าศูนย์กลางทั้งสอง เช่น เพลามีความเรียวความเรียวขนาด 1:20 (หรือ 1:20 taper) หมายถึงเพลายาว 20 mm มีเส้นผ่าศูนย์กลางแตกต่างกัน 1 mm



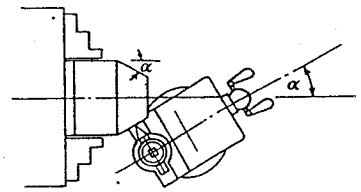
รูป 4.96: Taper

□ **การคำนวณ**: (ดูรูป 4.96) ถ้า d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็ก (mm), D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ (mm), L = ความยาวของส่วนที่เรียว; เราสามารถคำนวณค่าความเรียว(K)ได้จาก K = (D-d)/L;

ตัวอย่างเช่น ต้องการทราบ D ของเพลาเรียว 1:30 taper; มีความยาวของ taper = 60 mm, ถ้า d = 10 mm; เพราะฉะนั้น D = d + KL = 10 + (1/30)x 60 = 12 mm

จากรูป 4.96 เราสามารถคำนวณหามุมเรียว(angle of taper) ได้จาก tan α = (D-d)/ (2L) โดยที่ (2α) คือมุมเรียว

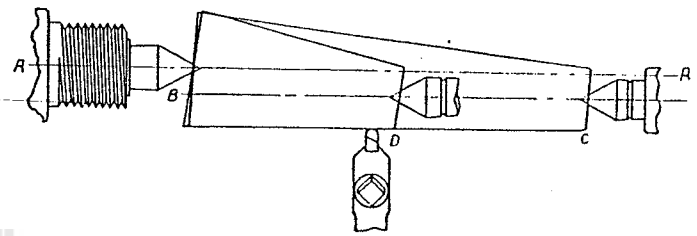
❑ **วิธีกลึงเรียว** (taper turning): มีวิธีกลึงเรียวบนเครื่องกลึงอยู่ 3 วิธีคือ (1) ใช้ compound slide; (2) วิธีเยื้องศูนย์ท้าย (tailstock set-over); (3) วิธีใช้อุปกรณ์กลึงเรียว (taper attachment) ในที่นี้จะกล่าวถึง 2 วิธีแรกเท่านั้น



รูป 4.97: Taper turning

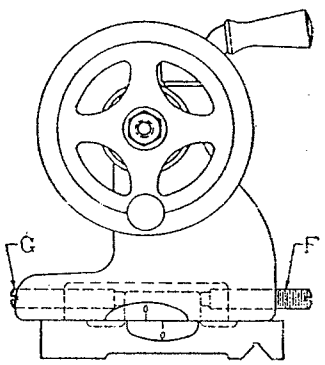
(1) **การกลึงเรียวโดยใช้** compound slide: ใช้วิธีตั้งมุม compound slide ให้เท่ากับ ครึ่งมุมเรียว(= α) แล้วป้อนให้มีดตัดกินชิ้นงานด้วย compound slide (**รูป** 4.97)

(2) **การกลึงเรียวด้วยวิธีเยื้องศูนย์ท้าย**: เป็นวิธีกลึงเรียวที่เหมาะกับความเรียวไม่ชันมากนัก ในการกลึงเรียวแบบนี้ ชิ้นงานถูกจับระหว่างศูนย์ (รูป 4.98) มีดกลึงจะเดินเป็นแนวขนานกับแกนกลางของแท่นเครื่อง ในขณะที่ชิ้นงานหมุนรอบแกนที่ไม่ขนานกับแนวทางเคลื่อนที่ของมีดกลึง ทั้งนี้เพราะศูนย์ท้ายถูกปรับให้เยื้องกับศูนย์หัวเครื่อง ชิ้นงานที่ได้จึงเป็นชิ้นงานเรียว



4.98: Tailstock set-over for taper turning

การปรับศูนย์ท้าย ปรับด้วยการขันสกรูที่ข้างศูนย์ท้าย (G และ F ในรูป 4.99) ซึ่งระยะเยื้องนี้อาจตรวจสอบด้วยวิธีใช้บรรทัดวัด



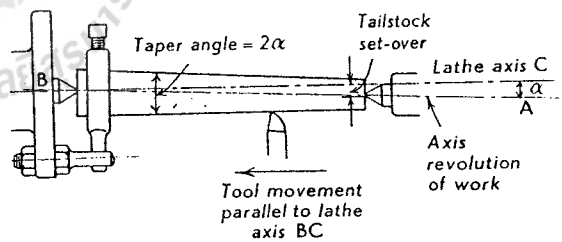
รูป 4.99: Tailstock

เราสามารถ**คำนวณค่าระยะเยื้อง**ได้จาก (ก) ขนาดความเรียวที่บอกเป็นอัตราส่วน เช่น 1:20 taper; หรือ (ข) มุมเรียว (angle of taper)

(ก) **ถ้าขนาดความเรียวเป็นอัตราส่วน**, ให้เอาระยะความยาวของงานหารด้วยระยะความยาวที่เส้นผ่าศูนย์กลางต่างกัน 1 หน่วย, แล้วหารผลลัพธ์ ด้วย 2 จะได้ค่าเป็น **ระยะเยื้อง**

ตัวอย่าง: จงหาค่าระยะเยื้องศูนย์ท้าย (set-over) สำหรับกลึงเรียวขนาด 1:20 taper และงานยาว 235 mm

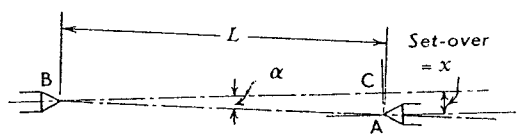
ขนาดความเรียว 1:20 หมายความว่า ถ้างานยาว 20 mm มีความแตกต่างในขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 1 mm เพราะฉะนั้นระยะเยื้องก็คือ ½ mm (หรือ 0.5 mm) ดังนั้น ถ้างานยาว 235 mm, ระยะเยื้องก็คือ (235)/(20x2) = 5.875 = 5.88 mm.



(a) Taper turning by setting-over tailstock

(ข) ถ้าบอกขนาดความเรียวเป็น**มุมเรียว** (2α) และความยาวของงานเท่ากับ L เราสามารถคำนวณระยะเยื้องศูนย์ท้าย (set-over, x) ได้จากการพิจารณารูป 4.100(b) ดังนี้:-

มุม ABC = α , sin(α) = AC/AB จะได้ ระยะเยื้อง, x = AC = AB.sin(α)



(b) Diagram for example (b) p. 341

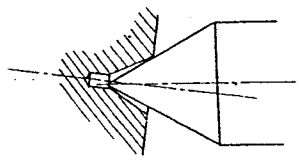
รูป 4.100: Taper turning with tailstock set-over

ตัวอย่าง: จงหาระยะเยื้องสำหรับการกลึงเรียวซึ่งมีมุมเรียว 6° และชิ้นงานยาว 235 mm

จะได้ x = AC = 235.sin(3°) = 235x0.0523 = 12.3 mm

ในขณะกลึงเรียวเราจะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของความเรียวด้วยเกจ(taper gauge) แล้วปรับศูนย์ท้าย

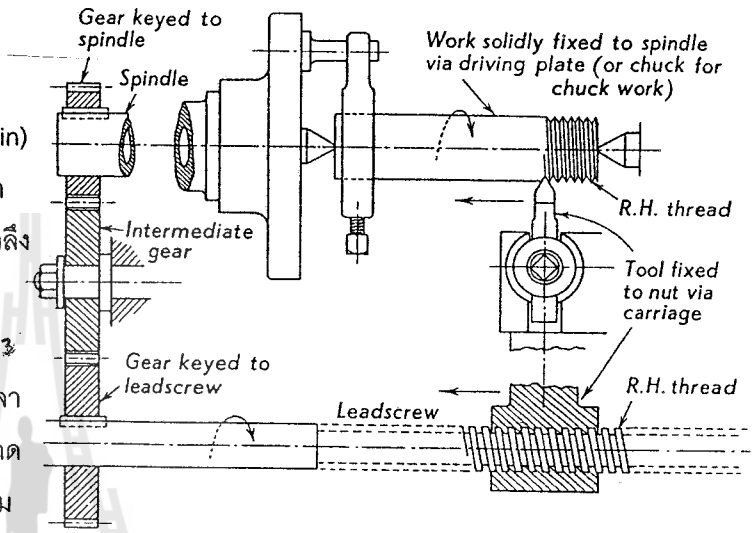
อยู่เสมอเพื่อให้ได้ขนาดความเรียวที่ถูกต้อง ทั้งนี้เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของศูนย์ท้าย (รูป4.101) ทำให้ชิ้นงานไม่อยู่ในตำแหน่งเยื้องศูนย์ที่แท้จริง และความคลาดเคลื่อนเช่นนี้จะเพิ่มมากขึ้นถ้ามุมเรียวเพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นการกลึงเรียวด้วยวิธีนี้จึงไม่เหมาะกับความเรียวที่มีค่าสูงๆ



รูป 4.101: Error of set-over

3.11 การกลึงเกลียวบนเครื่องกลึง (thread cutting in the lathe):

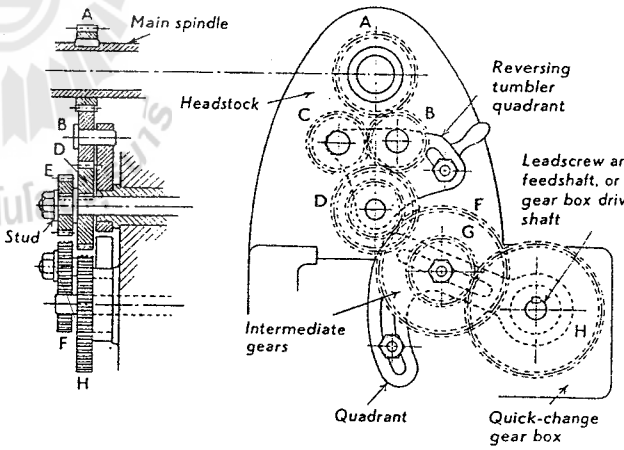
การตัดเกลียวบนเครื่องกลึงเกิดขึ้นได้เนื่องจากชิ้นงานในหัวจับ หมุนไปอย่างมีความสัมพันธ์ที่แน่นอนกับการเคลื่อนที่ของมีดกลึงในแนวแกนของชิ้นงาน ความสัมพันธ์เช่นนี้เกิดจากการใช้ชุดเฟืองทด(gear train) ต่อระหว่างเพลาหัวเครื่อง(spindle) และเพลาเกลียวนำ (lead screw) ซึ่งเป็นเพลาที่ขับเคลื่อน saddle พามีดกลึงตัดเป็นร่องบนผิวงาน (รูป 4.102)



รูป 4.102: ภาพแสดงการกลึงเกลียวบนเครื่องกลึง

เฟืองทดชุดนี้อยู่ที่หัวเครื่อง ดังแสดงในรูป 4.103 (เมื่อมองเข้าหาปลายหัวเครื่อง) จะเห็นว่าเฟือง A ที่เพลาหัวเครื่อง(spindle) จะขับเฟือง D ผ่านเฟือง B และขนาดของเฟือง A เท่ากับขนาดของเฟือง D เพราะฉะนั้นความเร็วรอบของเพลาหัวเครื่องจะเท่ากับความเร็วรอบของเพลาของเฟือง D ซึ่งเราเรียกเพลาตัวนี้ว่า เพลา stud

เฟือง B ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการหมุนของเพลาเท่านั้น (ถ้าให้เฟือง C ขบกับเฟือง A ทิศการหมุนของเพลา stud จะเป็นตรงกันข้าม) ดังนั้นจึงถือได้ว่าเพลา stud ก็คือเพลาหัวเครื่อง และอัตราเฟืองทดระหว่างเพลาหัวเครื่องและเพลาเกลียวนำ(lead screw) จะเท่ากับอัตราเฟืองทดระหว่างเพลา stud กับเพลาเกลียวนำ



รูป 4.103: ชุดเฟืองระหว่าง spindle กับ leadscrew

การปรับความเร็วรอบในการหมุนของชิ้นงานให้เหมาะกับการการเคลื่อนที่ตัดของมีดตัด เกิดจากการใช้เฟือง E, F, G, และ H ประกอบเป็นชุดเฟืองซึ่งมีอัตราทดที่เหมาะสม

การเคลื่อนที่ของ saddle เกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนของเพลาเกลียวนำขับแป้นเกลียว (nut) ซึ่งติดอยู่กับด้านในของ apron ถ้าหากเพลาเกลียวนำมีระยะพิตช์ (pitch) เท่ากับ 5 mm และชุดเฟืองที่ต่อระหว่างเพลา stud กับ เพลาเกลียวนำมีอัตราทดเท่ากับ 1:1, เมื่อเพลาเกลียวนำหมุน 1 รอบ ชิ้นงานก็หมุน 1 รอบด้วย เพราะฉะนั้นชิ้นงานจะมีระยะพิตช์เท่ากับ เพลาเกลียวนำ คือเท่ากับ 5 mm แต่ถ้าต้องการให้ชิ้นงานเป็นเกลียวซึ่งมีขนาดพิตช์ เท่ากับ 2.50 mm ชิ้นงานจะต้องหมุนเร็วเป็น 2 เท่าของเพลาเกลียวนำ

- **การคำนวณอัตราเฟืองทดในการกลึงเกลียว**(gears for thread cutting): เราสามารถใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้คำนวณหาชุดเฟืองทดได้ :-

(Diver teeth)/(driven teeth) = (leadscrew turns)/(spindle turns)

= (pitch to be cut)/(pitch of leadscrew)

ตัวอย่าง: จงคำนวณหาขนาดของชุดเฟืองประกอบเพื่อตัดเกลียวขนาดพิตช์ = 1.75 mm บนเครื่องกลึง โดยที่ขนาดพิตช์ของเพลาเกลียวนำ = 6 mm.

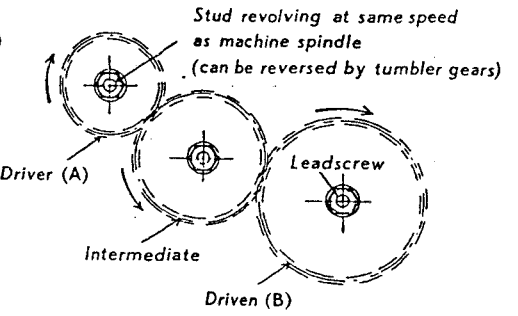
การคำนวณ: driver/ driven = 1.75/6.00 = 175/600 = 35/120

ถ้าใช้ simple gear train (รูป 4.104) ต้องใช้เฟือง 35T ที่เพลา stud และใช้เฟือง 120T ที่เพลาเกลียวนำ

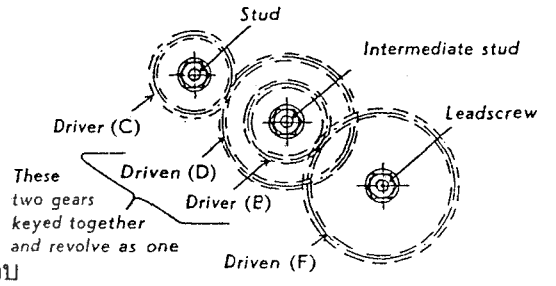
แต่ถ้าจำเป็นต้องใช้ compound gear train(รูป 4.105) จะต้องคำนวณต่อไปดังนี้ 35/120 = (7x5)/(12x10)

= (7x5)/(12x5).(5x5)/(10x5) = (35x60)/(25x50)

35T และ 25T เป็นเฟืองขับ ส่วน 60T และ 50T เป็นเฟืองตาม



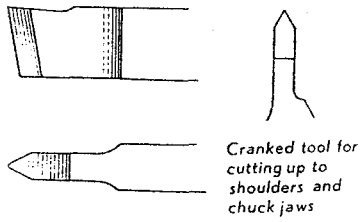
รูป 4.104: Simple gear train



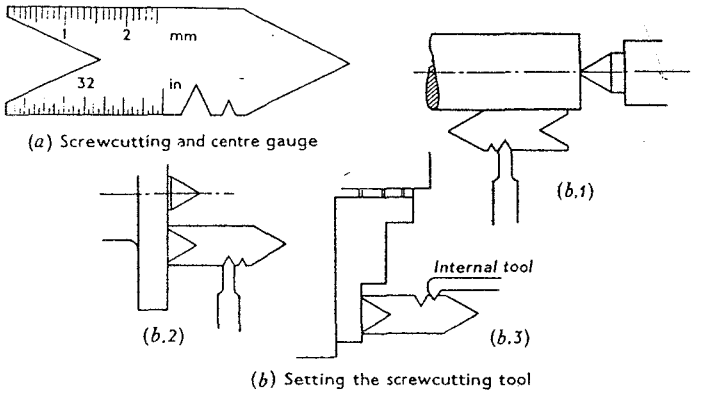
รูป 4.105: Compound gear train

ปัจจุบันเครื่องกลึงสมัยใหม่มีห้องเกียร์สำหรับเปลี่ยนอัตราทดรอบระหว่าง spindle กับ leadscrew ทำให้สะดวกต่อการเลือกใช้อัตราทดสำหรับกลึงเกลียวแต่ละขนาด และไม่จำเป็นต้องหาเฟืองมาประกอบเอง

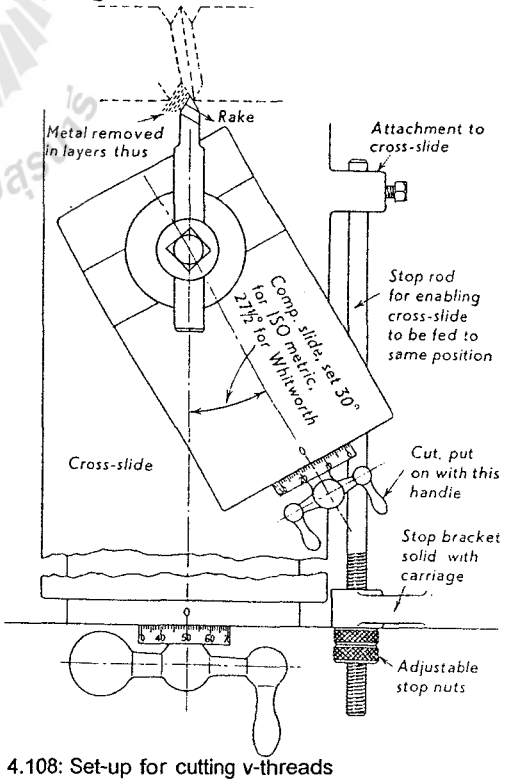
❑ **การตั้งมีดเพื่อกลึงเกลียว**: ในรูป 4.106 แสดงลักษณะของมีดกลึงสำหรับตัดเกลียวเมตริก ISO (รายละเอียดของขนาดเกลียวอยู่ในหน้า 71) รูป 4.107 แสดงการตั้งมีดก่อนกลึงด้วย center gauge เพื่อให้มีดตั้งฉากกับผิวงาน ในการป้อนมีดเพื่อให้เกิดความลึกของเกลียวจะต้องให้คมตัดกินเนื้อโลหะเพียงด้านเดียว เพื่อลดโอกาสที่มีดตัดจะงัดชิ้นงาน และเกิดความเสียหายขึ้น จะต้องตั้ง compound slide ทำมุมเท่ากับ ½ ของมุมเกลียว (ในกรณีเกลียวเมตริก = 30°) ดังในรูป 4.108



รูป 4.106: Screw cutting tools



รูป 4.107: Setting tool



รูป 4.108: Set-up for cutting v-threads

ที่มา:

[1] Ted Busch, Fundamentals of Dimensional Metrology, 3rd Ed., Wilkie Brothers, 1966.

[2] R.L. Timings, Fundamentals of Engineering, Addison Wesley Longman Limited, 1995.

[3] R.L. Timings, Manufacturing Technology, Vol.1, 3rd Ed., Longman, 1993.

[4] South Ben Lathe Works, How to Run a Lathe, 1956.

[5] S.K. Krar and J.W. Oswald, Technology of Machine-tools, 4th Ed., McGraw-Hill, 1990.

[6] G. Boothroyd, Fundamentals of Metal Cutting and Machine-tools, McGraw-Hill, 1975.

[7] W.A.J. Chapman, Workshop Technology, Part 1, 5th Ed., Arnold & ELBS, 1978.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กระบวนการเชื่อมโลหะ

(Metal Welding Processes)

1.บทนำ

1.1 ความสำคัญของกระบวนการเชื่อมโลหะ

การเชื่อมโลหะ(metal welding) เป็นวิธีการต่อโลหะ 2 ชิ้นหรือมากกว่าให้ติดกัน โดยทั่วไปมักใช้ความร้อนหลอมรอยต่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน หรือหลอมวัสดุประสานรอยต่อ ทำให้ชิ้นส่วนโลหะติดกันเป็นผลิตภัณฑ์และโครงสร้างต่างๆ เช่น กาต้มน้ำ, รถจักรยาน, รถยนต์, เครื่องบิน, ท่อส่งน้ำมัน, เรือเดินสมุทร, สะพาน, อาคาร ฯลฯ อาจกล่าวได้ว่า 50% ของผลิตภัณฑ์โลหะทั้งหมดเกิดจากกรรมวิธีการเชื่อมโลหะ

1.2 ข้อดีและขีดจำกัดของกระบวนการเชื่อมโลหะ

กระบวนการเชื่อมเป็นกระบวนการผลิตที่ประหยัด เพราะเหลือเศษวัสดุน้อย เมื่อเทียบกับกระบวนการตัดโลหะ (metal cutting or machining processes) ซึ่งจำเป็นต้องมีเศษโลหะจากการตัด เช่น การกลึง(turning), การไส (shaping), การกัด (milling); หรือเมื่อเทียบกับ กระบวนการขึ้นรูปโลหะ (forming processes) เช่นการ ตีขึ้นรูป (forging), การอัดขึ้นรูป(extrusion) ซึ่งจำเป็นต้องมีการตัดคลีบหรือส่วนเกินออก; หรือเมื่อเทียบกับกระบวนการหล่อโลหะ(metal casting) ซึ่งจำเป็นต้องตัดรูเท, รันเนอร์, และรูล้น (riser) ออก

นอกจากนี้กระบวนการเชื่อมยังมีข้อดีอื่นๆคือ ทำงานได้เร็วกว่า, สามารถใช้กับโลหะเชิงพาณิชย์ได้ทุกชนิด, และต่อโลหะต่างชนิดกันได้ กล่าวโดยสรุป กระบวนการเชื่อมโลหะมีข้อดีคือ:- (1) เป็นการต่อโลหะแบบถาวรที่ราคาถูก; (2) ให้รอยต่อที่มีน้ำหนักเบา; (3) ต่อโลหะเชิงพาณิชย์ได้ทุกชนิด; (4) ใช้ได้ทุกสถานที่; (5) เพิ่มความยืดหยุ่นในการออกแบบชิ้นงาน

อย่างไรก็ตาม กระบวนการต่อโลหะชนิดนี้ ก็มีข้อจำกัดเหมือนกัน ที่สำคัญคือ: (1) การเชื่อมด้วยมือต้องอาศัย **ความรู้ทักษะและฝีมือของช่างเชื่อมเป็นหลัก**; (2) จะต้องมีการตรวจหาจุดบกพร่องภายในรอยเชื่อมเสมอ ซึ่งข้อจำกัดข้อแรก เกิดจากคุณภาพของงานเชื่อม ขึ้นอยู่กับคุณภาพของช่างเชื่อม และในปัจจุบันจะหาช่างเชื่อมที่มีคุณภาพได้ยาก ส่วนขีดจำกัดข้อสอง เป็นเรื่องเกี่ยวกับการตรวจสอบภายในรอยเชื่อม (weld inspection) ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นนอกเหนือจากค่าใช้จ่ายสำหรับช่างเชื่อมและรอยเชื่อม

1.3 โลหะสำหรับงานเชื่อม

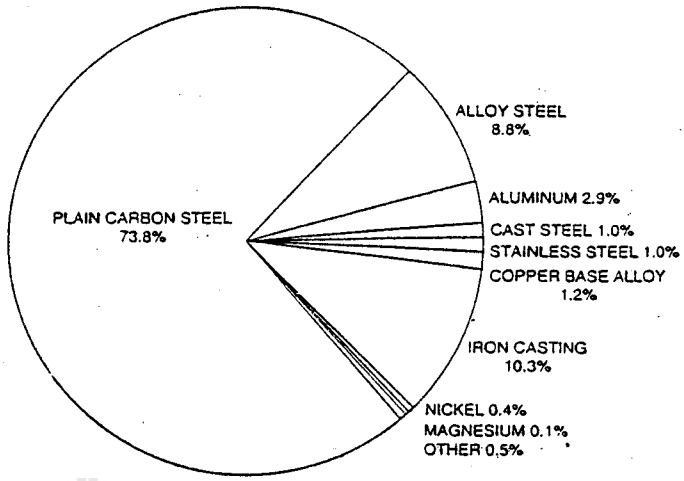
*แม้ว่า*กระบวนการเชื่อมโลหะจะสามารถต่อโลหะได้ทุกชนิด โลหะบางอย่างอาจจะ **"เชื่อมยาก"** คือจำเป็นต้องใช้กรรมวิธีการเชื่อมพิเศษที่กำหนดขึ้นเฉพาะสำหรับโลหะหรือชิ้นงาน แต่ก็มีโลหะหลายชนิดที่สามารถเชื่อมได้โดยใช้กรรมวิธีการเชื่อมตามปกติเท่านั้น โลหะเหล่านี้ ถือว่าเป็นโลหะที่ **"เชื่อมง่าย"**

คุณสมบัติที่กำหนดความสามารถในการเชื่อมของโลหะมีอยู่หลายอย่าง เช่น จุดหลอมเหลวของโลหะ, ความหนาแน่น, การนำความร้อน, และ ความแข็งแรง เป็นต้น โลหะบางชนิด ไม่สามารถนำมาเชื่อมต่อกันได้ เช่น ปรอท (mrcury) เพราะเป็นของเหลว หรือ โปแตสเซียม (potassium) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำมาก คือต่ำกว่าจุดน้ำเดือด ดังนั้นในงานวิศวกรรมจึงไม่ใช้โลหะเหล่านี้ เป็นชิ้นส่วนรับแรงหรือน้ำหนัก

ในการพิจารณาเลือกใช้โลหะสำหรับงานเชื่อม นอกจากจะต้องพิจารณาคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพแล้ว ยังต้องคำนึงถึงราคาของโลหะแต่ละอย่างด้วย ในปัจจุบัน มีโลหะให้เลือกใช้หลายชนิด ซึ่งมีความแตกต่างกันในคุณสมบัติทางกล, ทางกายภาพ และ ราคา ในรูป 1.1 แสดงตัวอย่างสัดส่วนของโลหะเชิงพาณิชย์ที่ผลิตในอเมริกาต่อปี ซึ่งสามารถถือได้ว่าเป็นสัดส่วนของการใช้โลหะในอุตสาหกรรมด้วย จะเห็นได้ว่าเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นโลหะที่ถูกใช้งาน

มากที่สุดคือ 73.8% รองลงมาเป็นเหล็กหล่อ (iron casting) แต่การใช้เหล็กหล่อมักไม่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโดยตรง ส่วนมากเป็นการเชื่อมเพื่อซ่อมแซมส่วนที่ชำรุดมากกว่า

ในกลุ่มของเหล็กกล้าโลหะผสม(alloy steels) จะประกอบไปด้วย เหล็กกล้าโลหะผสมต่ำ(ที่มีความแข็งแรงสูง—high strength steels), เหล็กกล้าสำหรับอบชุบ, และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ (ultra-high strength steel) เหล็กกล้าโลหะผสม เหล่านี้ต้องการ กรรมวิธีในการเชื่อมที่แตกต่างกัน



รูป 1.1: ปริมาณการผลิตโลหะ (แบ่งตามชนิด)ต่อปี ของอเมริกา

อลูมิเนียมและอลูมิเนียมโลหะผสม(aluminium and aluminium alloys) เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (non-ferrous metal)ที่ได้รับความนิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่นเดียวกับเหล็กกล้าโลหะผสม อลูมิเนียมโลหะผสมแต่ละชนิด ต้องการกรรมวิธีเชื่อมโดยเฉพาะ

ในกลุ่มของทองแดงและทองแดงโลหะผสม(copper and copper alloys) มีหลายชนิดที่ใช้ในงานเชื่อมโลหะ เช่น ทองเหลือง(copper – zinc), บรอนซ์ (copper – tin), ซิลิกอนบรอนซ์ (copper – silicon), คิวโปร-นิกเกิล (copper nickel) และ โลหะผสมที่สามารถอบชุบได้ เช่น คอบเปอร์-โครเมี่ยม (copper-chromium) เป็นต้น

กลุ่มเหล็กกล้าหล่อ (cast cteels) ซึ่งมีสัดส่วนประมาณเท่าๆกับกลุ่มของเหล็กกล้าสเตนเลส เหล็กกล้าหล่อมีคุณสมบัติทางการเชื่อมไม่แตกต่างจากเหล็กกล้ารีด (rolled steels)

นอกจากนี้ยังมีกลุ่มโลหะย่อยๆ เช่น นิกเกิลและนิกเกิลโลหะผสม; โลหะกลุ่มแมกนีเซียมและแมกนีเซียมโลหะผสม เป็นต้น โลหะเหล่านี้ส่วนมากใช้เชื่อมประกอบเป็นชิ้นงานพิเศษบางอย่าง

1.4 วิวัฒนาการของการเชื่อมโลหะ

กล่าวได้ว่า การต่อโลหะด้วยวิธีการเชื่อมเกิดขึ้นตั้งแต่ยุคบรอนซ์ (Bronze Age) เช่นมีการนำแผ่นทองคำมาซ้อนเกยกัน แล้วใช้แรงอัดให้ติดกัน (pressure welding) แล้วประกอบขึ้นเป็นกล่องทรงกลมเล็กๆ ซึ่งมีการประมาณกันว่ากล่องโลหะนี้มีอายุไม่ต่ำกว่า 2,000 ปี และในปัจจุบันถูกเก็บอยู่ที่ National Museum ในเมือง Dublin ประเทศสาธารณรัฐไอแลนด์

ในยุคกลาง (Middle Age) ในประเทศอินเดีย มีการใช้วิธีตี (hammering) เชื่อมเหล็กชิ้นเล็กๆให้ติดกันเป็นเสาเหล็กที่เรียกว่า Pilar of Delhi ซึ่ง ยาว 7.6 เมตร: มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโคนเสา 40 cm; ปลายเสา, 30 cm. และมีน้ำหนัก 5.4 ตัน นอกจากนี้ ยังมีการค้นพบงานเชื่อมลักษณะเดียวกันนี้ในยุโรป, และ สแกนดิเนเวีย

สำหรับกระบวนการเชื่อมต่างๆที่พบเห็นกันในปัจจุบัน มีวิวัฒนาการมาตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 19 ซึ่งสรุปได้ดังนี้:-

ค.ศ.1800 Sir Humphry Davy : ใช้แบตเตอรี่ทำให้เกิดการอาร์กระหว่างแท่งอีเล็คโทรดคาร์บอน 2 แท่ง

ค.ศ.1836 Edmund Davy: พบแก๊สอะเซตทีลีน

ค.ศ.1881 Auguste De Meretens: ชาวฝรั่งเศส ใช้ความร้อนจากการอาร์กต่อแผ่นตะกั่วสำหรับแบตเตอรี่

ค.ศ. 1885 – 1887 NiKolai N. Benardos และ Stanistaus Olazewaki: ชาวรัสเซีย จดสิทธิบัติการเชื่อมในอังกฤษ (1885) และในอเมริกา (1887)

ค.ศ. 1885 Elihu Thompson: ตั้งบริษัท Thompson Electric Welding Company และ พัฒนาการเชื่อมความต้านทาน

ค.ศ. 1887: มีการพัฒนาการเชื่อมและการตัดด้วยแก๊สให้สมบูรณ์

ค.ศ. 1890-1900: การเชื่อมอาร์กด้วยแท่งคาร์บอน เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่กลาย

ค.ศ. 1890 C.L. Coffin: จดสิทธิบัตรการเชื่อมอาร์กโดยใช้อีเล็คโทรดโลหะ(metal electrode)ในอเมริกา

ค.ศ. 1900 Goldschmidt: ประดิษฐ์การเชื่อมเทอมิต (Thermit Welding) และใช้เชื่อมรางรถไฟครั้งแรกในปี 1903

ค.ศ. 1900: มีการออกแบบหัวเชื่อมแก๊สให้เหมาะสำหรับใช้กับอะเซตทีลีนความดันต่ำ(low pressure acetylene)

ค.ศ. 1907-1914 Oscar Kjellberge: ชาวสวีเดน จดสิทธิบัตรลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ในปี 1912

ค.ศ. 1919: เกิดสมาคมการเชื่อมของอเมริกา (American Welding Society - AWS)

ค.ศ. 1920 C.S.Holslat: ประดิษฐ์เครื่องเชื่อมกระแสสลับ แต่มาแพร่หลายปี1930 เมื่อลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์อย่างหนาเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง

ค.ศ. 1920 Langstroth และ Wunder : (อยู่กับ A.O. Smith Company) ทำลวดหุ้มฟลักซ์ด้วยวิธีอัดรีด (extrusion)

ค.ศ. 1926 H.M.Hobart และ P.K.Derers: คิดค้นกระบวนการเชื่อมทิก (TIG welding)

ค.ศ. 1930 New York Navy Yard: พัฒนาการเชื่อมสลัก (stud welding)

ค.ศ. 1941 Nerdith: จดสิทธิบัตรชื่อ Heliarc Welding ใช้ฮีเลี่ยมเป็นแก๊สปกคลุมรอยเชื่อม

ค.ศ. 1948 Battelle Memorial Institute: พัฒนา GMAW โดยได้รับการสนับสนุนจาก Air Reduction Company

ค.ศ. 1953 Lyubavskii และ Novoshilov: ใช้ลวดสิ้นเปลืองในบรรยากาศ CO_2

1.5 ประเภทของกระบวนการเชื่อมโลหะ

สมาคมการเชื่อมของอเมริกา(AWS)ได้จัดกลุ่มกระบวนการเชื่อมทั้งหลายเป็นกลุ่มๆ โดยอาศัย วิธีการถ่ายโอนพลังงาน และการดึงดูดระหว่างอณูของโลหะที่รอยต่อ เป็นหลักในการจัดกลุ่ม นอกจากนี้ยังได้กำหนด นิยามให้กับ กระบวนการเชื่อมต่างๆ เพื่อให้เกิดความชัดเจนและสมบูรณ์

ในรูป 1.2 เป็นแผนภูมิของ AWS ที่แสดงกลุ่มกระบวนการเชื่อม, กลุ่มกระบวนการที่เกี่ยวเนื่องกับการเชื่อม, และกระบวนการเชื่อมของแต่ละกลุ่ม (พร้อมทั้งอักษรย่อ) ซึ่งนิยมใช้กันในอุตสาหกรรม; โดยมีรายละเอียดพอสังเขปดังนี้:-

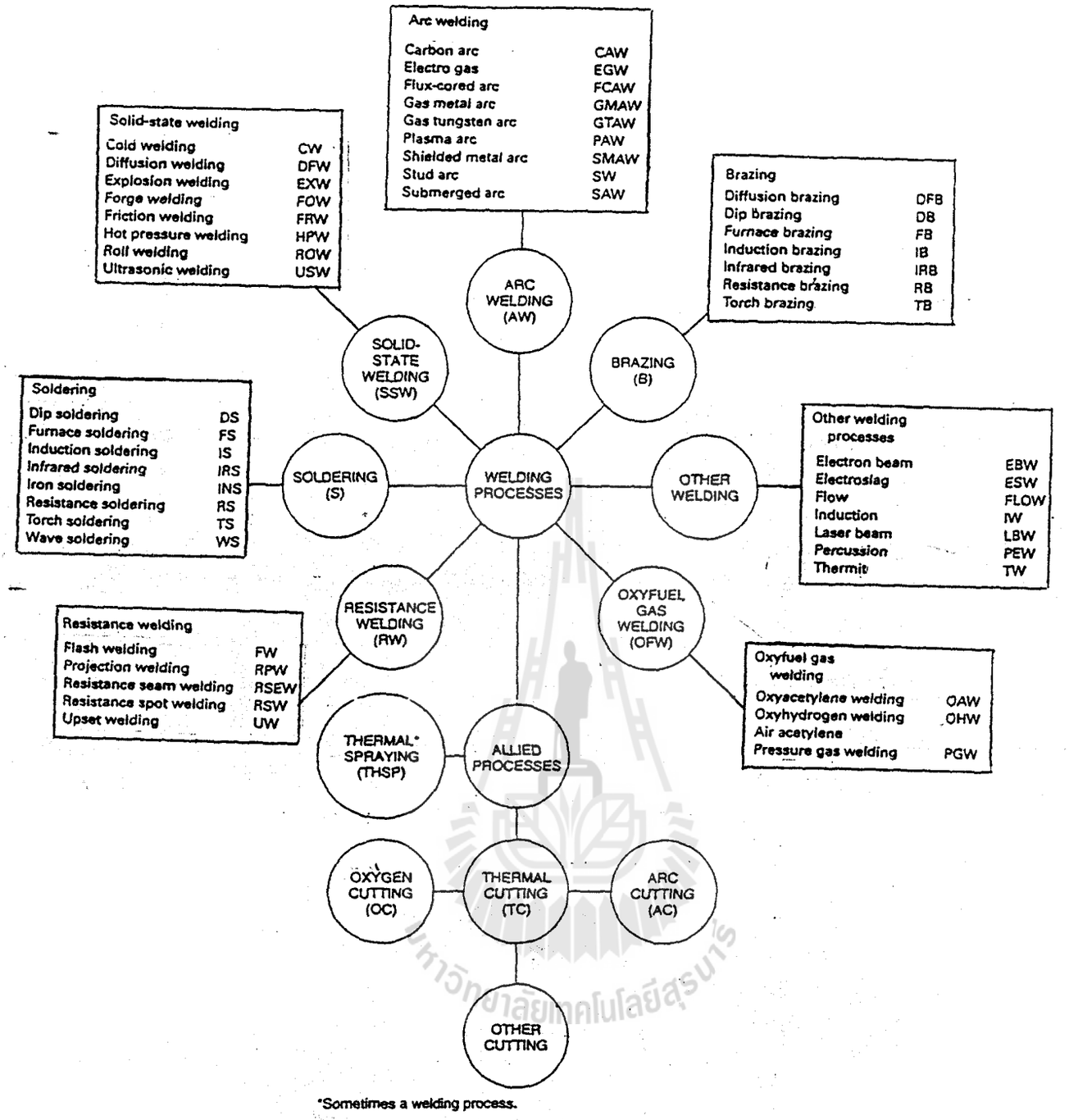
- **กระบวนการเชื่อม** (Welding Processes): คือกระบวนการต่อโลหะ โดยทำให้รอยต่อติดกัน (coalescence) ซึ่งอาจทำให้ติดกันด้วยความร้อนอย่างเดียว, หรือใช้ความดันร่วมด้วย, หรือใช้ความดันอย่างเดียว, และอาจมีการเติมโลหะลงในรอยต่อหรือไม่ก็ได้

- **การเชื่อมอาร์ก** (Arc Welding - AW): เป็นกลุ่มกระบวนการเชื่อมโลหะที่ อาศัยความร้อนจากการอาร์กไฟฟ้าทำให้ผิวรอยต่อหลอมติดกัน ซึ่งอาจมีการใช้ความดัน หรือการเติมโลหะให้กับรอยเชื่อมหรือไม่ก็ได้

กลุ่มการเชื่อมอาร์กประกอบด้วยกระบวนการที่สำคัญ 9 กระบวนการด้วยกัน ซึ่งในกระบวนการเหล่านี้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อยที่มีความแตกต่างกันโดยพื้นฐานคือ **กลุ่มที่ใช้อีเล็คโทรดที่หลอมละลาย**พร้อมๆกับการหลอมละลายของรอยต่อชิ้นงาน; และ**กลุ่มที่ใช้อีเล็คโทรดที่ไม่หลอมละลาย**ในการอาร์ก; ชิ้นงานหลอมอย่างเดียว และมีการเติมโลหะลงในบ่อหลอมแนวเชื่อม

- **การแล่นประสาน** (Brazing - B): เป็นกลุ่มของกระบวนการต่อโลหะโดยให้ความร้อนแก่รอยต่อโลหะพร้อมๆกับโลหะเติม (filler metal) ซึ่งมีจุดหลอมสูงกว่า 450°C แต่ต่ำกว่าจุดหลอมของโลหะชิ้นงาน โลหะเติมที่หลอมจะไหลแทรกเข้าไปในร่องแคบๆระหว่างผิวชิ้นงานด้วยการซึม (capillary action) ทำให้รอยต่อติดกัน

การแล่นประสาน ไม่ทำให้ชิ้นงานหลอม มีเพียงโลหะเติมเท่านั้นที่หลอม ถ้าหากว่ารอยต่อเป็นร่องกว้างและโลหะเติมถูกหลอมพอกพูนในรอยต่อ โดยไม่ได้เกิดจากการซึม(capillary action)แล้ว เราเรียกการประสานโลหะเช่นนี้ว่า **การเชื่อมประสาน**(Braze Welding)



รูป 1.2: แผนภูมิแสดงการจัดกลุ่มกระบวนการเชื่อม

- **การเชื่อมแก๊สด้วยออกซิเจนกับแก๊สเชื้อเพลิง** (Oxyfuel Gas Welding - OFW): เป็นกลุ่มของกระบวนการเชื่อมที่ใช้ความร้อนจากเปลวไฟซึ่งเกิดจาก แก๊สออกซิเจนและ แก๊สเชื้อเพลิง ทำให้โลหะหลอมติดกัน และในการเชื่อมนี้อาจมีการใช้ความดัน หรือโลหะเติม หรือไม่ก็ได้ ถ้าหากมีการใช้โลหะเติม (filler metal) เปลวไฟจากหัวเชื่อม (welding torch) จะหลอมโลหะเติมพร้อมๆกับรอยต่อชิ้นงาน

ในกลุ่มนี้ มี 4 กระบวนการเชื่อม แต่มีเพียง 2 กระบวนการแรกเท่านั้นที่แพร่หลาย กระบวนการเชื่อมทั้ง 4 ได้แก่:-

(1) **การเชื่อมแก๊สอ๊อกซีอะเซตทีลีน** (Oxyacetylene Welding – OAW): ใช้เปลวไฟจากการเผาไหม้ของแก๊สอะเซตทีลีนกับแก๊สออกซิเจน

(2) **การเชื่อมแก๊สอ๊อกซีไฮโดรเจน** (Oxyhydrogen Welding – OHW): ใช้เปลวไฟจากการเผาไหม้ ของแก๊สไฮโดรเจน กับแก๊สอ๊อกซิเจน

(3) **การเชื่อมแก๊สใช้ความดัน** (Pressure Gas Welding – PGW): ให้ความร้อนรอยต่อด้วยเปลวไฟจากการเผาไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง (ส่วนมากมักเป็นแก๊สอะเซตทีลีน) และแก๊สออกซิเจน แล้วใช้ความดันทำให้รอยต่อติดกัน

(4) **การเชื่อมแก๊สด้วยอากาศและแก๊สอะเซตทีลีน** (Air-Acetylene Welding – AAW): คล้ายกับการเชื่อมแบบแรก แตกต่างกันที่ใช้อากาศแทนแก๊สอ๊อกซิเจน ดังนั้นเปลวไฟเชื่อมจึงให้ความร้อนจะต่ำกว่า ในปัจจุบันถือว่าเป็นกระบวนการเชื่อมที่ล้าสมัยและมีใช้กันน้อย

- **การเชื่อมความต้านทาน** (Resistance Welding – RW): เป็นกลุ่มของกระบวนการเชื่อมที่ใช้ความร้อนซึ่งเกิดจากความต้านทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าที่มีชิ้นงานเป็นส่วนหนึ่งของวงจร แล้วใช้ความดันทำให้รอยต่อติดกัน การเชื่อมชนิดนี้ไม่ต้องพึ่งพาแหล่งความร้อน และความดันจากภายนอกเครื่อง: ความดันที่กระทำกับรอยต่อเกิดจากการกดของอีเล็คโทรดของเครื่อง ไม่มีการใช้ฟลักซ์ หรือโลหะเติม หรือแก๊สปกคลุม(shielding)

การเชื่อมความต้านทานมีหลายแบบ เช่นการเชื่อมจุด(spot welding), การเชื่อมตะเข็บ(seam welding), และการเชื่อมส่วนที่ยื่น(projection welding) เป็นต้น ความแตกต่างของการเชื่อมแต่ละแบบอยู่ที่ การออกแบบรอยเชื่อม, และเครื่องจักรที่ใช้เชื่อม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบบอัตโนมัติ

- **การบัดกรี** (Soldering – S): เป็นกลุ่มกระบวนการเชื่อมที่ทำให้โลหะติดกัน (coalescence) โดยให้ความร้อนแก่รอยต่อจนมีอุณหภูมิที่เหมาะสม แล้วหลอมโลหะเติมซึ่งมีจุดหลอมต่ำกว่า 450°C (และต่ำกว่าจุดหลอมตัวของโลหะชิ้นงานด้วย) เมื่อโลหะเติมหลอมเหลวจะซึมเข้าไปแทรกระหว่างผิวของรอยต่อ (capillary action) ตามปกติ การจัดประเภทของการบัดกรี ใช้ความแตกต่างของวิธีการให้ความร้อนแก่รอยต่อเป็นเกณฑ์ในการจัด ซึ่งวิธีการที่ใช้อยู่อาศัยหลักการของ การนำ (conduction), การ พา (convection), การแผ่รังสี (radiation), การใช้ความต้านทาน (resistance), และการใช้กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induction)

- **การเชื่อมในสภาวะของแข็ง** (Solid-state Welding --SSW): เป็นการทำให้รอยต่อของชิ้นงานติดกันโดยใช้ความร้อนร่วมกับความดัน หรือใช้ความดันอย่างเดียวกระทำกับรอยต่อ แต่ในการเชื่อมแบบนี้ อุณหภูมิเชื่อม (welding temperature) จะต่ำกว่าจุดหลอมของโลหะชิ้นงาน และไม่มีการใช้โลหะเติมในขณะเชื่อม

การตีเชื่อมโลหะ (forge welding) ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมที่เก่าแก่อย่างหนึ่ง ก็จัดอยู่ในกลุ่มนี้ นอกจากนี้ยังมี: การเชื่อมแบบกดเย็น (cold welding), การเชื่อมแบบแพร่ (diffusion welding), การเชื่อมแบบอัดระเบิด (explosion welding), การเชื่อมแบบเสียดทาน (friction welding), การเชื่อมแบบกดร้อน (hot pressure welding, การเชื่อมแบบหมุน(roll welding), การเชื่อมแบบใช้อัลตร้าโซนิค (ultrasonic welding), และการเชื่อมแบบอัดรีด (coextrusion welding) เป็นต้น

- **กระบวนการเชื่อมอื่นๆ** (Other welding processes): เป็นกลุ่มกระบวนการเชื่อมที่ไม่ได้ถูกจัดเข้าเป็นกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งที่กล่าวมาแล้ว เช่น การเชื่อมด้วยลำแสงอีเล็คตรอน (Electron beam welding), การเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์, การเชื่อมเทอร์มิต (Thermit welding), การเชื่อมกระทบ (percussion welding), และการเชื่อมอีเล็คโตรแสลก (Electroslag welding) เป็นต้น

1.6 การเชื่อมโลหะในทางปฏิบัติ:

มีวิธีปฏิบัติงานเชื่อมอยู่หลายวิธี เช่น เชื่อมด้วยมือ (manual welding), เชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ, เชื่อมแบบอัตโนมัติ, หรือแบบใช้หุ่นยนต์ ซึ่งการเชื่อมแต่ละวิธีเหล่านี้ ต้องใช้ระดับของทักษะและความสามารถของคนงานไม่เท่า

กัน เพราะฉะนั้นจึงมีคำเรียกผู้ที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อม ให้แตกต่างกัน เพื่อสะท้อนให้เห็น ระดับของทักษะและความสามารถของบุคคลผู้นั้น เช่น: คำว่า **ช่างเชื่อม** (welder) หมายถึงผู้ที่ทำการเชื่อมด้วยมือ หรือ เชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ; และ **ผู้ปฏิบัติการเชื่อม** (welding operator) หมายถึงผู้ปฏิบัติงานควบคุมระบบการเชื่อมอัตโนมัติ (automatic welding), การเชื่อมด้วยกลไก(mechanized welding), หรือการเชื่อมด้วยแขนกล(robotic welding)

อย่างไรก็ตาม คำจำกัดความทั้งสองนี้ ก็ยังคงไม่สามารถบ่งระดับทักษะและความชำนาญอย่างแท้จริงของช่างเชื่อมได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมด้วยมือ (manual welding) ช่างเชื่อมคนหนึ่ง อาจมีความชำนาญกับการเชื่อมกึ่งอัตโนมัติชนิดหนึ่ง แต่อาจไม่สามารถเชื่อมด้วยกระบวนการกึ่งอัตโนมัติชนิดอื่นได้ แต่ปัญหาเช่นนี้มักไม่เกิดกับ **ผู้ปฏิบัติงานเชื่อม** ทั้งนี้เพราะว่า ทักษะของการเชื่อมด้วยกลไก และ การเชื่อมแบบอัตโนมัติต่างๆ ไม่แตกต่างกันมากนัก

ในอุตสาหกรรม มีการใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กอยู่ 6 แบบคือ:

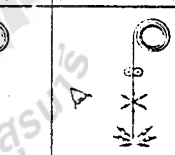
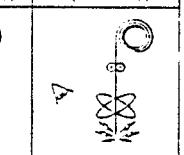
(1) **การเชื่อมด้วยมือ** (Manual Welding -- MA): ใช้มือจับ และควบคุมการเคลื่อนที่ของ หัวเชื่อม, ปืนเชื่อม, หรือ หัวจับอีเล็คโทรด (electrode holder)

(2) **การเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ** (Semiautomatic Welding – SA): เป็นการเชื่อมด้วยมือ และมีอุปกรณ์ควบคุมแบบอัตโนมัติคอยควบคุมเงื่อนไขของการเชื่อมหนึ่งอย่างหรือมากกว่า

(3) **การเชื่อมด้วยกลไก** (Mechanized Welding – ME): เป็นการเชื่อมแบบใช้อุปกรณ์ ซึ่งต้องใช้มือปรับแต่งกลไกเชิงกลที่บังคับการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมหรือหัวจับอีเล็คโทรด

(4) **การเชื่อมแบบอัตโนมัติ** (Automatic Welding -- AU): เป็นการเชื่อมแบบไม่ต้องใช้มือปรับแต่งอุปกรณ์ควบคุม และจะใช้ตาดูหรือไม่ก็ได้

(5) **การเชื่อมด้วยแขนกลหรือหุ่นยนต์** (Robotic Welding – RO): เป็นการเชื่อมโดยใช้แขนกลหรือหุ่นยนต์ ปฏิบัติงานและควบคุมอุปกรณ์เชื่อม

Method of Application / Arc Welding Elements/Function	MA Manual (closed loop)	SA Semiautomatic (closed loop)	ME Mechanized (closed loop)	AU Automatic (open loop)	RO Robotic (open or closed loop)	AD Adaptive Control (closed loop)
						
Starts- maintains, and controls the arc	Person	Machine	Machine	Machine	Machine	Machine
Feeds- and directs the electrode into the arc	Person	Machine	Machine	Machine	Machine	Machine
Manipulates- the arc to control the molten metal weld pool	Person	Person	Machine	Machine	Machine (robot) with or without sensor	Machine with sensor
Moves- the arc along joint (travel)	Person	Person	Machine	Machine via prearranged path	Machine (robot) with or without sensor	Machine with sensor
Guides- the arc along joint	Person	Person	Person	Machine via prearranged path	Machine (robot) with or without sensor	Machine with sensor
Corrects- the arc to overcome deviations	Person	Person	Person	Does not correct hence potential weld imperfection	Machine (robot) only with sensor	Machine with sensor

รูป 1.3: วิธีปฏิบัติงานเชื่อมของกระบวนการเชื่อมอาร์ก

(6) **การเชื่อมโดยใช้ระบบควบคุมแบบอะแดพทีฟ** (Adaptive Control Welding – AD): เป็นการเชื่อมโดยใช้อุปกรณ์ที่มีระบบควบคุม ซึ่งสามารถปรับพารามิเตอร์ของการเชื่อม(ให้เหมาะกับสภาวการณ์ที่เกิดขึ้นในขณะเชื่อม)ได้เอง

ลักษณะของการควบคุมแบบอะแดพทีฟ จะเป็นที่เข้าใจได้ง่ายขึ้น ถ้าพิจารณาจากการเชื่อมอาร์ก (arc welding) ด้วยมือธรรมดา กล่าวคือ ในการเชื่อมอาร์กด้วยมือ ช่างเชื่อมจะเริ่มต้นอาร์ก; รักษาระยะอาร์ค (arc length); เคลื่อนที่และส่ายหัวเชื่อม; เมื่อลวดเชื่อมสั้นลง, ระยะอาร์กจะยาวขึ้น, ช่างเชื่อมจะต้องปรับระดับหัวเชื่อม เพื่อควบคุมระยะอาร์กให้เหมาะสม; หรือเมื่อเดินหัวเชื่อมเร็ว แต่ส่ายน้อยเกินไป, แนวเชื่อมจะมีขนาดเล็ก, ช่างเชื่อมก็จะต้องลดความเร็วลงและส่ายหัวเชื่อมมากขึ้น; การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ในการเชื่อมเหล่านี้ ช่างเชื่อมจะเป็นผู้ทำทั้งสิ้น แต่ในการเชื่อมโดยใช้ระบบควบคุมแบบอะแดพทีฟ ระบบควบคุมจะทำหน้าที่ปรับเองอย่างอัตโนมัติ

ในรูป 1.3 แสดงตารางเปรียบเทียบวิธีการเชื่อมอาร์กแต่ละอย่าง

1.7 กรรมวิธีเชื่อม (Welding Procedure)

กรรมวิธีเชื่อม หรือ Welding Procedure คือ *"รายละเอียดของวิธีการ หรือ ปฏิบัติการ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตงานเชื่อม"* รายละเอียดนี้รวมไปถึง การกำหนดค่า (หรือ ช่วงของค่า) พารามิเตอร์ต่างๆของกระบวนการเชื่อมที่ใช้ด้วย ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ นอกจากจะมีความสำคัญต่อการปฏิบัติงานของช่างเชื่อมแล้ว บุคคลอื่นที่จำเป็นต้องทราบและใช้ประโยชน์ก็คือ ผู้ออกแบบ, ผู้ตรวจสอบ, และผู้ดูแลงานเชื่อม

การกำหนดกรรมวิธีเชื่อมมีวัตถุประสงค์ เพื่อ:-

(1) ให้การปฏิบัติงานเชื่อมเป็นไปตามข้อกำหนด หรือ มาตรฐานอย่างใดอย่างหนึ่ง;

(2) ควบคุมการบิดตัว ซึ่งจะทำให้ขนาดต่างๆของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลง;

(3) ลดความเค้นตกค้าง(residual stresses);

(4) ให้ความเสียหายที่เกิดจากความเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยา เกิดขึ้นน้อยที่สุด;

(5) ให้ได้ชิ้นงานเชื่อมเหมือนๆกัน

ข้อกำหนดของกรรมวิธีเชื่อม เป็นเอกสารที่เรียกกันว่า "Welding Procedure Specifications" หรือ WPS ซึ่ง งานแต่ละงาน หรือโลหะแต่ละอย่าง อาจมีรายละเอียดเฉพาะ แตกต่างกัน แต่ WPS สำหรับงานเชื่อมทุกชนิดจะมีองค์ประกอบเหมือนกัน คือ :-

(1) ส่วนที่อธิบายรายละเอียดของวิธีการเชื่อม (เชื่อมอย่างไร?)

(2) แบบ(drawings) หรือ ภาพสเก็ตช์ (sketches) ของรอยต่อ และวิธีเตรียมรอยต่อ

(3) แสดงลำดับการก่อตัวของแนวเชื่อม (ในกรณีของการเชื่อมหลายแนว –multiple pass)

ในส่วนของตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่เกี่ยวของกับการเชื่อม แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มแรกเป็น **ตัวแปรที่จำเป็น** หมายถึงตัวแปรที่ต้องกำหนดตามมาตรฐานอย่างใดอย่างหนึ่ง ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรชนิดนี้ จะต้องทำการทดสอบกรรมวิธีเชื่อมใหม่ และรับรองผลที่เกิดขึ้นว่า เป็นที่ยอมรับได้; กลุ่มที่สองเป็น **ตัวแปรที่ไม่จำเป็น** หมายถึงมีความสำคัญน้อย และอาจเปลี่ยนแปลงภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

โดยทั่วไปตัวแปรที่จำเป็นได้แก่:- (1) กระบวนการเชื่อม และความเบี่ยงเบนของกระบวนการเชื่อม; (2) วิธีการใช้กระบวนการเชื่อม; (3) ชนิดของโลหะ ข้อกำหนด(specifications) และส่วนผสม; (4) รูปร่างของโลหะ โดยเฉพาะความหนา; (5) การให้ความร้อนชิ้นงานก่อนหรือหลังการเชื่อม; (6) ท่าเชื่อม; (7) โลหะเติมหรือวัสดุสิ้นเปลืองอื่นๆ; (8) การออกแบบรอยต่อ; (9) กระแสไฟฟ้าหรือตัวแปรการใช้งานที่เกี่ยวข้อง; (10) เทคนิคการเชื่อม.

ข้อกำหนดบางอย่างและตัวแปรอื่นๆ เช่น:- (1) ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม; (2) ทิศทางการเดินแนว(ขึ้นหรือลง); (3) ขนาดของอีเล็คโทรด หรือ โลหะเติม; (4) การใช้และชนิดของแผ่นประกบหลังแนวเชื่อม

ที่มา: Howard B. Cary, Modern Welding Technology, 4th Edition, ??