

บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น



2.1 โลหะผสม SCM 415

โลหะผสม SCM 415 จัดเป็นกลุ่มเหล็กกล้าผสมโครเมียมและโมลิบดีนัม ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของ SCM 415 ได้แก่ โครเมียม และโมลิบดีนัม ซึ่งส่งผลให้ความเหนียวและทนต่อแรงดึงได้ดี ปริมาณส่วนประกอบทางเคมีดังที่แสดงในตารางที่ 2.1 สำหรับการใช้งานชิ้นงาน SCM 415 จำเป็นต้องผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment) เพื่อปรับปรุงสมบัติก่อนนำไปใช้งาน โดยเงื่อนไขกรรมวิธีทางร้อนแสดงในตารางที่ 2.2 และความสมบัติทางกลมาตรฐานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน แสดงดังในตารางที่ 2.3 แต่เนื่องจาก SCM 415 มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ทำให้เหมาะสำหรับการนำมาเพิ่มปริมาณคาร์บอนด้วยวิธีการบูโรไนซิ่ง เพื่อปรับปรุงให้มีความต้านทานการเสียดสี ด้วยสมบัติดังกล่าวเหล็กกล้าผสม SCM 415 จึงเป็นที่นิยมสำหรับชิ้นงานที่ต้องการความต้านทานการเสียดสีสูง เช่น เฟือง, เพลา, ลิ้ม, ท่อ และสกรู เป็นต้น และจากลักษณะการใช้งานผลิตภัณฑ์บางส่วน ของ SCM 415 ที่มีขนาดเล็กและมีรูปร่างซับซ้อน ทำให้การขึ้นรูปด้วยโลหะผงจึงกลายเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการผลิต

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าผสม SCM 415⁽¹⁾

ส่วนประกอบทางเคมี (%)						
C	Cr	Mo	Mn	P	Si	S
0.13 - 0.18	0.90 - 1.20	0.15 - 0.30	0.60 - 0.85	< 0.03	0.15 - 0.35	< 0.03

ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กกล้าผสม SCM 415⁽¹⁾

กรรมวิธีทางความร้อน	อุณหภูมิ (°C)	การหล่อเย็น
Normalizing	850 – 900	อากาศ
Annealing	850	เย็นในเตา
Hardening	850 – 900	น้ำมัน
Tempering	150 - 200	อากาศ

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าผสม SCM415 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน⁽¹⁾

ความต้านทานแรงดึง (kgf/mm ²)	การยืดตัว (%)	ความแข็งหลังการอบคืนตัว (HB)
85	มากกว่า 16	235 - 321

ธาตุองค์ประกอบสำคัญของ SCM 415 มีบทบาทต่อเหล็กกล้าดังต่อไปนี้⁽²⁾

- โครเมียม (Chromium, Cr) เพิ่มเสถียรภาพให้เฟสเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ส่งผลให้ความต้านทานต่อการกัดสีและแรงกระแทกสูงขึ้น เพิ่มความต้านทานต่อการสึกกร่อน สามารถเกิดเป็นออกไซด์ (Oxide) และคาร์ไบด์ (Carbide) เพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) และสาเหตุในการหดตัวของเหล็กกล้าเมื่อทำการชุบน้ำ
- โมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo) เพิ่มเสถียรภาพให้เฟสเฟอร์ไรท์ เมื่อใช้ร่วมกับโครเมียม และแมงกานีส จะเพิ่มความแข็งแรงและความเหนียวแก่เหล็กกล้า สามารถเกิดเป็นคาร์ไบด์ที่แข็งแรง ทำให้เกิดความแข็งครั้งที่ 2 (Secondary Hardening) ระหว่างการอบให้ความร้อน มีแนวโน้มทำให้สูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ง่าย จึงมักเติมซิลิกอนเพื่อปรับปรุงข้อบกพร่องนี้
- แมงกานีส (Manganese, Mn) สามารถดึงกำมะถันมารวมตัวเป็นแมงกานีสซัลไฟด์ (Manganese sulphide) เพื่อไม่ให้กำมะถันรวมตัวกับเหล็ก ซึ่งทำให้สูญเสียความเหนียว และเมื่อใช้ร่วมกับโครเมียม และโมลิบดีนัม ช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กกล้า อย่างไรก็ตามการใช้แมงกานีสเพียงลำพังมีข้อเสียคือ จะเปราะหลังจากอบคืนตัว (Tempering) ในช่วงอุณหภูมิ 400-600 °C
- ซิลิกอน (Silicon, Si) เป็นธาตุผสมจะมีบทบาทช่วยให้คาร์บอนรวมตัวเป็นกราฟไฟต์ ธาตุนี้มักใช้ร่วมกับโมลิบดีนัม หรือ วานาเดียม ช่วยลดการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ที่อุณหภูมิสูง ช่วยให้ชุบแข็งง่ายขึ้น และช่วยให้คงความแข็งไว้ได้ดีในขณะอบคืนตัว (Tempering)

2.2 กระบวนการอัดขึ้นรูปวัสดุผง

กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะผง ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ประกอบด้วย การผสม, การอัดขึ้นรูป, การกำจัดสารเติมแต่ง และการเผาพูนึก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

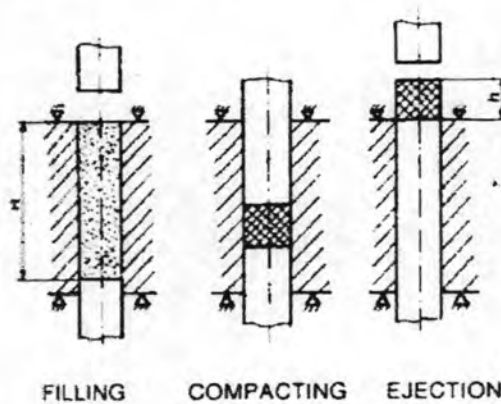
2.2.1 การผสม⁽³⁾

เป็นการผสมผงโลหะกับสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่าง ๆ ให้ผสมกันสม่ำเสมอ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สารเติมแต่ง 2 ชนิด ได้แก่ Zinc stearate ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นใส่ปริมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และ ผงกราไฟต์ ทำหน้าที่เป็นธาตุผสม (Alloy Element) ใส่ปริมาณร้อยละ 0.2 และ 0.3 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการผสมได้แก่ คุณภาพของของผสม, การชั่งน้ำหนัก, ประเภทของเครื่องผสม, ปริมาณการผสม, ความเร็วในการผสม และเวลาในการผสม

2.2.2 การอัดขึ้นรูป⁽³⁾

การอัดขึ้นรูปวัสดุผง เหมาะสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก รูปร่างไม่ซับซ้อนนัก เนื่องจากหากชิ้นงานมีขนาดใหญ่เกินไป จำเป็นต้องใช้แรงกดสูงซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน และความหนาแน่นกรีน (Green Density) ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้สมบัติโดยรวมของชิ้นงานหลังการเผาผนึกไม่ดี นอกจากนี้หากชิ้นงานมีความซับซ้อนมากเกินไปการอัดขึ้นรูปอาจไม่สมบูรณ์ และไม่มี ความสม่ำเสมอของความหนาแน่นกรีนเช่นกัน ซึ่งกระบวนการอัดขึ้นรูปวัสดุผงเป็นชิ้นงานกรีน แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังในรูปที่ 2.1

1. การเติมผง (Filling) โดยการเติมวัสดุผงลงในแม่พิมพ์ ตามปริมาณที่คำนวณไว้
2. การอัด (Compacting) เป็นจังหวะที่กระบอกอัดกดลงบนแม่พิมพ์ และกดทับไว้ช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อทำการขึ้นรูป
3. การถอดชิ้นงาน (Ejection) เมื่อชิ้นงานคงรูปแล้วจึงทำการถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปวัสดุผง⁽³⁾

2.2.3 การกำจัดสารเคมีแต่ง⁽⁴⁾

ก่อนเริ่มการเผาผนึก จำเป็นต้องกำจัดสารเคมีแต่งต่าง ๆ ที่ใส่เข้าไปในชั้นดิน เช่น สารหล่อลื่น หรือตัวประสาน เป็นต้น เพื่อให้เหลือเพียงเนื้อวัสดุ ซึ่งการกำจัดสารเคมีแต่ง แบ่งเป็น 2 วิธี ได้แก่ การกำจัดโดยสารละลาย (Solvent Debinding) และ การกำจัดโดยความร้อน (Thermal Debinding) แต่สำหรับชิ้นงานซึ่งผลิตจากกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยทั่วไปมีปริมาณสารเคมีแต่งอยู่น้อย จึงสามารถใช้เพียงวิธีการกำจัดโดยความร้อน โดยการเผาในอุณหภูมิที่สามารถทำให้สารเคมีแต่งสลายตัวได้ โดยชิ้นงานที่กำจัดสารเคมีแต่งแล้วเรียกว่าชิ้นงานบราวด์ ซึ่งพร้อมสำหรับการเผาผนึกต่อไป

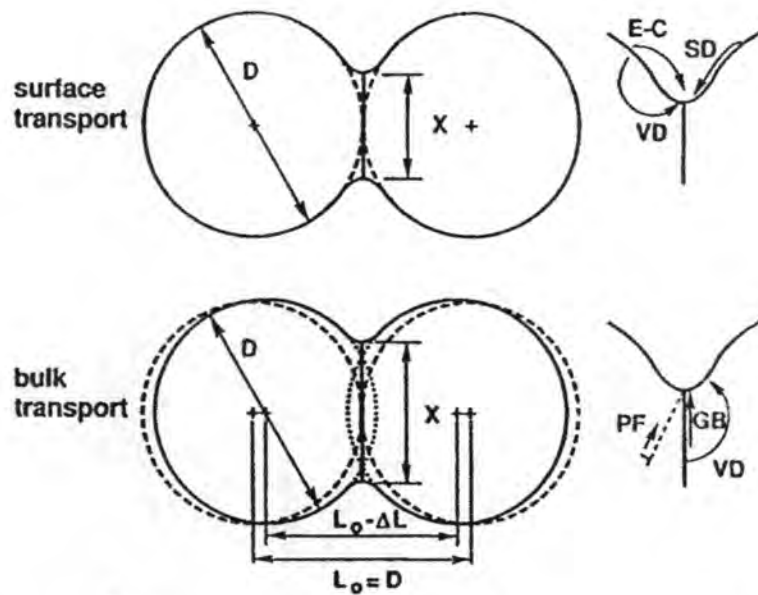
2.2.4 การเผาผนึก^(4,5,6,7)

การเผาผนึก⁽⁵⁾ คือการทำให้อนุภาคเชื่อมติดกันที่อุณหภูมิสูง โดยการเคลื่อนที่ของอะตอม ซึ่งการเชื่อมกันของอนุภาคเป็นการลดพลังงานพื้นผิวที่สูงของผงวัสดุ ปริมาณพลังงานพื้นผิวต่อหน่วยปริมาตรขึ้นอยู่กับส่วนกลับของขนาดอนุภาค และการประเมินพลังงานพื้นผิวประเมินจากพื้นที่ผิวของอนุภาค ดังนั้นอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าจึงมีพลังงานพื้นผิวมากกว่าทำให้ใช้เวลาในการเผาผนึกเร็วกว่า นอกจากนี้ในกรณีของแข็งที่มีลักษณะเป็นผลึกดังเช่นผงโลหะ พบว่าบริเวณสัมผัสระหว่างอนุภาคจะกลายเป็นขอบเกรน

ในทางปฏิบัติการเผาผนึกเป็นกระบวนการอบชิ้นงานกรีน ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุในบรรยากาศที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซอาร์กอน หรือสุญญากาศ (Vacuum) เป็นต้น เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ เมื่อผ่านการเผาผนึก ผิวนุภาควัสดุผงจะหลอมเหลวและเชื่อมติดกันทำให้ปริมาตรพูนลดลง ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรง และเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

2.2.4.1 กลไกการเผาผนึก^(5,6)

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขณะเผาผนึก มีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขนาดของคอลลอยด์ โดยขึ้นกับกลไกการเคลื่อนที่ (Transport Mechanism) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกระบวนการแพร่ที่สามารถกระตุ้นได้ด้วยความร้อน กลไกการเคลื่อนที่เป็นตัวกำหนดการไหลของมวลที่เกิดขึ้นตามแรงขับ กลไกการเคลื่อนที่แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การเคลื่อนที่ตามพื้นผิว (Surface transport) และการเคลื่อนที่แบบมวลรวม (Bulk transport) ทั้ง 2 กลไกประกอบด้วยกลไกระดับอะตอมที่สนับสนุนให้เกิดการไหลของมวล ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 โดย E-C คือ การระเหย-การควบแน่น, SD คือ การแพร่ตามพื้นผิว, VD คือ การแพร่ในเนื้อวัสดุ, PF คือ การไหลแบบพลาสติก และ GB คือ การแพร่ตามขอบเกรน



รูปที่ 2.2 แบบจำลองกลไกการเคลื่อนที่ของขอบเกรนในอนุภาคทรงกลม⁽⁶⁾

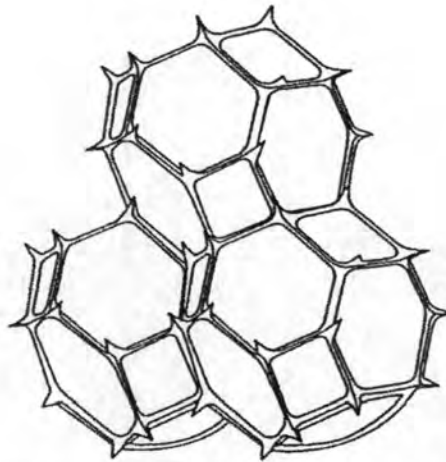
การเคลื่อนที่ตามพื้นผิวเกิดขึ้นในการเพิ่มขนาดของคอลลอยด์ โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงระยะต่าง ๆ ภายในอนุภาค กล่าวคือ ไม่มีการหดตัวและไม่มีการแน่นตัวเกิดขึ้น ทั้งที่เนื่องจากการไหลของมวลเริ่มต้นและสิ้นสุดที่พื้นผิวของอนุภาค ในขณะที่เคลื่อนที่ที่ควบคุมโดยการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวมีกระบวนการสำคัญสองกระบวนการที่เกิดขึ้นขณะเคลื่อนที่ คือ การแพร่ตามพื้นผิวและการระเหย-การควบแน่น การแพร่ตามพื้นผิวมีความสำคัญในการเคลื่อนที่โลหะหลายชนิดที่อุณหภูมิต่ำ รวมทั้งการเคลื่อนที่เหล็กด้วย ส่วนการระเหย-การควบแน่นไม่เกิดที่อุณหภูมิต่ำ แต่มีความสำคัญต่อการเคลื่อนที่โลหะที่มีความเสถียรต่ำ เช่น ตะกั่ว เป็นต้น

การเคลื่อนที่มวลรวมทำให้เกิดการหดตัว มวลเริ่มต้นเคลื่อนที่จากภายในอนุภาคและสิ้นสุดที่คอลลอยด์ กลไกการเคลื่อนที่แบบมวลรวมคือการแพร่ในเนื้อวัสดุ การแพร่ตามขอบเกรน การไหลแบบพลาสติก และการไหลแบบหนืด สำหรับการไหลแบบพลาสติกมีความสำคัญในช่วงเริ่มให้ความร้อน โดยเฉพาะผงที่ผ่านการอัดทำให้มีความหนาแน่นของดิสโลเคชันสูง โดยทั่วไปความเค้นของแรงดึงผิวไม่เพียงพอที่จะสร้างดิสโลเคชันขึ้นมาใหม่ ดังนั้นดิสโลเคชันถูกบดอัดจากการให้ความร้อน ให้เคลื่อนออกจากผนังอนุภาค บทบาทของการไหลแบบพลาสติกจึงลดลง ในทางตรงข้ามสำหรับวัสดุอสัณฐาน เช่น แก้วและพลาสติก การเคลื่อนที่โดยการไหลแบบหนืดที่อัตราการรวมตัวกันของอนุภาคขึ้นกับขนาดของอนุภาคและความหนืดของวัสดุ โลหะสามารถเคลื่อนที่โดยการไหลแบบหนืดได้เช่นกัน ถ้ามีเฟสของเหลวเกิดขึ้นตามขอบเกรน การแพร่ตามขอบเกรนมีความสำคัญบ้างสำหรับการแน่นตัวในวัสดุที่เป็นผลึก และมีความสำคัญมากในการแน่นตัวของโลหะทั่วไป ทั้งกระบวนการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวและการเคลื่อนที่มวลรวมทำให้คอลลอยด์มีการเพิ่มขนาด แต่ความแตกต่างที่สำคัญอยู่ที่ความหนาแน่นและการหดตัว ระหว่างการเคลื่อนที่ โดยทั่วไปกระบวนการเคลื่อนที่แบบมวลรวมมีความสำคัญมากขึ้นที่อุณหภูมิสูง

2.2.4.2 ขั้นตอนการเผาผนึก^(4,5,6,7)

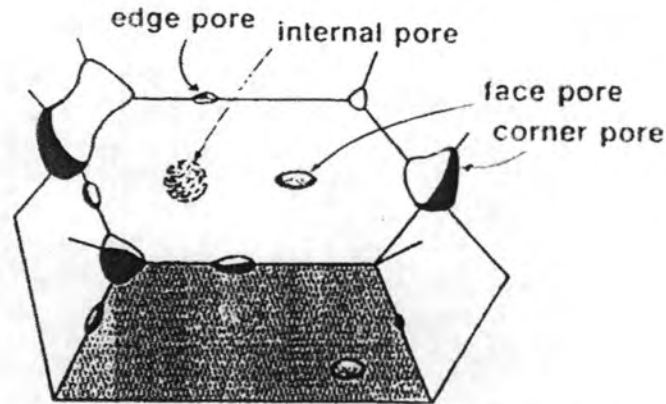
- ขั้นตอนแรก (Initial stage) บริเวณจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคเริ่มเกิดเป็นคอคอด โดยอัตราส่วนขนาดคอคอดสัมผัส ไม่เกิน 0.3 มีการลดลงของพื้นที่ผิว แต่อาจเกิดหรือไม่เกิดการหดตัวก็ได้ ลักษณะรูพรุนภายในยังเป็นช่องว่างต่อเนื่องแบบเปิด และมีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ

- ขั้นตอนกลาง (Intermediate stage) เป็นขั้นตอนที่กำหนดสมบัติของชิ้นงานหลังการเผาผนึก เกิดจากการแพร่ในเนื้อวัสดุและการแพร่ตามขอบเกรน รูพรุนที่อยู่บนขอบเกรนจะหายไปเร็วกว่ารูพรุนที่อยู่ตามลำพัง และรูพรุนจะมีลักษณะมนขึ้นแล้วไปรวมกับขอบเกรนขณะที่เกรนโต จนกระทั่งรูพรุนมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเชื่อมต่อกัน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างตาข่ายรูพรุนในขั้นตอนกลางของการเผาผนึก⁽⁶⁾

- ขั้นตอนที่สุดท้าย (Final stage) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นช้าที่สุด เพราะรูพรุนทรงกลมที่แยกจากกันเกิดจากการหดตัวด้วยกลไกการแพร่มวลรวม รูพรุนแยกกันอยู่ตามขอบเกรน ซึ่งลักษณะนี้ทำให้สมดุลระหว่างพลังงานขอบเกรนและพลังงานพื้นผิวของเฟสของแข็ง-ไอ เกิดเป็นร่องเรียกว่า มุมสองหน้า (Dihedral angle) รูพรุนที่อยู่ตามขอบเกรนจะมีรูปร่างเหมือนเลนส์นูนสองด้านประกบกัน ส่วนรูพรุนที่อยู่ตามมุมเกรนมีลักษณะมนหลายเหลี่ยม และเมื่อรูพรุนแยกตัวออกจากขอบเกรนจะมีรูปร่างเป็นทรงกลม ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปร่างรูพรุนในการเผาผนึกตามตำแหน่งของรูพรุน⁽⁷⁾

2.2.4.3 การวัดปริมาณการเผาผนึก^(5,6)

การวัดปริมาณการเผาผนึก ทำโดยการตั้งค่าตัวแปรขึ้นมาเพื่อวัดปริมาณซึ่งมีอยู่หลายค่า โดยตัวแปรที่นิยมใช้ได้แก่ อัตราส่วนขนาดคอคอดคัมพัทธ์ ซึ่งคือค่าเส้นศูนย์กลางคอคอดหารด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค และ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิว ซึ่งคือพื้นที่ผิวที่เปลี่ยนแปลงหารด้วยพื้นที่ผิวเริ่มต้น นอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่น ๆ อีก เช่น

- ตัวแปรการแน่นตัว (Densification parameter, ψ) คือ การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเนื่องจากการเผาผนึกหารด้วยการเปลี่ยนแปลงที่จำเป็นเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ปราศจากรูพรุน ดังสมการที่ 2.1

$$\psi = \frac{(\rho_s - \rho_g)}{(\rho_T - \rho_g)} \quad \dots (2.1)$$

เมื่อ ψ คือ ตัวแปรการแน่นตัว

ρ_s คือ ความหนาแน่นหลังการเผาผนึก (g/cm^3)

ρ_g คือ ความหนาแน่นกรีน (g/cm^3)

ρ_T คือ ความหนาแน่นทางทฤษฎี (g/cm^3)

- การหดตัว คือ การเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นงานหลังเผาผนึกหารด้วยความยาวก่อนการเผาผนึก นอกจากนี้ยังสามารถนำค่าการหดตัวมาคำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการเผาผนึกได้จากสมการ 2.2

$$\rho_s = \frac{\rho_G}{\left(1 - \frac{\Delta L}{L_0}\right)^3} \quad \dots (2.2)$$

เมื่อ ρ_s คือ ความหนาแน่นหลังการเผาผนึก (g/cm^3)

ρ_G คือ ความหนาแน่นกรีน (g/cm^3)

ΔL คือ การเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นงานหลังเผาผนึก (mm)

L_0 คือ ความยาวก่อนการเผาผนึก (mm)

2.3 ปัจจัยในการอัดขึ้นรูปที่มีอิทธิพลต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน

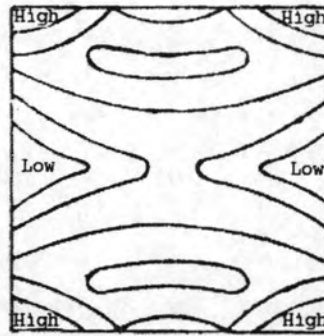
2.3.1 อิทธิพลของขนาดและรูปร่างอนุภาค^(5,8)

ขนาดของอนุภาคมีผลกระทบต่อแรงเสียดทาน (Friction) ระหว่างอนุภาค, ความหนาแน่นจากการจัดเรียงตัวและขนาดรูพรุน อนุภาคขนาดเล็กทำให้มีความยุ่งยากในการอัดเป็นเพราะรูพรุนขนาดใหญ่ยุบตัวภายใต้ความดันต่ำกว่ารูพรุนขนาดเล็ก และการเกิดเวิร์กฮาร์ดเคนนิง (Work Hardening) ในอนุภาคขนาดใหญ่ช้ากว่า เนื่องจากระยะห่างของการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันกว้างกว่า ดังนั้นอัตราการแน่นตัวตามความดันของผงขนาดใหญ่จึงดีกว่าผงขนาดเล็ก

ผงที่มีความพรุนภายในและรูปร่างอนุภาคคล้ายฟองน้ำ มีการยุบตัวของรูพรุนขนาดใหญ่ระหว่างอนุภาคทำให้เกิดการเริ่มต้นของการอัดแน่น ด้วยเหตุนี้ผงประเภทนี้จึงมีความสามารถในการอัดเริ่มต้นสูง แต่รูพรุนขนาดเล็กภายในจะขัดขวางการอัดเพื่อให้ได้ความหนาแน่นสุดท้ายสูง และทำให้เกิดแรงคืดกลับในขั้นตอนการเอาชิ้นงานออกสูง และมีผลทำให้เกิดการแตกร้าวได้

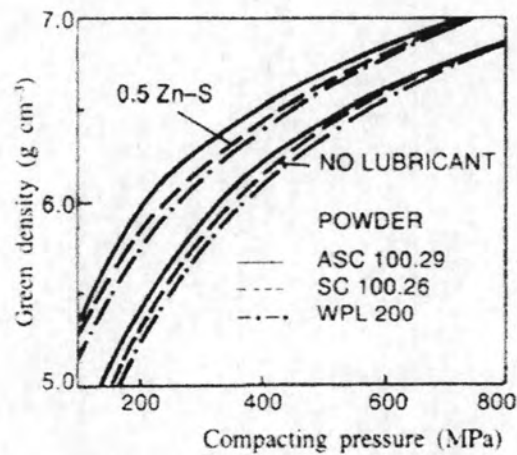
2.3.2 อิทธิพลของสารหล่อลื่น^(3,9)

การสูญเสียพลังงานในขั้นตอนการอัดขึ้นรูปส่วนใหญ่ เกิดจากแรงเสียดทานในขณะอัด ซึ่งแรงเสียดทานในขณะอัดเกิดขึ้นในหลายตำแหน่งได้แก่ แรงเสียดทานระหว่างกระบอกอัด (Punch) กับผนังแม่พิมพ์ (Die wall), แรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานกรีนกับผนังแม่พิมพ์ขณะถอดชิ้นงาน, แรงเสียดทานระหว่างผง และแรงเสียดทานระหว่างผงกับผนังแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นกรีน อันเป็นสาเหตุหลักต่อความเสียหายของชิ้นงานในขั้นตอนการเผาผนึก รวมไปถึงอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ โดยแบบจำลองการกระจายตัวความหนาแน่น แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การกระจายตัวของความหนาแน่นกรีนจากการอัดขึ้นรูป⁽³⁾

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการเติมสารหล่อลื่น ลงไปในวัสดุผงเพื่อลดแรงเสียดทาน ส่งผลให้การกระจายตัวของความหนาแน่นแคบลง และความหนาแน่นกรีนเพิ่มสูงขึ้นที่แรงกดเท่ากัน ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.6 ซึ่งสารที่นิยมนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นมักมีจุดหลอมเหลวต่ำในช่วง 100 – 200 °C เช่น กรดไขมัน (Stearic acid) และเกลือ (Stearate) ของ ลิเทียม (Lithium, Li), อลูมิเนียม (Aluminum, Al), แคลเซียม (Calcium, Ca) และสังกะสี (Zinc, Zn) เป็นต้น โดยนิยมผสมสารหล่อลื่นในปริมาณร้อยละ 1 – 2 โดยน้ำหนัก



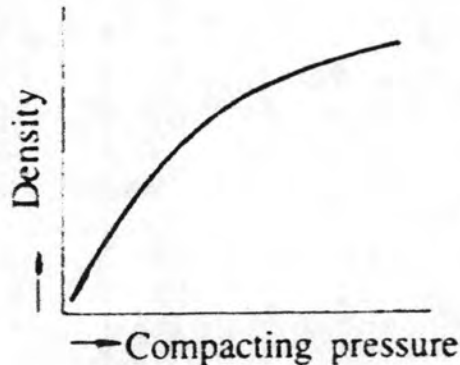
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับแรงกด ของวัสดุผงที่ผสมและไม่ผสมสารหล่อลื่น⁽⁹⁾

2.3.3 อิทธิพลของแรงกดในการอัดขึ้นรูป⁽⁹⁾

แรงกดในขั้นตอนการอัดขึ้นรูป มีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมความหนาแน่นกรีน โดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกรีนกับความดันอัด (Compacting pressure) แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อแรงกดเพิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นกรีน สูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ก่อนที่ความหนาแน่นจะคงที่ เพราะหากเพิ่มแรงกดมากไปกว่านั้นอาจเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน และอาจเกิดความเสียหายกับชิ้นงานกรีน แล้วเนื่องจากความหนาแน่นแปรผกผันกับปริมาณรูพรุน จึงสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุน กับความดันอัด ได้ดังสมการที่ 2.3

$$P = P_0 \exp(-Kp^n) \quad \dots (2.3)$$

- เมื่อ P คือ ปริมาตรรูพรุนของชิ้นงานกรีน (%)
 P_0 คือ ปริมาตรรูพรุนของวัสดุผงที่อยู่กันอย่างหลวม ๆ (%)
 p คือ ความดันอัด (MPa)
 K คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงรูพรุน มีค่าประมาณ $1/\text{yield strength (MPa}^{-1})$
 n คือ strain hardening exponent



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกรีนกับความดันอัด⁽⁹⁾

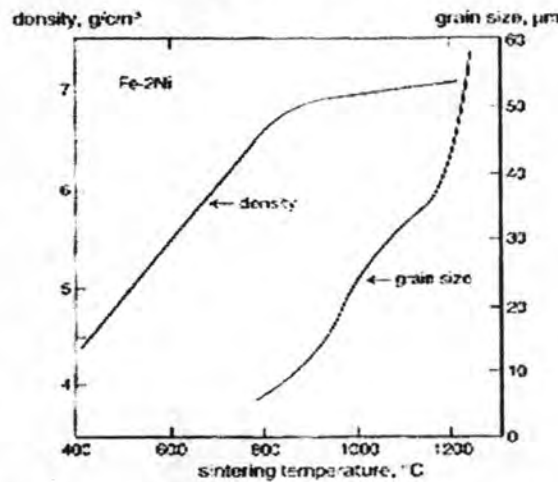
2.4 ปัจจัยในการเผาผลาญที่มีอิทธิพลต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน

2.4.1 อิทธิพลของการอัดขึ้นรูป^(5,8)

การอัดเป็นการลดความพรุนและเพิ่มปริมาณดิสโลเคชันเข้าไปในผงโลหะ โดยปกติชิ้นที่มีความพรุนต่ำการหดตัวขณะเผาผลาญจึงน้อยกว่าชิ้นงานที่มีความพรุนสูง นอกจากนี้ความหนาแน่นของดิสโลเคชันสูงกว่าช่วยให้อัตราการอบผนึกเริ่มต้นเร็วกว่า

2.4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาการเผาผนึก^(4,9)

อุณหภูมิการเผาผนึกอยู่ในช่วง 70 – 80% ของอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุผงแต่ละชนิด การให้ความร้อนในการเผาผนึก ถ้าอุณหภูมิสูง อะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้ดีจึงทำให้อนุภาคเชื่อมติดกันได้ง่าย และรวดเร็ว รวมไปถึงการโตของเกรนเป็นไปอย่างรวดเร็วเช่นกัน ส่งผลให้มีความหนาแน่นสูงตามไปด้วย ดังที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและขนาดเกรนกับอุณหภูมิเผาผนึก ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและขนาดเกรนกับอุณหภูมิเผาผนึก⁽⁴⁾

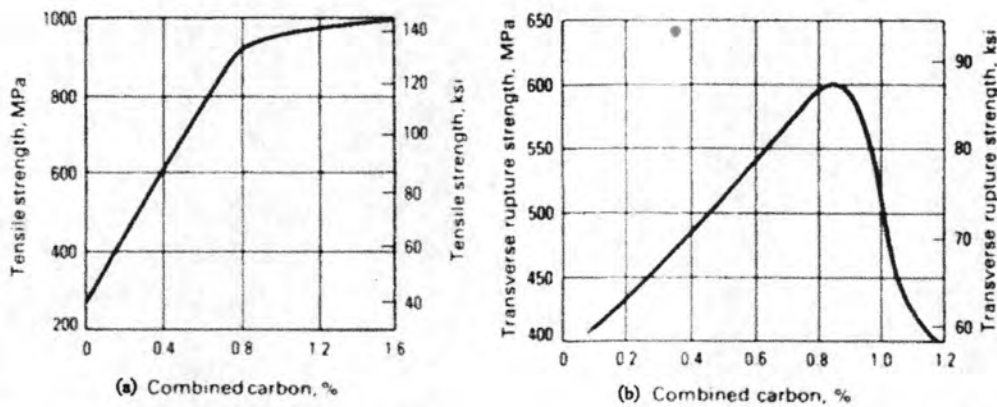
เวลาการเผาผนึก ส่งผลกับสมบัติทางกลของชิ้นงานโดยตรง หากเวลาน้อยเกินไปอนุภาคของวัสดุผงจะเชื่อมติดกันไม่สมบูรณ์ และหากเวลานานเกินไปอาจเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างและขนาดเกรนใหญ่เกินไป ส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานไม่ดี ซึ่งเวลาการเผาผนึก ในชิ้นงานแต่ละประเภทไม่เหมือนกัน โดยมีปัจจัยสำคัญดังต่อไปนี้

- รูปร่างชิ้นงาน หากชิ้นงานมีขนาดใหญ่ จำเป็นต้องใช้เวลาเผาผนึกเพิ่มมากขึ้น แต่หากชิ้นงานมีทั้งส่วนบางและหนาต่างกันมาก ๆ อาจส่งผลให้โครงสร้างภายในของทั้งสองตำแหน่งแตกต่างกัน
- อุณหภูมิเผาผนึก หากใช้อุณหภูมิเผาผนึกสูง เวลาในการเผาผนึกต่ำลง เพราะหากใช้เวลานานเกินไป อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และเกรนมีขนาดใหญ่เกินไป
- ขนาดอนุภาคของวัสดุผง ถ้าวัสดุผงมีขนาดอนุภาคเล็ก ทำให้มีพื้นที่ผิวมาก และพลังพื้นผิวสูง ส่งผลให้ใช้เวลาในการเผาผนึกน้อยกว่าวัสดุผงที่มีขนาดอนุภาคใหญ่

ตัวอย่างงานวิจัยของ Hwan-Jin Sung, Tae Kwon Ha, Sangho Ahn และ Young Won Chag⁽¹⁰⁾ การเผาผนึกโลหะผง 17-4 PH ที่อุณหภูมิ 900 - 1350 °C พบว่าที่ 1350 °C ขนาดเกรนใหญ่ที่สุด และมีสมบัติทางกลสูงกว่าอุณหภูมิการเผาผนึกอื่น ๆ

2.4.3 อิทธิพลของปริมาณคาร์บอน⁽¹¹⁾

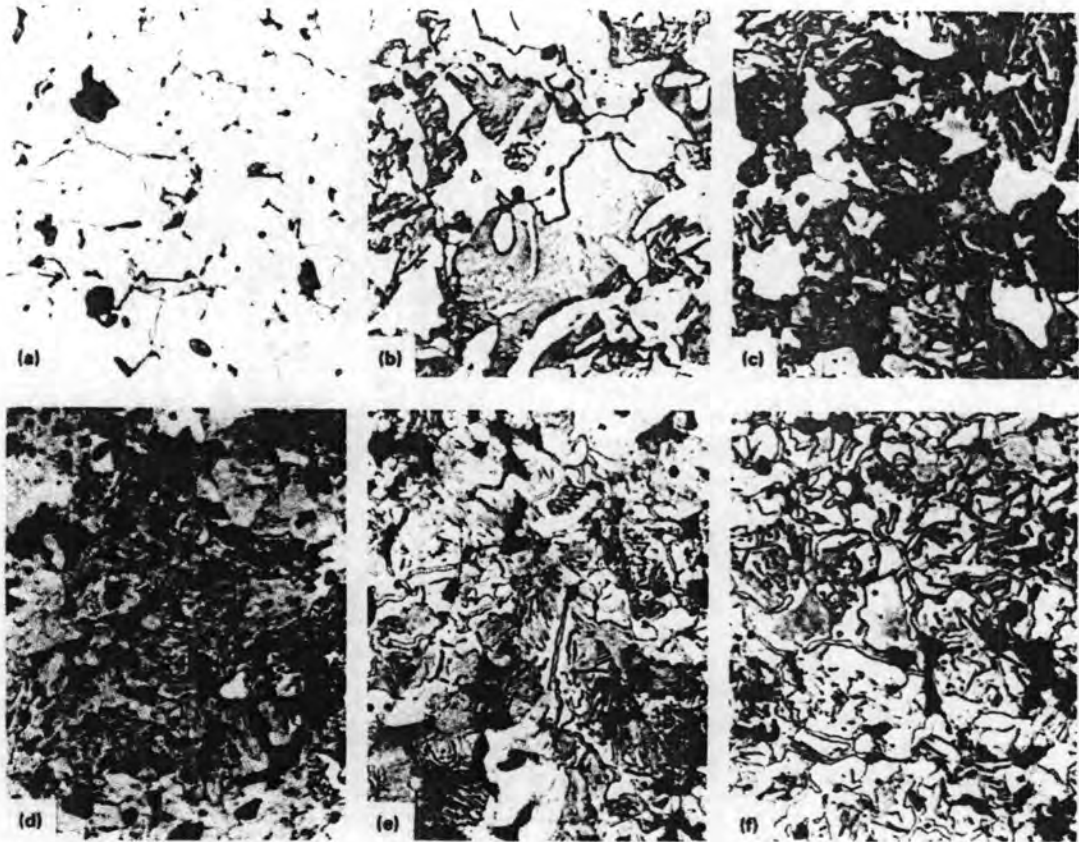
ผลของปริมาณคาร์บอน ต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้า แสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9 สำหรับชิ้นงานจากกระบวนการรีด ค่า transverse rupture strength เพิ่มขึ้นอย่างมาก จนถึง 0.8% อัตราการเพิ่มขึ้นกลับลดต่ำลง แต่ในทางตรงข้ามชิ้นงานจากกระบวนการ โลหะผง ค่า transverse rupture strength กลับลดต่ำลง เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มสูงกว่า 0.85%



รูปที่ 2.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า transverse rupture strength กับปริมาณคาร์บอน⁽¹¹⁾

(a) ชิ้นงานจากกระบวนการรีด (b) ชิ้นงานจากกระบวนการ โลหะผง

เหตุผลที่เป็นเช่นนั้น เพราะปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณเพิร์ไลต์ (Pearlite) ในชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรง และความแข็งเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มสูงกว่า 0.85% เริ่มเกิดซีเมนต์ไต์ (Cementite) ที่บริเวณขอบเกรน และกลายเป็น โครงข่ายซีเมนต์ไต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ส่งผลให้ค่า transverse rupture strength ลดต่ำลง



รูปที่ 2.10 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนจากกระบวนการโลหะผงที่มีปริมาณคาร์บอนต่าง ๆ⁽¹¹⁾ (a) ประมาณ 0% (b) 0.4% (c) 0.6% (d) 0.8% (e) 1.0% (f) 1.2%

2.4.4 อิทธิพลจากการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว⁽¹²⁾

การสูญเสียคาร์บอนที่ผิว (Decarburization) ในอุณหภูมิสูงเช่น ระหว่างการเผาผืนึก, ชุบแข็งผิว และกรรมวิธีทางความร้อน เป็นต้น ชิ้นงานมีโอกาสสูญเสียคาร์บอนจากการทำปฏิกิริยากับบรรยากาศที่สัมผัสชิ้นงาน สามารถป้องกันหรือลดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ ด้วยการควบคุมบรรยากาศหรือเพิ่มธาตุองค์ประกอบลงในชิ้นงานเช่น ซิลิกอน เป็นต้น

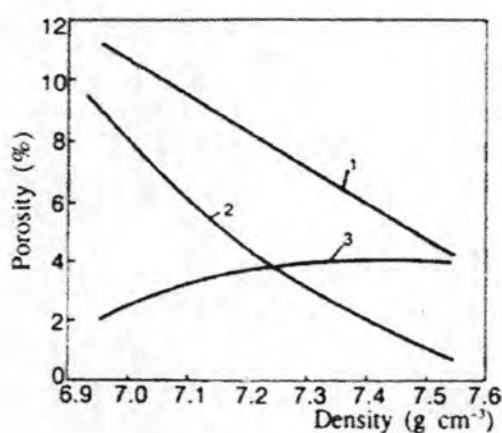
2.5 อิทธิพลของรูพรุนต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานขึ้นรูปวัสดุผง

2.5.1 ประเภทของรูพรุน⁽⁹⁾

การขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุผงย่อมเกิดรูพรุนขึ้นภายในชิ้นงานเสมอ ซึ่งส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง รวมไปถึงส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน โดยหากแบ่งประเภทของรูพรุนตามลักษณะโครงสร้าง สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่

1. รูพรุนเปิด (Open pore) รูพรุนต่อเนื่องกันจนทำให้ของไหล หมุนเวียนถึงกันได้
2. รูพรุนปิด (Close pore) รูพรุนของไม่ต่อเนื่องกัน ของไหลไม่สามารถหมุนเวียนถึงกันได้

อย่างไรก็ดี มักพบรูพรุนในลักษณะผสม กล่าวคือ มีทั้งรูพรุนเปิด และรูพรุนปิดอยู่ร่วมกัน โดยปกติรูพรุนเปิดและอิทธิพลต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานมากกว่ารูพรุนปิด ยกเว้นชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูงกว่า 96% รูพรุนปิดจะมีปริมาณและอิทธิพลต่อชิ้นงานมากกว่า และสามารถแสดงสัมพันธภาพโดยรวมได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกับอิทธิพลของปริมาณรูพรุนต่อความหนาแน่น โดยรูพรุนแบบผสมคือผลรวมของรูพรุนเปิดและปิด



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนกับความหนาแน่น⁽⁹⁾

(1) แบบผสม (2) แบบเปิด (3) แบบปิด

2.5.2 อิทธิพลต่อความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว⁽⁹⁾

ความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวของชิ้นงาน มีแนวโน้มลดต่ำลงในรูปแบบเดียวกัน เมื่อปริมาณรูพรุนเพิ่มสูงขึ้น แล้วเนื่องจากโดยทั่วไปกระบวนการอัดขึ้นรูปชิ้นงานมักมีความหนาแน่นประมาณ 90% ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.10 ความหนาแน่นดังกล่าวชิ้นงานได้รับอิทธิพลจากรูพรุนเปิดมากกว่า ทำให้สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวกับปริมาณรูพรุนได้ในรูปของสมการยกกำลัง ดังในสมการ 2.4 ซึ่งสมการนี้สามารถใช้ได้กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผลิตเดียวกัน เนื่องจากลักษณะของโครงสร้างจุลภาค เช่น ขนาดเกรน และปริมาณแต่ละเฟส เป็นต้น มีส่วนสำคัญในการกำหนดสมบัติทางกลของชิ้นงาน

$$A = A_0 \exp(-kP) \quad \dots (2.4)$$

- เมื่อ A คือ ความต้านทานแรงดึง หรือการยืดตัวของชิ้นงานขึ้นรูปผง
 A_0 คือ ความต้านทานแรงดึง หรือการยืดตัวของชิ้นงานเนื้อแน่น
 k คือ ค่าคงที่จากการทดลอง
 P คือ ปริมาณรูพรุน (%)

2.5.3 อิทธิพลต่อความแข็ง⁽⁹⁾

ความแข็งของชิ้นงาน มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณรูพรุนเพิ่มสูงขึ้น แต่ค่าความแข็งแตกต่างจากความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว ที่ไม่ได้รับอิทธิพลการกระบวนการผลิตและประเภทของรูพรุน โดยขึ้นอยู่กับสมบัติความแข็งของเนื้อพื้น ปริมาณและขนาดรูพรุนเป็นสำคัญ ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับปริมาณรูพรุนได้ดังสมการเส้นตรง ดังในสมการ 2.5

$$H = H_0 - kP \quad \dots (2.5)$$

- เมื่อ H คือ ความแข็งของชิ้นงานขึ้นรูปผง
 H_0 คือ ความแข็งของชิ้นงานเนื้อแน่น
 k คือ ค่าคงที่จากการทดลอง
 P คือ ปริมาณรูพรุน (%)

2.6 การชุบแข็งผิว และกรรมวิธีทางความร้อนภายหลังการชุบแข็งผิว

2.6.1 การชุบแข็งผิวโดยวิธีคาร์บูไรซิง^(2,12)

การชุบแข็งผิว เป็นการชุบแข็งเพื่อให้ได้ความแข็งเฉพาะบริเวณผิวเท่านั้น ส่วนเนื้อชิ้นงานภายใต้ผิวแข็งจนถึงใจกลางจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เพื่อให้ชิ้นงานทนต่อการสึกหรอ และการเสียดสีที่ผิว, ป้องกันการยึดเกาะกับวัสดุอื่นในขณะใช้งาน, เจียรระโนผิวได้เรียบมัน และส่วนแกนกลางชิ้นงานยังคงมีความเหนียวรับแรงได้ดี ทำให้ทนต่อแรงบิด, แรงดึง หรือแรงกระแทกอย่างรุนแรงได้โดยไม่แตกหักง่าย จึงเป็นที่นิยมสำหรับใช้กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพดี ยืดอายุการใช้งาน ตัวอย่างชิ้นงานที่นิยมใช้การชุบแข็งผิวได้แก่ เพลาช้อเหวี่ยง, ก้านช้อเหวี่ยง, เฟือง, แกนสลัก เป็นต้น

เมื่อเหล็กที่ต้องการชุบแข็งผิวหากมีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.2% ซึ่งไม่สามารถทำการชุบให้มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) ได้ ดังนั้นจึงต้องเติมคาร์บอนที่ผิวเสียก่อน จึงสามารถชุบให้กลายเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ได้ วิธีการชุบแข็งผิวด้วยการเพิ่มคาร์บอนนี้ เรียกว่าวิธีการคาร์บูไรซิ่ง โดยการทำคาร์บูไรซิ่ง มีหลายวิธีตามตัวกลางที่ใช้ ได้แก่ ของแข็ง (Solid/Pack Carburizing), ของเหลว (Liquid Carburizing) และ ก๊าซ (Gas Carburizing) เป็นต้น

2.6.1.1 กลไกการแพร่ในกระบวนการคาร์บูไรซิ่ง^(2,12,13)

กลไกการแพร่ในกระบวนการคาร์บูไรซิ่ง ดำเนินตามการกฎข้อที่ 1 ของฟิค (Fick's first law) ดังในสมการที่ 2.6 และสามารถแปลงออกมาเป็นรูปทั่วไปดังในสมการที่ 2.7 เพื่อความสะดวกสำหรับการใช้งานในกรณีกระบวนการคาร์บูไรซิ่ง

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad \dots (2.6)$$

เมื่อ J คือ Molar flux (mol/cm².s)
 D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm²/s)
 C คือ ความเข้มข้น (mol/cm³)
 x คือ ระยะทาง (cm)

$$\frac{C - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad \dots (2.7)$$

เมื่อ C คือ ปริมาณคาร์บอนที่ความลึก x จากผิว (wt%)
 C_0 คือ ปริมาณคาร์บอนเริ่มต้น (wt%)
 C_s คือ ปริมาณคาร์บอนที่ผิว (wt%)
 D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm²/s)
 x คือ ระยะทางลึกจากผิว (cm)
 t คือ เวลา (s)

ในทางปฏิบัติ เพื่อประสิทธิภาพและควบคุมคุณภาพในการทำก๊าซคาร์บูไรซิ่ง นิยมแบ่งช่วงการแพร่ออกเป็น 2 ช่วงได้แก่

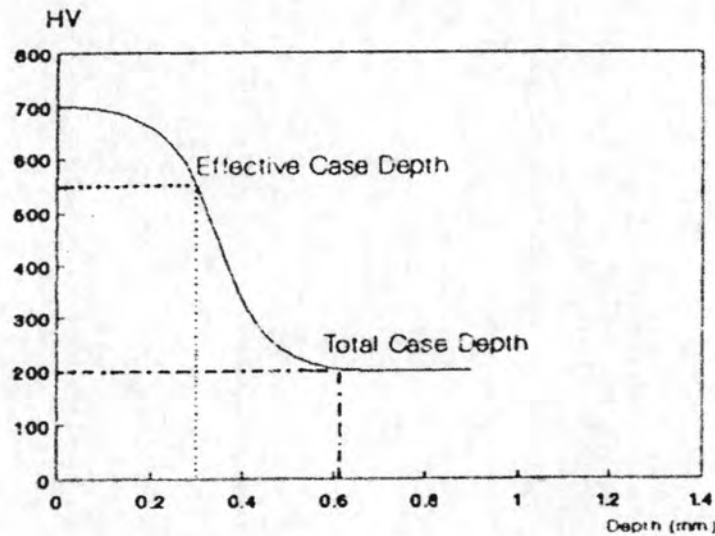
- ช่วงการคาร์บูไรซิ่ง (Carburizing period) เป็นช่วงเริ่มต้นของการทำคาร์บูไรซิ่งด้วยก๊าซบรรยากาศภายในเตาจะมีความเข้มข้นของคาร์บอน (Carbon potential) สูง เพื่อเร่งในคาร์บอนแพร่เข้าไปในชิ้นงาน โดยเร็ว และกระบวนการจะดำเนินไปจนกว่าความเข้มข้นของคาร์บอนเข้าสู่สมดุล

- ช่วงการแพร่ (Diffuse period) เมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนเริ่มเข้าสู่สมดุล ทำการปรับบรรยากาศภายในเตาให้ความเข้มข้นของคาร์บอนต่ำลง เท่ากับความเข้มข้นคาร์บอนสูงสุดในชิ้นงานที่ต้องการ อัตราการแพร่ลดต่ำลงแต่จะได้ชั้นการแพร่ที่สม่ำเสมอ

2.6.1.2 การวัดความหนาของผิวแข็ง⁽²⁾

โดยการวัดความหนาของพื้นผิวที่คาร์บอนแพร่เข้าไป สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 โดยแบ่งออกเป็น 2 ระดับได้แก่

1. Total case depth คือระยะทางที่วัดตั้งฉากจากผิวที่ชุบแข็งแล้ว ถึงจุดที่ไม่มีความแตกต่างทางเคมีกับแกนกลาง
2. Effective case depth คือ ระยะทางที่วัดตั้งฉากจากผิวที่ชุบพื้นผิว จนถึงจุดที่มีค่าความแข็ง 85% ของค่าความแข็งที่ผิว



รูปที่ 2.12 แผนภูมิแสดงระดับการแพร่ของคาร์บอนที่พื้นผิว⁽²⁾

จากงานวิจัยของ นิวัตร มุลปา และ ชายชาญ นาวิกนิเวศ⁽¹⁴⁾ โดยทำ pack carburizing ที่ 950 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง กับ โลหะ SCM415 จากงานรีด โดยไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังทำการชุบไร้ซึ่ง พบว่าพื้นผิวชิ้นงานมีค่าความแข็งสูงสุดประมาณ 800 – 850 HV และมีค่า Total case depth ประมาณ 2 มิลลิเมตร

2.6.2 กรรมวิธีทางความร้อนหลังการทำการชุบไร้ซึ่ง^(2,12)

โดยทั่วไปหลังจากผ่านคาร์บูไรซิ่ง ปริมาณคาร์บอนที่ผิวสูงกว่า 0.8% ซึ่งทำให้เกิดมี ซีเมนต์ไต์ที่ก่อนอุณหภูมิยูเทคตอยด์ปรากฏตามขอบเกรน ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิที่ใช้ทำการชุบไร้ซึ่งมักจะสูง ซึ่งส่งผลให้สูญเสียความเหนียว เพื่อให้ได้เหล็กภายหลังการชุบแข็งมีคุณภาพดี จำเป็นต้องอบชุบหลาย ขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ทำ Normalizing ที่อุณหภูมิ 850 – 900 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงต่อชิ้นงานหนา 25 มิลลิเมตร เพื่อให้เกรนภายในมีความละเอียด ขณะเดียวกันปริมาณคาร์บอนที่ผิวซึ่งสูงกว่า 0.8% จะลดลงโดยการแพร่ซึมของคาร์บอนจากบริเวณผิวเข้าสู่แกนกลาง ทำให้ได้ความเหนียวและควบคุมปริมาณคาร์บอนที่ผิวไปพร้อม ๆ กัน

- ทำการอบชุบที่อุณหภูมิ 760 - 780 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงต่อชิ้นงานหนา 25 มิลลิเมตร เพื่อให้ผิวเป็นออสเทนไนต์ ส่วนแกนกลางยังอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลง แล้วนำมาชุบน้ำ เพื่อให้ออสเทนไนต์ที่ผิวกลายเป็นมาร์เทนไซต์ ส่วนภายในเนื่องจากอัตราการเย็นตัวไม่สูงพอ จะกลายเป็น เบนไนต์ (Bainite) หรือซอร์ไบต์ (Sorbite) แทน

- ทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 150 – 170 °C เพื่อลดความเครียดที่เกิดจากการชุบน้ำและเป็นการเพิ่มความเหนียวให้กับมาร์เทนไซต์

อย่างไรก็ดีในอุตสาหกรรมจริงไม่นิยมทำการอบชุบหลายขั้นตอน เนื่องจากเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานและเพิ่มต้นทุนการผลิต โดยมักทำการชุบเพียงครั้งเดียวจากอุณหภูมิคาร์บูไรซิ่ง หรืออาจลดอุณหภูมิลงมาระดับหนึ่งก่อนจึงชุบ แล้วนำไปอบคืนตัวอีกครั้งหนึ่ง

จากงานวิจัยของ Lee-Der Liu และ Fan-Shiong Chen⁽¹⁵⁾ พบว่าเมื่อทำการชุบไร้ซึ่ง ชิ้นงาน SCM 415 ซึ่งขึ้นรูปด้วยกระบวนการรีด โดยทำการชุบไร้ซึ่งที่อุณหภูมิ 950 °C ทำการอบชุบที่ 840 °C หล่อเย็นด้วยน้ำมัน และอบคืนตัวที่ 180 °C พื้นผิวชิ้นงานมีค่าความแข็งสูงสุดประมาณ 850 – 900 HV และหากทำการชุบเปอร์คาร์บูไรซิ่ง (Super-carburization) 5 รอบ ระยะทางการแพร่ซึมของคาร์บอนเพิ่มขึ้นประมาณ 25%