

บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

การผลิตชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการทางโลหะผง (P/M) มีมานานหลายสิบปีแล้ว^[6] โดยทางฝั่งอเมริกา อุตสาหกรรมด้านนี้เริ่มขึ้นอย่างจริงจังในช่วงปลายทศวรรษที่ 1950 แต่ปริมาณการใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผลิตจากกระบวนการนี้ยังคงน้อยอยู่เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผลิตจากกระบวนการอื่น การผลิตชิ้นส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการ P/M นี้ถูกพัฒนาเรื่อยมาทั้งจากผู้ผลิตผงโลหะและโรงงานด้าน P/M เอง โดยมีการหาสภาวะและตัวแปรที่เหมาะสมในการเผาประสาน (Sintering) และปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) ของชิ้นงานให้ดียิ่งขึ้น การพัฒนาอุตสาหกรรม P/M ที่เกี่ยวข้องกับเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นไปอย่างต่อเนื่องเรื่อยมาจนทำให้อุตสาหกรรมผงเหล็กกล้าไร้สนิมกลายเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ในปัจจุบัน

2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L

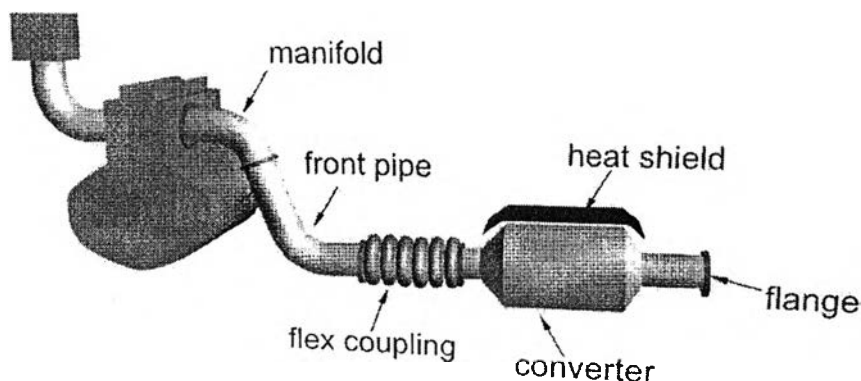
เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) แบ่งได้หลายกลุ่มตามองค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition) โครงสร้างผลึก (Crystal Structure) และสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ดังนี้ คือ กลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) กลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steel) กลุ่มมาเทนซิติก (Martensitic Stainless Steel) กลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steel) และกลุ่ม Precipitation hardening (PH) โดยในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มเฟอร์ริติก

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Face-centered cubic (FCC) มีสมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetic property) และมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance) สูงกว่ากลุ่มมาเทนซิติกแต่น้อยกว่ากลุ่มออสเทนนิติก การใช้งานโดยทั่วไปมักใช้ตกแต่งภายนอกอาคารและใช้เป็นชิ้นส่วนในระบบไอเสีย (Exhaust system) ของรถยนต์ ตัวอย่างของเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มนี้ได้แก่ เกรด 430, 405, 409, 409L, 434, 436, 442, และ 446 โดยในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L

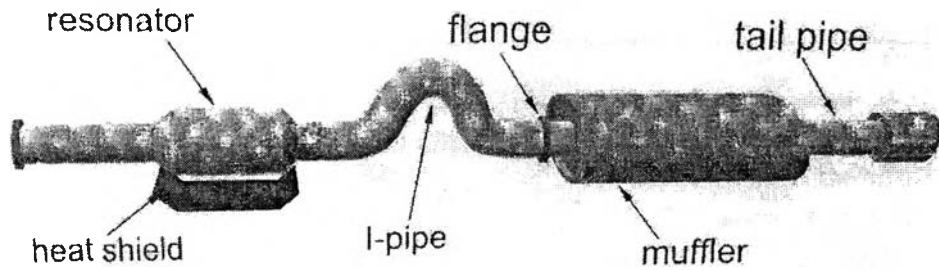
เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L เป็นเกรดที่มีปริมาณโครเมียมน้อยที่สุดและราคาถูกที่สุดในบรรดาเหล็กในกลุ่มเฟอร์ริติกด้วยกัน มีปริมาณคาร์บอนต่ำ (Low carbon, L) โดยมีคาร์บอนอยู่ที่ 0.01-0.02% เท่านั้น มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนปานกลางและมีความเหนียวอยู่ในเกณฑ์ดี สามารถนำมาเชื่อมได้ (Weldable grade) โดยไม่เกิดปรากฏการณ์ Sensitization ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมได้รับความร้อนจากการเชื่อม โดยโครเมียมที่อยู่บริเวณขอบเกรนจะรวมตัวกับคาร์บอนเกิดเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) ขึ้น ทำให้บริเวณดังกล่าวมีปริมาณโครเมียมลดลง (Chromium depleted zone) ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนลดลงและทำให้เกิด Intergranular stress corrosion cracking ได้ง่ายขึ้นในสภาวะที่เป็นกรดหรือแม้แต่สภาวะที่มีเพียงความชื้นเท่านั้น สาเหตุที่เหล็กเกรดนี้สามารถป้องกันการเกิด Sensitization ได้เนื่องจากมีไนโอเบียม (Nb) ผสมอยู่ โดยไนโอเบียมจะรวมตัวกับคาร์ไบด์เกิดเป็นไนโอเบียมคาร์ไบด์ (NbC) ขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ ทำให้บริเวณดังกล่าวไม่สูญเสียโครเมียมไปในระหว่างการเชื่อม

จากข้อมูลการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมในสหรัฐอเมริกา^[7] พบว่า เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L เพิ่งมีการผลิตในช่วงสิบกว่าปีมานี้เอง โดยแต่ละปีมีการผลิตมากเป็นอันดับ 2 รองจากเกรด 304 ซึ่งอยู่ในกลุ่มออสเทนนิติกและยังคงมีแนวโน้มการผลิตเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L นี้ นับเป็นเหล็กเกรดใหม่ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้งานในสภาวะที่มีการกัดกร่อนไม่สูงนักเนื่องจากมีปริมาณโครเมียมต่ำ ทำให้เหล็กเกรดนี้มีแนวโน้มที่จะเข้ามาแทนที่เหล็กกล้าคาร์บอนทั่วไปมากขึ้น เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาและการถอดเปลี่ยนชิ้นงาน

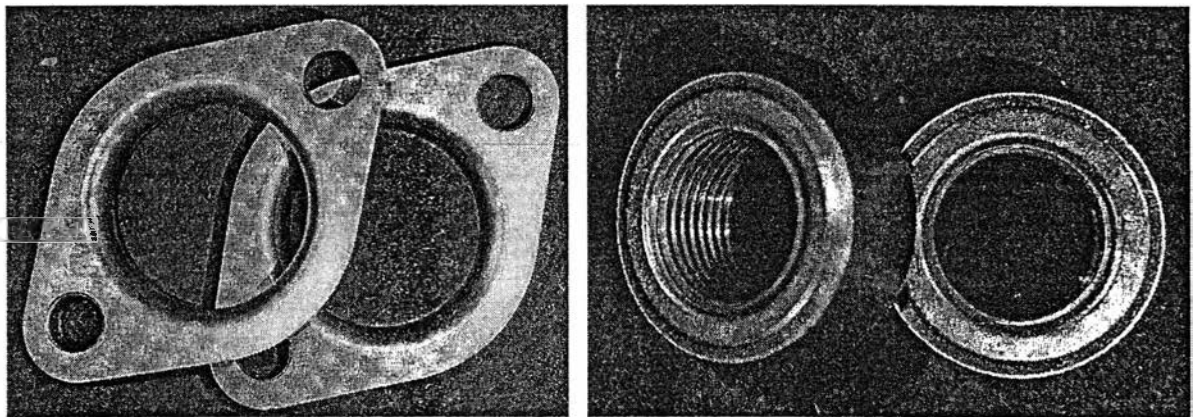
การใช้งานโดยทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L มักใช้ในระบบไอเสียของรถยนต์ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 โดยนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วน Exhaust flanges และ Sensor bosses ดังรูปที่ 2.3 (a) และ (b) ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 ระบบไอเสียรถยนต์ด้านร้อน (Hot end)^[8]



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงระบบไอเสียของรถยนต์ด้านเย็น (Cold end)^[8]



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 409L^[6]

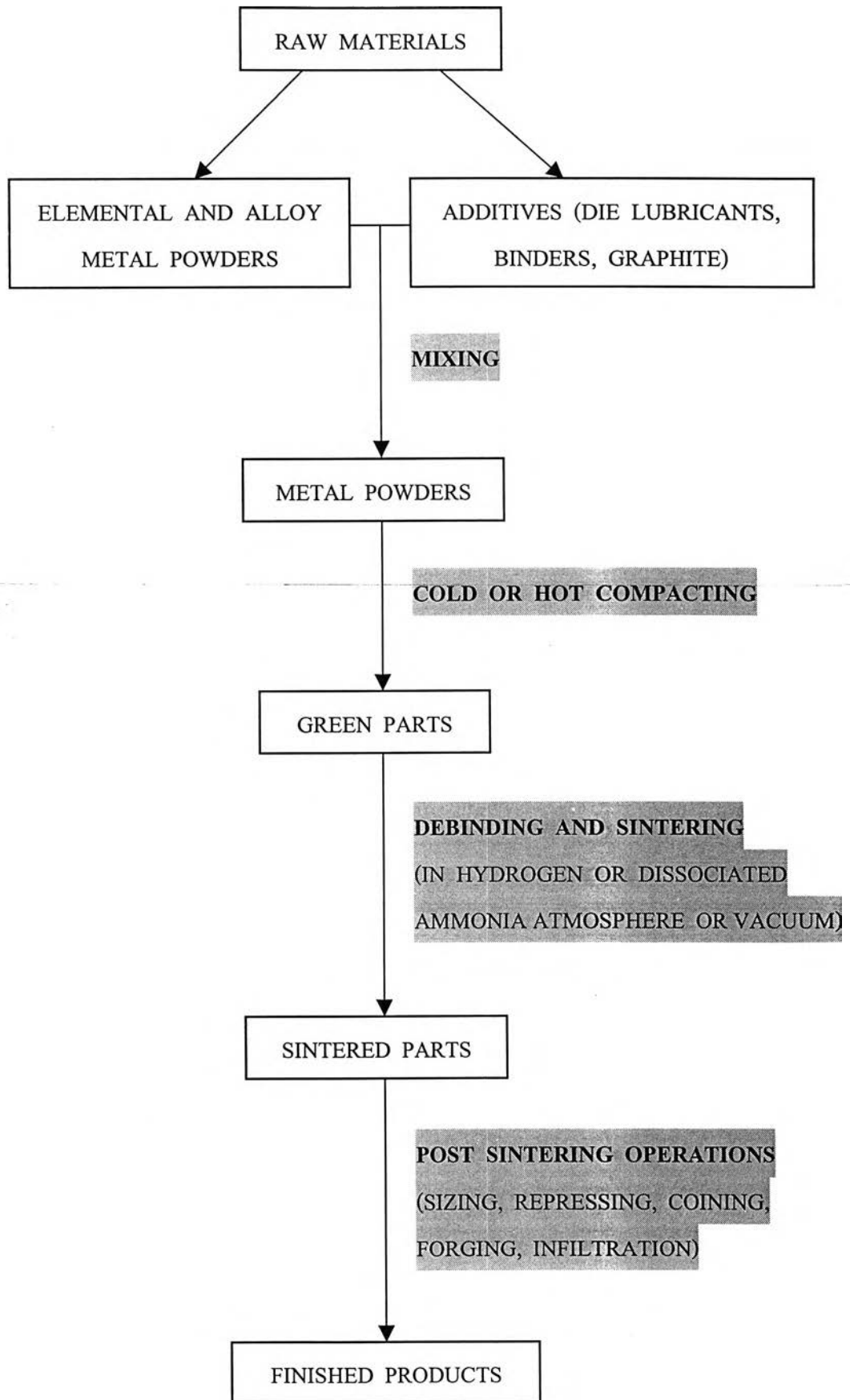
(a) Exhaust flanges (b) Sensor bosses

2.2 การผลิตชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการทางโลหะผง

การผลิตชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการทางโลหะผง (P/M) ประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆที่สำคัญดังนี้คือ

1. การผสมผง (Mixing)
2. การอัดขึ้นรูป (Compaction)
3. การเผาไล่ตัวประสาน (Debinding)
4. การเผาประสาน (Sintering)

ลำดับขั้นตอนการผลิตแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการผลิตชิ้นงานด้วยกระบวนการ P/M

2.2.1 การผสมผง (Mixing)

เป็นการผสมผงโลหะตัวหลัก (Elemental metal powder) ซึ่งก็คือผงเหล็ก (Fe) กับผงโลหะผสม (Alloy metal powders) ได้แก่ โครเมียม (Cr), แมงกานีส (Mn), ซิลิกอน (Si), ซัลเฟอร์ (S), ฟอสฟอรัส (P) และไนโตรเจน (N) ซึ่งเป็นธาตุผสมหลักของเหล็กกล้าไร้สนิม รวมถึงธาตุอื่นๆ ได้แก่ นิกเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo), ไทเทเนียม (Ti) และไนโอเบียม (Nb) ซึ่งอาจมีหรือไม่มีก็ได้แล้วแต่เกรดของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยจะผสมผงโลหะดังกล่าวกับตัวประสาน (Binder) หรือสารหล่อลื่นต่างๆ (Lubricant) รวมถึงคาร์บอนซึ่งอยู่ในรูปของแกรไฟต์เข้าด้วยกันในถังผสม เพื่อผลิตเป็นผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดต่างๆตามที่ต้องการต่อไป

2.2.2 การอัดขึ้นรูป (Compacting)

ในการผลิตชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมในอุตสาหกรรม P/M โดยทั่วไป ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานแบบไม่ใช้ความร้อน (Cold compaction) จะสูงกว่าความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปผงโลหะกลุ่มเหล็กตัวอื่นๆที่มีธาตุผสมต่ำ (Low-alloy ferrous powders) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 500 ถึง 830 MPa^[6] แต่ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้จะมีความแข็งแรงก่อนเผาประสาน (Green strength) ต่ำกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผงโลหะกลุ่มเหล็กตัวอื่นๆ ซึ่งความแข็งแรงของชิ้นงานก่อนเผาประสานนี้ขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปและชนิดของสารหล่อลื่นด้วย ตัวอย่างเช่น สารหล่อลื่นประเภท Stearic acid จะให้ความแข็งแรงก่อนการเผาประสานที่ดี แต่ความสามารถในการอัดขึ้นรูป (Compactibility) ของผงโลหะชนิดนั้นจะต่ำ นั่นคือได้ความหนาแน่นก่อนเผาประสาน (Green density) ที่ต่ำ ดังนั้นการเลือกชนิดของสารหล่อลื่นจึงมีความสำคัญต่อการผลิตและการใช้งานเช่นกัน นอกจากนี้แม่พิมพ์และชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปซึ่งสัมผัสโดยตรงกับผงโลหะมักจะทำจากพวกคาร์ไบด์ (Carbide) เป็นหลัก โดยตัวที่นิยมใช้ได้แก่ ทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide, WC)

2.2.3 การเผาไล่ตัวประสาน (Debinding)

หลังการขึ้นรูปชิ้นงานจะต้องผ่านการเผาประสาน (Sintering) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงเสียก่อนจึงจะสามารถนำมาใช้งานได้ตามปกติ โดยในช่วงแรกจะเป็นการเผาไล่ตัวประสาน (Debinding) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ (Organic binder) ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวประสานและปริมาณที่ผสมในผงโลหะเนื่องจากตัวประสานแต่ละชนิดมีจุดหลอมเหลว (Melting point) และอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature) ที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น Zinc stearate มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 125°C จะสลายตัวหมดที่อุณหภูมิประมาณ 550°C แต่ Kenolube P-11 มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 135°C จะสลายตัวหมดที่อุณหภูมิประมาณ 540°C เป็นต้น ในการเผาไล่ตัวประสานชิ้นงานจะต้องถูกเผาจนแน่ใจว่าไม่มีตัว

ประสานหลงเหลืออยู่ เพื่อป้องกันคาร์บอนตกค้างและแพร่เข้าไปในเนื้อ (Matrix) เหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานนั้นมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าปกติและอาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ Sensitization ในระหว่างการเผาประสานขึ้นได้ ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานนั้นลดลง

2.2.4 การเผาประสาน (Sintering)

หลังการเผาไล่ตัวประสาน ชิ้นงานจะถูกเผาประสานซึ่งถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิต การเผาประสานจะกระทำภายใต้บรรยากาศ Dissociated ammonia, ไฮโดรเจน หรือสุญญากาศ (Vacuum) ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดชั้นฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก (Ferrous oxide) ขึ้นบนผิวชิ้นงานจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) อุณหภูมิทั่วไปที่ใช้ในการเผาประสานชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผงเหล็กกล้าไร้สนิมและต้องการความหนาแน่นปานกลาง (Medium-density stainless steels) อยู่ที่ 1120 ถึง 1150°C^[6] ส่วนชิ้นงานที่ต้องการการยืดตัว (Elongation) การทนแรงกระแทก (Impact resistance) และความสามารถในการกัดกร่อน (Corrosion resistance) ที่สูงกว่าปกติ มักจะเผาประสานที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 1315°C ซึ่งจากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาประสานที่มีต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งในกลุ่มออสเทนนิติกและเฟอริติกพบว่า เมื่อเผาประสานที่อุณหภูมิสูงขึ้น ชิ้นงานจะมีความหนาแน่น (Sintered density), การหดตัว (Shrinkage), ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength), ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และความแข็ง (Hardness) เพิ่มขึ้น แต่การยืดตัว (Elongation) ที่ได้จะลดลง

สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมยังขึ้นกับบรรยากาศที่ใช้ในการเผาประสานด้วย โดยบรรยากาศที่นิยมใช้ในการเผาประสานเหล็กกล้าไร้สนิมในอุตสาหกรรมคือ Dissociated ammonia (75 vol% H₂ + 25 vol% N₂) ซึ่งการเผาประสานในบรรยากาศที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบนั้น จะทำให้เกิดการแพร่ของอะตอมของไนโตรเจนเข้าสู่ชิ้นงาน ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรง (Strength) และความแข็งเพิ่มขึ้นแต่ความเหนียว (Ductility) ลดลง และมีการหดตัวน้อยกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนหรือในสุญญากาศ ซึ่งจัดว่ามีการหดตัวค่อนข้างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นงานที่มีความหนาแน่นไม่สูงนัก (ต่ำกว่า 6.6 g/cm³) การหดตัวนี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอริติก ทำให้การควบคุมขนาดของชิ้นงานเป็นไปได้ยากขึ้น ด้วยเหตุนี้หลังการเผาประสานจึงมักจะต้องมีการปรับขนาด (Sizing) ชิ้นงานอีกครั้งหนึ่งก่อนนำไปใช้งานจริง

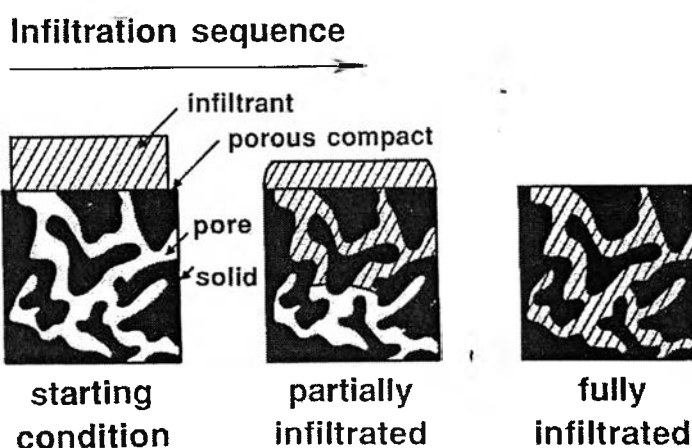
ส่วนการเผาประสานภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนที่มีจุด Dew point ต่ำๆ จะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นดีขึ้น ส่งผลให้ความเหนียวของชิ้นงานดีขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งผลที่ได้นี้จะคล้ายคลึงกับของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานในสุญญากาศ

2.3 เทคนิคการแทรกซึม (Infiltration Technique)

เป็นที่ทราบกันดีว่าการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการ P/M นั้นมีข้อดีอยู่หลายประการ ข้อดีที่โดดเด่นมากประการหนึ่งคือ สามารถขึ้นรูปชิ้นงานให้มีขนาดตามต้องการหรือใกล้เคียงกับที่ต้องการได้ ทำให้ช่วยลดการสูญเสียเนื้อวัสดุและค่าใช้จ่ายในการปรับแต่งขนาดของชิ้นงานลงได้มาก แต่การขึ้นรูปด้วยกระบวนการ P/M ก็มีจุดด้อยเช่นกันคือ ชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแบบไม่ใช้ความร้อน (Cold compaction) จะมีรูพรุน (Porosity) อยู่ภายในชิ้นงานเป็นจำนวนมาก ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความหนาแน่น (Sintered density) ต่ำและมีสมบัติทางกลด้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการอื่นๆ จึงได้มีความพยายามที่จะลดรูพรุนภายในชิ้นงานเพื่อปรับปรุงความหนาแน่นและสมบัติทางกลให้ดียิ่งขึ้น

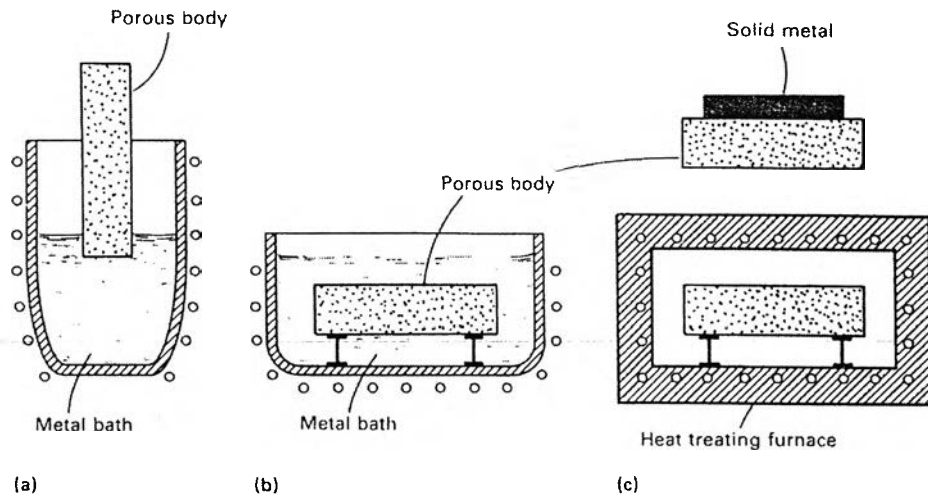
การปรับปรุงสมบัติต่างๆของชิ้นงานหลังการเผาประสานสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การอัดร้อนด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง (Hot Isostatic Press, HIP) การทุบขึ้นรูป (Forging) การอบชุบทางความร้อน (Heat treatment) การอบไอน้ำ (Steam treatment) หรือการแทรกซึม (Infiltration) เป็นต้น ซึ่งการแทรกซึมนั้นสามารถทำพร้อมกับการเผาประสาน (Single-step process or Sintrating) หรือภายหลังการเผาประสาน (Double-step process) ก็ได้

ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการแทรกซึมซึ่งเป็นเทคนิคที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมากกว่า 50 ปีในอุตสาหกรรมโลหะผงของเหล็กและเหล็กกล้า^[1] หลักการของเทคนิคนี้คือการทำให้โลหะหลอมเหลว (Infiltrant) สัมผัสกับชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นรูพรุน (Porous compact) ต่อเนื่องกัน^[2] ซึ่งจะทำให้โลหะหลอมเหลวสามารถไหลแทรกซึมผ่านเข้าไปในชิ้นงานได้โดยอาศัยแรงคาปิลลารี (Capillary forces) ลำดับขั้นตอนการเกิดการแทรกซึมแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลำดับขั้นตอนการเกิดการแทรกซึม^[9]

การแทรกซึมที่ความดันบรรยากาศมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การจุ่มบางส่วนของชิ้นงานในอ่างโลหะหลอมเหลว (Capillary-dip infiltration) การแช่ทั้งชิ้นงานในอ่างโลหะหลอมเหลว (Full immersion infiltration) หรือการวางชิ้นงานที่ใช้เป็นตัวแทรกซึม (Infiltrant) ประกบกับชิ้นงานหลัก (Porous compact) แล้วให้ความร้อนกับชิ้นงานทั้งคู่พร้อมกัน (Contact infiltration) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (a), (b) และ (c) ตามลำดับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการหลังสุดในการทดลองเนื่องจากสะดวกและปลอดภัยกว่าสองวิธีแรก



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงวิธีการแทรกซึมแบบต่างๆ^[2]

การจับคู่ระหว่างโลหะที่จะนำมาใช้เป็นตัวแทรกซึม (Infiltrants) กับชิ้นงานหลัก (Porous compact or Skeleton) นั้น ควรจะต้องพิจารณาถึงสิ่งสำคัญหลักๆดังต่อไปนี้

1. ตัวแทรกซึมจะต้องมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าชิ้นงานหลักและมีความสามารถในการไหลตัว (Fluidity) สูงในขณะที่เป็นของเหลว
2. ชิ้นงานหลักจะต้องมีรูพรุนเปิด (Open pores) ที่ผิวที่เปิดสู่รูพรุนที่เชื่อมต่อกัน (Interconnected pores) ภายในชิ้นงาน
3. หากชิ้นงานหลักมีชั้นของฟิล์มออกไซด์หรือไนไตรด์เคลือบอยู่ ควรนำไปขัดออกก่อนนำมาทำการแทรกซึม
4. มุมสัมผัส (Wetting angle) ระหว่างตัวแทรกซึมขณะหลอมเหลวกับชิ้นงานหลักควรมีค่าน้อยๆหรือเข้าใกล้ศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 2.7
5. ตัวแทรกซึมกับชิ้นงานหลักไม่ควรทำปฏิกิริยาต่อกันหรือทำปฏิกิริยากันน้อยที่สุด

การจับคู่ระหว่างตัวแทรกซึมกับชิ้นงานหลัก (Skeleton) ที่สามารถใช้ร่วมกันได้และที่มีการใช้กันมากในอุตสาหกรรมแสดงดังตารางที่ 2.1

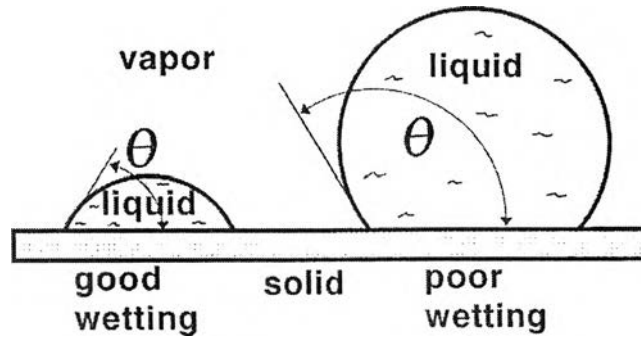
ตารางที่ 2.1 การจับคู่ระหว่างโลหะที่ใช้เป็นตัวแทรกซึมกับโลหะที่เป็นชิ้นงานหลัก^[2]

Skeleton	Infiltrants																			
	Aluminum	Antimony	Bismuth	Cadmium	Calcium	Cobalt	Copper	Gold	Iron	Lead	Magnesium	Manganese	Mercury	Nickel	Silver	Sodium	Thallium	Tin	Zinc	
Aluminum			○	○						●						○	○			
Beryllium	○										○									
Chromium	○		○	○		○	●			○			○		○		○	○		
Cobalt			○				○			○			○		○		○	○		
Copper		○	●							●			○				○	●	○	
Iridium								○							○					
Iron	○	○	○	○	○		●			●	○		○		○	○	○	○	○	
Lead																○		○		
Magnesium																○			○	
Manganese			○							○					○		○			
Molybdenum	○		○	○	○		●	○		○		○	○	○	●			○	○	
Nickel			○				○			○	○		●		●		○	○		
Niobium				○						○			○		○				○	
Platinum								○							○					
Rhodium								○							○					
Silicon		○	○	○						○							○	○		
Silver			●										○							
Tantalum				○				○		○			○		○				○	
Titanium	○						○											○		
Titanium Carbide						●	○		●					●						
Tungsten	○	○	○	○	○	○	●			●		○	○	●	●				○	
Tungsten Carbide						●	○		○					●	●					
Vanadium							○								○					
Zinc			○							○						○	○	○		
Zirconium							○			○					○					

หมายเหตุ

● หมายถึง การจับคู่ที่มีการใช้กันมากในอุตสาหกรรม

○ หมายถึง การจับคู่ที่สามารถใช้ร่วมกันได้



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเปียกของโลหะหลอมเหลวบนผิวชิ้นงานหลักและมุมสัมผัส

ประโยชน์ของเทคนิคการแทรกซึมมีหลายประการ^[2] เช่น

1. ได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นดีขึ้นหรือเท่ากับความหนาแน่นทางทฤษฎี (Full density) โดยไม่จำเป็นต้องใช้ความดันในการอัดขึ้นรูปที่สูงมากนัก และไม่จำเป็นต้องทำการทุบขึ้นรูป (Forging) รีด (Rolling) หรืออัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) หลังการขึ้นรูปปกติ
2. สามารถสร้างชั้นของสารประกอบต่างๆ (Layered products) ที่ต้องการที่บริเวณผิวหรือส่วนใดส่วนหนึ่งของชิ้นงานได้
3. ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการกลึง ไส กัด เจาะของชิ้นงานให้ดียิ่งขึ้นเนื่องจากการลดลงของจำนวนและขนาดของรูพรุน
4. ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลของชิ้นงานเนื่องจากรูพรุนที่มีลักษณะเป็นมุมแหลมมีจำนวนลดลง

ในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคนิคการแทรกซึมเพื่อปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานที่ผลิตจากกระบวนการ P/M มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการผลิตชิ้นส่วนเหล็กหรือเหล็กกล้าที่มักจะใช้ทองแดงหรือโลหะผสมของทองแดง (Copper alloys) เช่น บรอนซ์ เข้ามาช่วยเป็นตัวแทรกซึม ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาอิทธิพลของปริมาณของตัวแทรกซึมต่อสมบัติด้านต่างๆของชิ้นงาน ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัยในเรื่องนี้อยู่พอสมควร

จากงานวิจัยของ F. Velasco และคณะ^[3] ได้ศึกษากระบวนการแทรกซึมของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L และ 304L ที่ใช้ทองแดงและบรอนซ์เป็นตัวแทรกซึม โดยได้อัดขึ้นรูปชิ้นงานที่ความดัน 700 MPa จากนั้นเผาประสานชิ้นงานในสุญญากาศที่อุณหภูมิ 1330°C เป็นเวลา 30 นาที โดยมีอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) และอัตราการเย็นตัว (Cooling rate) เท่ากับ 5°C/min. ต่อด้วยการทำการแทรกซึมในสุญญากาศเป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิ 1100°C สำหรับทองแดงและ 1175°C สำหรับบรอนซ์ ตามลำดับ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบความหนาแน่น สมบัติทางกลต่างๆ และความต้านทานการกัดกร่อน

ผลการทดสอบความหนาแน่นพบว่า ชีงงานมีความหนาแน่นดีขึ้นเมื่อปริมาณทองแดงและบรอนซ์เพิ่มขึ้น โดยความหนาแน่นจะเริ่มคงที่ที่ปริมาณทองแดงและบรอนซ์เท่ากับ 4% การที่ความหนาแน่นของชีงงานดีขึ้นเกิดจากการลดลงของรูพรุน (Porosity) ในชีงงานในระหว่างการทำการแทรกซึม โดยกลไกนี้สามารถเกิดได้แม้ว่าความหนาแน่นก่อนการเผาประสานของชีงงานจะมีค่าสูงก็ตาม และเพื่อให้การแทรกซึมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น รูพรุนที่มีอยู่ในชีงงานก่อนการเผาประสานควรเป็นแบบเปิด (Open pores) และต่อเนื่องกัน (Interconnected pores) เพื่อให้ตัวแทรกซึมที่ไหลอมเหลวสามารถไหลแทรกซึมเข้าไปในชีงงานได้อย่างสม่ำเสมอ

การลดลงของรูพรุนและความหนาแน่นของชีงงานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สมบัติทางกลต่างๆ อันได้แก่ ความต้านทานแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) และความแข็งของชีงงานดีขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการเกิด Solid solution strengthening ขึ้นในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel matrix) นั่นเอง

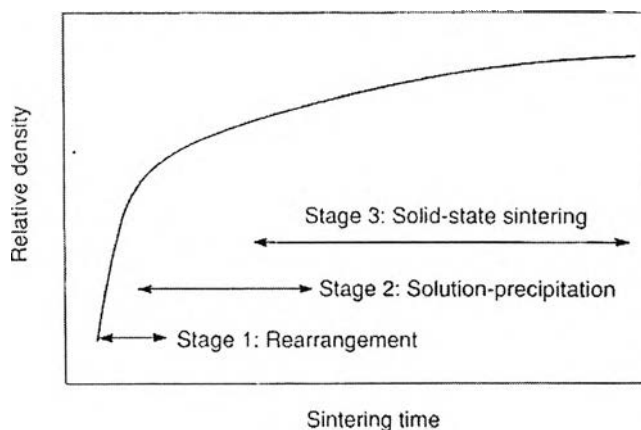
นอกจากนี้เมื่อทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนของชีงงานในกรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) และกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) ที่ความเข้มข้น 10 v/o และ 1 v/o ตามลำดับ ณ สภาวะเดือด (Boiling) พบว่า ชีงงานมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีขึ้นเมื่อปริมาณทองแดงและบรอนซ์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการแทรกซึมจะช่วยลดรูพรุนของชีงงาน โดยเฉพาะที่บริเวณผิวด้านนอก ทำให้การเกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์เพื่อป้องกันการกัดกร่อนเป็นไปได้ดีขึ้นและสม่ำเสมอขึ้น ส่งผลให้ชีงงานมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น

2.4 การเผาประสานแบบเฟสของเหลว (Liquid phase sintering, LPS)

การเผาประสานแบบเฟสของเหลว เป็นการเผาชีงงานที่ขึ้นรูปจากผงโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปผสมกัน (Premixed) ประกอบด้วยผงโลหะหลักที่ต้องการเผาประสาน (Base powders) และผงโลหะตัวเติมที่ต้องการให้เกิดเป็นเฟสของเหลวในระหว่างการเผา (Liquid-phase-forming powders or Additives) ซึ่งจะต้องมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าอุณหภูมิการเผาประสาน ผงโลหะตัวเติมนี้จะต้องมีปริมาณน้อยกว่าผงโลหะหลักเพื่อให้ชีงงานสามารถคงรูปอยู่ได้ภายหลังการเผา โดยปกติจะผสมผงโลหะตัวเติมประมาณ 1-40 vol%^[5, 10]

การเผาประสานแบบเฟสของเหลวจะทำที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของผงโลหะตัวเติม โดยการเผาประสานด้วยวิธีนี้สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาของการเผาประสานและช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประสานได้ การใช้งานที่มีอยู่ในปัจจุบันได้แก่ การผลิตชีงงานจากผงผสมระหว่าง Cu-Co, W-Cu, W-Ni-Fe, W-Ag, Cu-Sn, Fe-Cu, WC-Co, TiC-Ni และ Fe-Cu-P เป็นต้น

กลไกการเผาประสานแบบเฟสของเหลวประกอบด้วยกระบวนการต่างๆตามลำดับดังนี้ คือ Rearrangement or Liquid flow, Accommodation or Dissolution and reprecipitation, และ Coalescence or Solid phase bonding^[10] ซึ่งในบางช่วงอุณหภูมิอาจเกิดทั้งสองกระบวนการพร้อมกันได้ดังรูปที่ 2.8



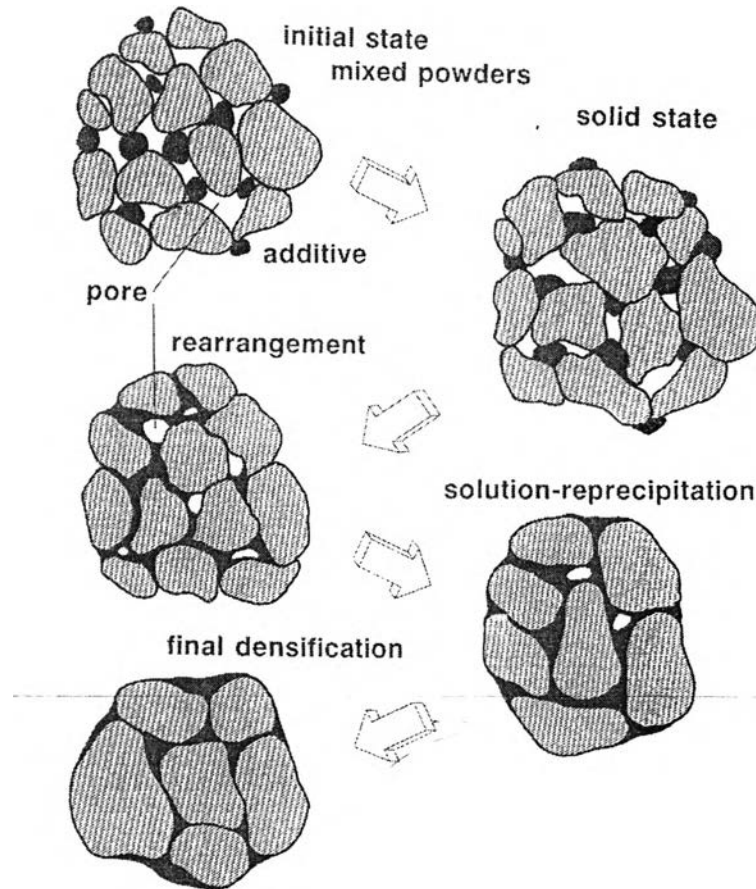
รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงกลไกการเผาประสานแบบเฟสของเหลว^[11]

จากรูปที่ 2.8 ช่วงแรก (Rearrangement) เป็นช่วงที่เริ่มเกิดเฟสของเหลว โลหะส่วนที่หลอมเหลวจะถูกดึงไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาคด้วยแรงคาปิลลารี ซึ่งแรงนี้จะกระทำต่ออนุภาคของผงโลหะหลัก (Base powder) ด้วย ทำให้อนุภาคผงโลหะหลักเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็ว เรียกช่วงนี้ว่า Primary arrangement โลหะส่วนที่หลอมเหลวนี้เมื่อถูกดึงไปตามช่องว่างก็จะเข้าชนและสลายกลุ่มของอนุภาคผงโลหะหลักที่จับตัวกันอยู่ ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่อีกครั้งโดยผงอนุภาคขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ไปอยู่ระหว่างผงอนุภาคขนาดใหญ่ ส่งผลให้ช่องว่างที่มีอยู่ในชิ้นงานมีขนาดเล็กลงและชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น^[5]

ช่วงที่สอง (Dissolution and reprecipitation) เป็นช่วงที่ผงโลหะส่วนที่เป็นของแข็งบางส่วนละลายเข้าสู่ส่วนที่เป็นของเหลว แล้วเกิดการ Precipitate ขึ้นใหม่ทั่วทั้งชิ้นงานเนื่องจากการมีความสามารถในการละลาย (Solubility) ที่แตกต่างกันระหว่างอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ในช่วงนี้อัตราการหดตัวของชิ้นงานจะน้อยกว่าในช่วงแรก (Rearrangement)

ช่วงที่สาม (Solid phase bonding) เป็นช่วงสุดท้ายของการเผาประสานแบบเฟสของเหลว ชิ้นงานจะถูกเผาต่อไปตามปกติจนเสร็จสิ้นกระบวนการ

แบบจำลองกลไกการเกิดการเผาประสานแบบเฟสของเหลวแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แบบจำลองกลไกการเผาประสานแบบเฟสของเหลว^[9]

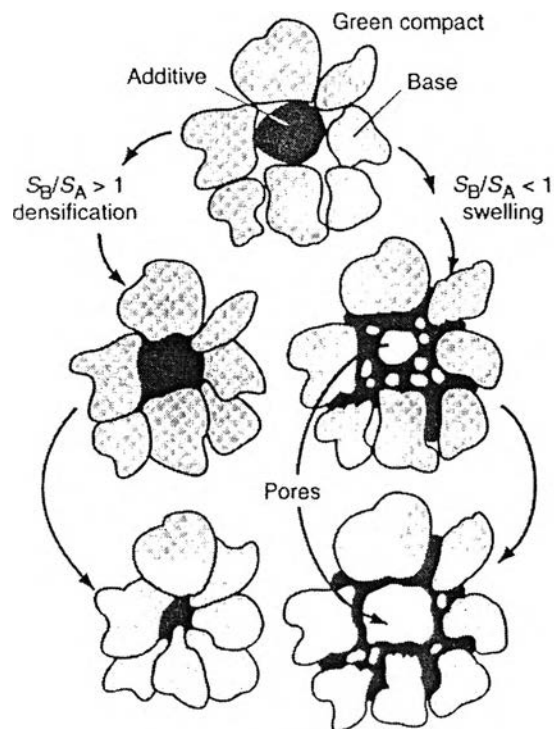
กลไกการเผาประสานแบบเฟสของเหลวทั้ง 3 กระบวนการนี้เกิดขึ้นต่อเนื่องกัน โดย จลนศาสตร์ของการเกิดจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิมากกว่าเวลาที่ใช้ในการเผาประสาน ในช่วงแรกของการเผา (Rearrangement) โลหะหลอมเหลวอาจมีปริมาตรสูงถึง 35% ของปริมาตรชิ้นงานทั้งหมด การใช้ผงโลหะหลักที่มีขนาดอนุภาคเล็กและการมีปริมาณเฟสของเหลวมาก จะช่วยให้การเผาประสานเป็นไปได้ดีขึ้นเนื่องจากมีแรงคาปิลลารีมากขึ้น ส่วนการใช้ผงโลหะหลักที่มีขนาดอนุภาคใหญ่และชิ้นงานมีความหนาแน่นก่อนเผาประสาน (Green density) มาก จะทำให้การเผาประสานเกิดได้ไม่สมบูรณ์และชิ้นงานเกิดการขยายตัว (Swelling) แทนที่จะหดตัวได้

การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานหลังการเผาประสานแบบเฟสของเหลวได้รับอิทธิพลทั้งจากสถานะในการเผาและคุณลักษณะเฉพาะตัว (Material characteristics) ของผงโลหะนั้นๆ ความสามารถในการละลายของผงโลหะหลักในโลหะหลอมเหลวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานหลังการเผาประสานแบบเฟสของเหลวดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลของความสามารถในการละลาย (Solubility) ต่อการหดตัวและขยายตัวของชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานแบบเฟสของเหลว^[5]

Base	Additives	Solubility ratio, atom %	Behavior
Al	Zn	0.004	Swell
Cu	Al	0.1	Swell
Cu	Sn	0.001	Swell
Cu	Ti	4	Shrink
Fe	Al	0.02	Swell
Fe	B	7	Shrink
Fe	Cu	0.07	Swell
Fe	Sn	0.01	Swell
Fe	Ti	3	Shrink
Mo	Ni	20	Shrink
Ti	Al	0.0003	Swell
W	Fe	5	Shrink

จากตารางที่ 2.2 สามารถสร้างแบบจำลองการหดและขยายตัวของชิ้นงานได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ผลของการละลายต่อการหดและการขยายตัวของชิ้นงาน^[5]

นอกจากนี้ความสามารถในการละลายของโลหะแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานหลังการเผาประสานแบบเฟสของเหลวอีกด้วยดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานหลังการเผาประสานแบบเฟสของเหลว^[5]

Factor	Swelling	Shrinkage
Solid solubility in liquid	Low	High
Liquid solubility in solid	High	Low
Diffusivities	Unequal	Equal
Additive particle size	Large	Small
Base particle size	Large	Small
Green density	High	Low
Contact angle	High	Low
Dihedral angle	High	Low
Temperature	Low	High
Time	Short	Long

ในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาวิจัยการเผาประสานแบบเฟสของเหลวเพื่อปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานที่ผลิตจากกระบวนการ P/M มากมาย ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาอิทธิพลของปริมาณของโลหะที่ต้องการให้เกิดเฟสของเหลวในระหว่างการเผาประสานต่อสมบัติด้านต่างๆของชิ้นงาน ซึ่งที่ผ่านมาการศึกษาวิจัยในเรื่องนี้อยู่บ้างพอสมควร

จากงานวิจัยของ A. Sharon และ D. Itzhak^[10] ได้ทำการขึ้นรูปชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SAE 304L ที่มีการผสมทองแดงปริมาณ 1 ถึง 7% เป็นตัวที่ทำให้เกิดเฟสของเหลวในระหว่างการเผาประสาน โดยใช้ความดันในการอัดขึ้นรูป 900 MPa จากนั้นจึงเผาประสานชิ้นงานในสถานะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำให้ชิ้นงานเย็นตัวทันทีที่อัตราการเย็นตัว 40°C/min.

ผลการทดสอบความหนาแน่นหลังการเผาประสานพบว่า ชิ้นงานมีความหนาแน่นมากขึ้นเมื่อปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้น โดยความหนาแน่นจะเริ่มคงที่ที่ปริมาณทองแดงเท่ากับ 4% และชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผงที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (-325 mesh) จะมีความหนาแน่นมากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผงที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ (-100 mesh) อยู่ประมาณ 0.1-0.2 g/cm³

เมื่อทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนของชิ้นงานด้วยวิธี Open circuit potential test พบว่า เมื่อปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้นชิ้นงานมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากทองแดงที่หลอมเหลวในระหว่างการเผาประสานได้ช่วยลดจำนวนและขนาดของรูพรุนที่มีอยู่ในชิ้นงาน โดยเฉพาะที่บริเวณผิวด้านนอก ทำให้การเกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์เพื่อป้องกันการกัดกร่อนเป็นไปได้ดีขึ้นและสม่ำเสมอขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ลดลง นอกจากนี้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผงที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (-325 mesh) จะมีความหนาแน่นมากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผงที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ (-100 mesh)