

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 โลหะบัดกรี

โลหะบัดกรีมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมมาเป็นเวลานาน ซึ่งโลหะบัดกรีชนิด ดีบุก-ตะกั่ว (Sn-Pb) จะใช้กันมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งข้อดีคือ ราคาถูก มีสมบัติการบัดกรีที่ดี มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วงที่เหมาะสม มีสมบัติทางกายภาพทางโลหะวิทยาที่ดี และสมบัติต้านทาน ความล้าที่ดี แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีความเป็นพิษ เนื่องจากมีปริมาณตะกั่วผสมอยู่ในปริมาณสูง ส่วนผสม ของโลหะบัดกรีที่นิยมใช้กันมากคือ 63Sn-37Pb และ 60Sn-40Pb เป็นต้น ดังนั้น จึงมีการนำโลหะบัดกรี ไร้สารตะกั่วมาใช้ทดแทนโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว (Sn-Pb) เพื่อลดปัญหาในเรื่องของความเป็นพิษที่มี ผลต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นำมาทดแทนจะต้องมีสมบัติต่างๆใกล้เคียงกับโลหะบัดกรี ชนิดที่มีตะกั่วผสม คุณลักษณะเบื้องต้นของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ใช้เป็นเกณฑ์พิจารณา ดังนี้

1. อุณหภูมิหลอมเหลวใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb โดยเฉพาะโลหะบัดกรีชนิด Sn-37Pb
2. ควรมีช่วงความเป็นพลาสติกที่แคบ (Narrow plastic range)
3. มีสมบัติต้านการเปื่อยที่ดีเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์
4. มีสมบัติทางกายภาพไม่ด้อยกว่าโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb
5. มีสมบัติต้านทานการล้าที่ดี (Good fatigue resistance)
6. สามารถใช้ได้กับระบบพลาสมาเคลือบที่มีใช้กันในปัจจุบัน
7. เมื่อทำเป็นโลหะบัดกรีชนิดครีม (Solder paste) จะต้องมีอายุเก็บ (Shelf life) ยาวนานไม่เสื่อมคุณภาพ
8. ต้องไม่เป็นพิษหรือมีความพิษต่อสภาพแวดล้อมและร่างกายต่ำ ซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักของการ ใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว
9. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่เลือกใช้จะต้องมีราคาถูก
10. เมื่อถูกนำไปใช้ในงานบัดกรีแบบ Wave soldering จะต้องมีการก่อตัวของ Dross ที่น้อย

2.1.1.1 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว เพื่อนำมาใช้ทดแทนโลหะ บัดกรีแบบดั้งเดิม โดยสามารถที่จะแบ่งออกเป็นกลุ่มตามช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวได้ 3 กลุ่ม ดังแสดงใน ตารางที่ 2.1, 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 °C

ระบบโลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt.%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Bi	Sn-58Bi	138
Sn-In	Sn-52In	118
Sn-In	Sn-50In	118-125
Bi-In	Bi-33In	109

ตารางที่ 2.2 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180 °C ถึง 200 °C

ระบบโลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt.%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Zn	Sn-9Zn	198
Sn-Zn-Bi	Sn-8Zn-3Bi	188-189
Sn-Bi-In	Sn-20Bi-10In	143-193

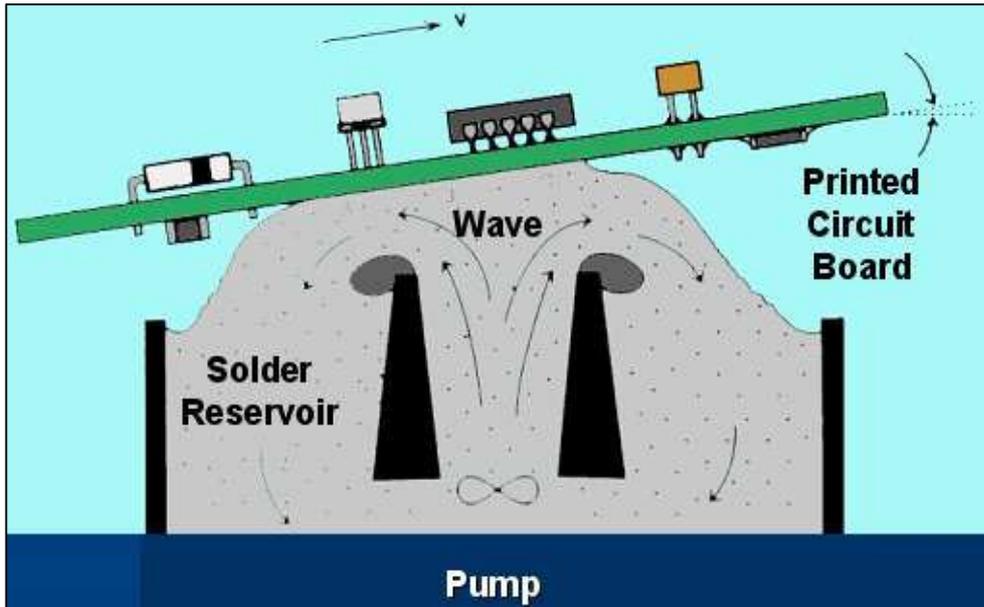
ตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 °C ถึง 230 °C

ระบบโลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt.%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Ag	Sn-3.5Ag	221
Sn-Ag	Sn-2Ag	221-226
Sn-Cu	Sn-0.7Cu	227
Sn-Ag-Bi	Sn-3.5Ag-3Bi	206-213
Sn-Ag-Bi	Sn-2Ag-7.5Bi	207-212
Sn-Ag-Cu	Sn-3.8Ag-0.7Cu	217
Sn-Ag-Cu-Sb	Sn-2Ag-0.8Cu-0.5Sb	216-222

2.1.2 วิธีการบัดกรี (Soldering methods)

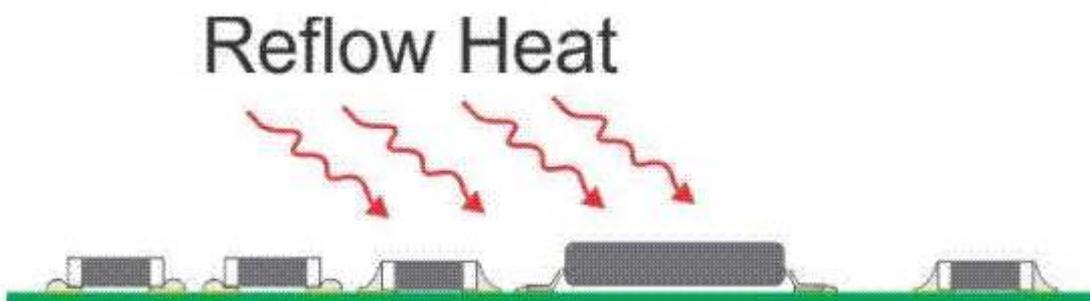
โดยทั่วไปแล้วนอกเหนือจากการบัดกรีด้วยมือ (Hand soldering) ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ยังมีวิธีการดังต่อไปนี้

1. การบัดกรีแบบคลื่น (Wave soldering) เป็นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่นวงจรรวม (Printed circuit board : PCB) โดย PCB ที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ติดอยู่จะเคลื่อนที่ผ่านไปบนอ่างของโลหะบัดกรีหลอมเหลวที่ถูกพ่นเป็นคลื่นสัมผัสกับด้านล่างของแผ่น PCB เพื่อให้โลหะบัดกรีเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การบัดกรีแบบคลื่น [20]

2. การบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow soldering) โดยทั่วไปจะใช้ในการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิวที่เรียกว่า Surface mount components กับ PCB ในกระบวนการนี้จะใช้โลหะบัดกรีที่อยู่ในรูปของครีม (Paste) โดยโลหะบัดกรีจะผสมอยู่กับฟลักซ์และตัวยึด (Binder) ซึ่งจะถูกสกรีนลงบนตำแหน่งที่ต้องการบน PCB แล้วจึงวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนโลหะบัดกรี หลังจากนั้น PCB จะถูกให้ความร้อนจนกระทั่งโลหะบัดกรีเกิดการหลอมละลายและเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่ออุณหภูมิลดลงโลหะบัดกรีก็จะกลายเป็นของแข็งที่สามารถนำไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.2 การบัดกรีแบบรีโฟลว์ [21]

2.1.3 การพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีม

ในการพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีม ประเภทของอุปกรณ์ในการพิมพ์ และพารามิเตอร์ของเครื่องพิมพ์ นับว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญเช่นเดียวกับประสิทธิภาพของโลหะบัดกรีแบบครีม ดังการพิมพ์ที่ดีจำเป็นจะต้องใช้อุปกรณ์การพิมพ์ และการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมควบคู่ไปกับการใช้โลหะบัดกรีที่มีคุณภาพดี โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสามารถการพิมพ์มีดังต่อไปนี้

1) Stencil

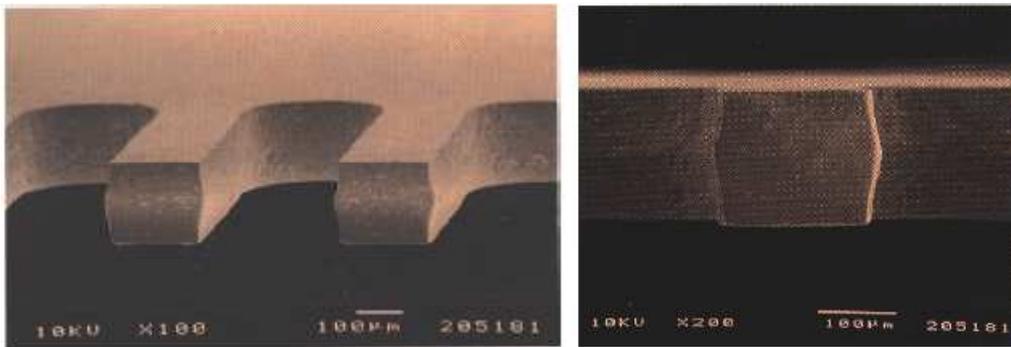
Stencil มีทั้งหมด 3 ประเภทที่ต่างกันขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต

1.1) การใช้สารเคมีกัด Stencil

1.2) การตัด Stencil ด้วยเลเซอร์

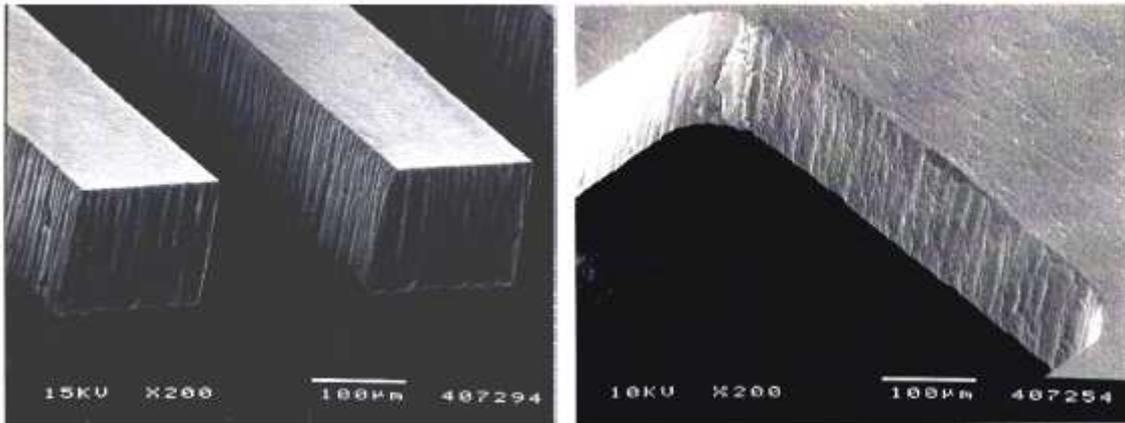
1.3) การกัด Stencil ด้วยการสปาร์คของกระแสไฟฟ้า

การกัดด้วยสารเคมีถูกใช้ในการผลิต Stencil อย่างกว้างขวางเพราะราคาในการผลิตต่ำ และชิ้นงานมีความคงทน อย่างไรก็ตามการพิมพ์โลหะบัดกรีด้วย Stencil ที่กัดขึ้นรูปด้วยสารเคมีไม่เหมาะกับ Stencil ที่มีระยะ Pitch น้อยกว่า 0.5 mm (Fine pitch) เนื่องจาก Surface finish ที่ไม่สมบูรณ์ของผนังภายในรูของ Stencil ดังแสดงในรูปที่ 2.3



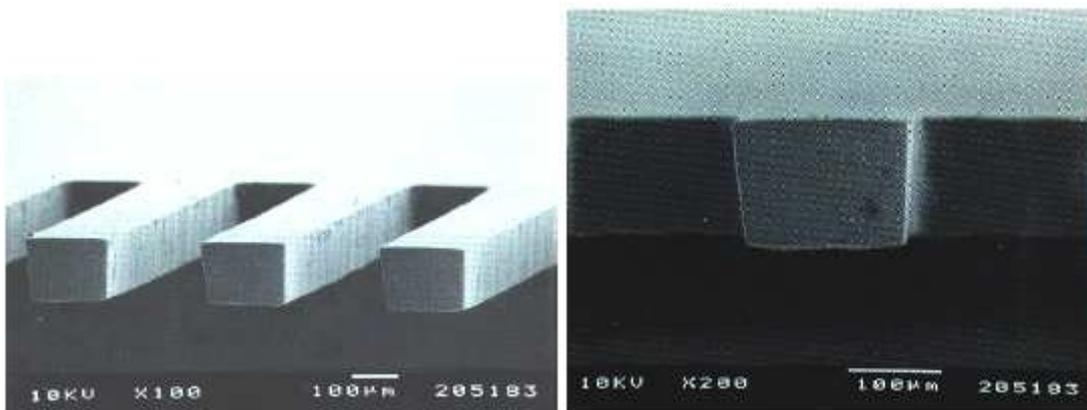
รูปที่ 2.3 การกัด Stencil ด้วยสารเคมี

การตัด Stencil ด้วยเลเซอร์จะทำให้ได้ผนังภายในรูของ Stencil ที่ดีกว่าการกัดด้วยสารเคมี แต่พื้นผิวที่ได้จะมีความขรุขระ ซึ่งอาจทำการพิมพ์ทำได้ยากเมื่อ pitch มีระยะห่างน้อยกว่า 0.4 mm (Ultra fine pitch) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การตัด Stencil ด้วยเลเซอร์

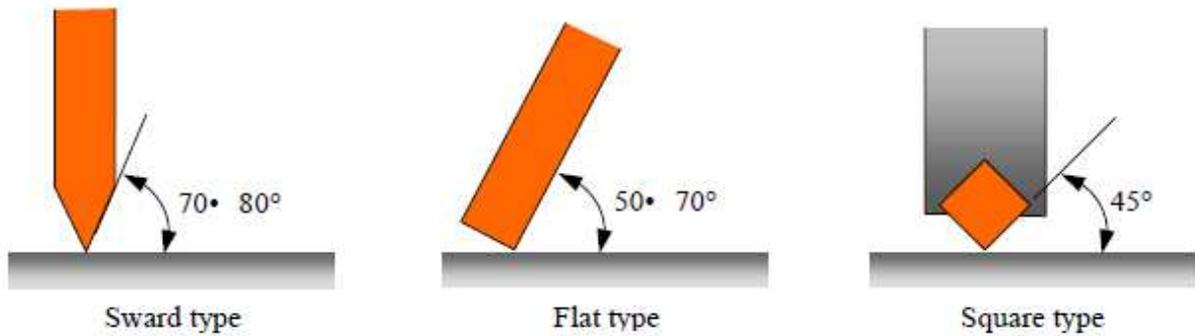
แม้ว่าการกัด Stencil ด้วยการสปาร์คของกระแสไฟฟ้าจะมีราคาในการผลิตค่อนข้างสูง แต่ Stencil ที่ได้จะมีความเหมาะสมในการพิมพ์มากที่สุด เนื่องจากผนังในรูของ Stencil มีความสมบูรณ์ และง่ายต่อการดึง Stencil ออกหลังจากการพิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การกัด Stencil ด้วยการสปาร์คของกระแสไฟฟ้า

2) Squeegee

Squeegee ถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ Squeegee แบบยาง และแบบโลหะ ซึ่ง Squeegee แบบยางยังสามารถแบ่งออกตามลักษณะการใช้งานได้อีก 3 ประเภทได้แก่ Sward, Flat และ Square ดังแสดงในรูปที่ 2.6

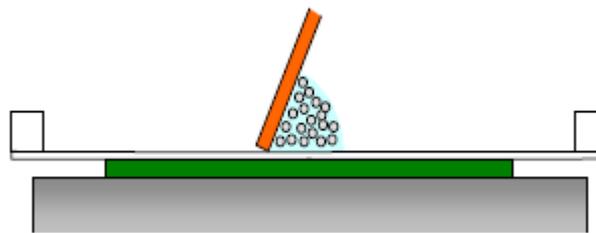


รูปที่ 2.6 ประเภทของ Squeegee แบบยาง

โดยปกติ Squeegee ประเภท Sward จะมีมุมการใช้งานประมาณ $70-80^\circ$ ซึ่งจะมีแรงกดค่อนข้างน้อยโดยจะเหมาะกับโลหะบัดกรีแบบครีมที่มีความหนืดต่ำ การพิมพ์ด้วย Squeegee ประเภท Square มีมุมการใช้งานที่ 45° และการปาดประเภทนี้จะสามารถเติมโลหะบัดกรีลงในรูของ Stencil ได้ค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับโลหะบัดกรีที่มีความหนืดสูง และ Squeegee ประเภท Flat ซึ่งมีมุมการใช้งาน $50-60^\circ$ ซึ่งการปาดประเภทนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในการใช้งาน เนื่องจากสามารถปรับมุมในการใช้งานได้ตามความเหมาะสมของโลหะบัดกรี

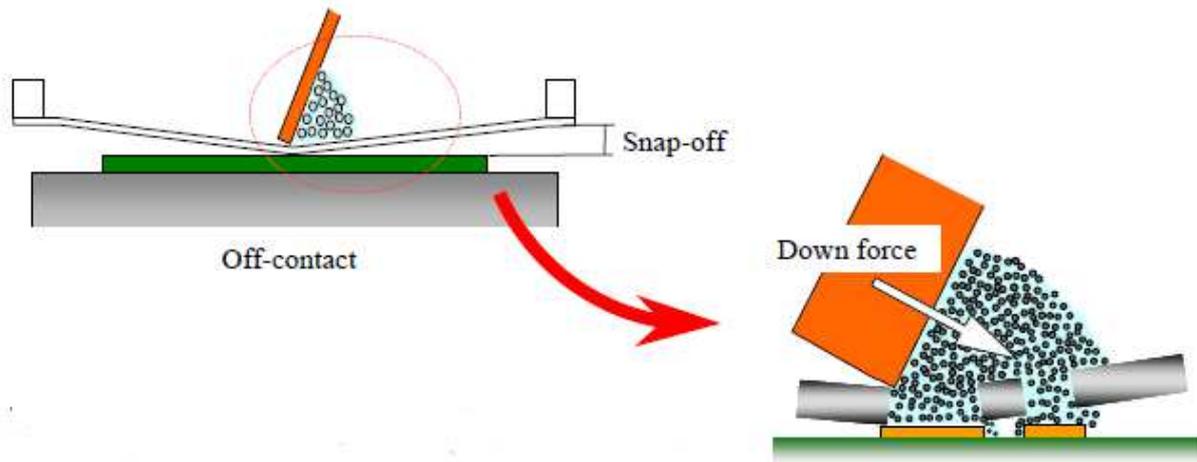
3) พารามิเตอร์เครื่องพิมพ์

สำหรับการพิมพ์โลหะบัดกรีบนแผ่นรอง การควบคุมระยะ Snap-off ถูกพิจารณาให้เป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีผลต่อการพิมพ์ โดยสามารถตั้งค่าได้ทั้ง On-contact และ Off-contact สำหรับ On-contact จะไม่มีระยะห่างระหว่างด้านล่างของ Stencil และพื้นผิวของแผ่นรอง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งสามารถป้องกันการเปื้อนของโลหะบัดกรีที่เป็นสาเหตุของการเกิด bridging



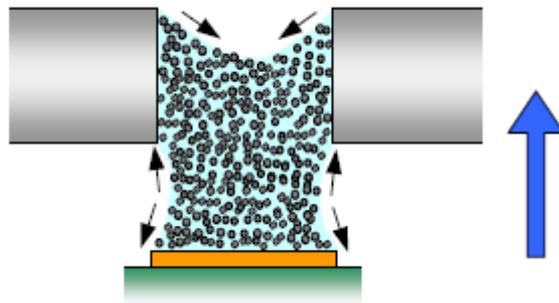
รูปที่ 2.7 On-contact

Off-contact ควรจะนำมาประยุกต์ใช้เมื่อไม่มีระบบควบคุมความเร็วการแยกออกของ Stencil ซึ่งวิธีนี้โลหะบัดกรีแบบครีมสามารถหลุดออกจากรูของ Stencil ได้อย่างสิ้นไหล แต่ระยะทางระหว่าง Stencil และแผ่นรองเป็นสาเหตุของการเกิดรอยเปื้อนของโลหะบัดกรีดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 Off-contact และการเปื้อนของโลหะบัดกรี

การควบคุมความเร็วในการแยก Stencil ออกเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดในการประเมินคุณภาพการพิมพ์ ซึ่งเมื่อลดความเร็วในการแยก Stencil ออกจะเป็นการลดแรงเสียดทานระหว่างโลหะบัดกรีและผนังของรู และยังช่วยให้แยก Stencil ออกจากโลหะบัดกรีได้ง่ายขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การแยก Stencil ออกจากโลหะบัดกรี

4) โลหะบัดกรีแบบครีม

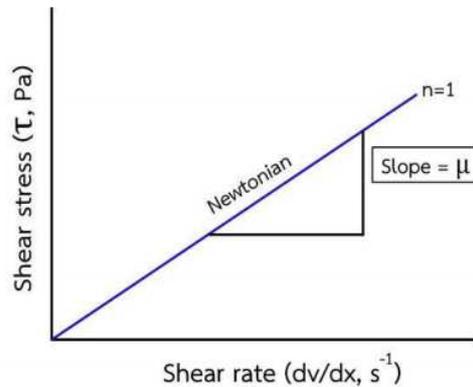
โลหะบัดกรีแบบครีมมีส่วนประกอบเป็นผงโลหะผสมกับฟลักซ์ (Flux) โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าการกระจายของขนาด และรูปร่างของผงโลหะเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการพิมพ์ นอกจากนี้คุณสมบัติของ Flux medium ในโลหะบัดกรีแบบครีมยังส่งผลต่อคุณสมบัติในการพิมพ์เป็นอย่างมาก ซึ่ง Flux medium เป็นวัสดุที่มีความซับซ้อน และมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณของฟลักซ์ ปริมาณอนุภาคแข็ง อิโซโทรปี (Thixotropy) และความหนืด (Viscosity) เป็นต้น

2.1.4 รีโอยี (Rheology)

คำว่าวิทยาศาสตร์ของไหล (Rheology) มีที่มาจากภาษากรีก โดยคำว่า Rheo หมายถึง การไหล Bingham และ Crawford [23] ได้เสนอแนะว่าเป็นศาสตร์ที่ใช้อธิบายการไหลของของเหลว และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของแข็ง ความหนืด (Viscosity) จึงเป็นความต้านทานของของเหลวต่อการไหล ความหนืดที่สูงขึ้นก็จะมีค่าความต้านทานต่อการไหลมากขึ้นด้วย ของเหลวธรรมดาสามารถที่จะแสดงค่าความหนืดสมบูรณ์ได้ ในขณะที่สารกระจายตัวที่มีส่วนผสมของสารหลายตัวจะมีคุณสมบัติการไหลที่ซับซ้อน และไม่สามารถแสดงค่าความหนืดค่าเดียวได้ โดยลักษณะการไหลของของไหลโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ 2 แบบ ดังนี้

1) Newtonian fluid เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆของไหลจะมีค่าความหนืดเป็นค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือนหรือความเร็วในการกวนไม่ว่าจะกวนเร็วหรือกวนช้า ตัวอย่างเช่น น้ำ น้ำมัน น้ำเชื่อม น้ำผลไม้ เป็นต้น

เมื่อนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นเฉือน (Shear stress) และ อัตราความเค้นเฉือน (Rate of shear) ที่หลายๆค่าจะได้กราฟไหล (Rheogram) ที่เป็นเส้นตรงออกจากจุดกำเนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟการไหลแบบ Newtonian [23]

2) Non newtonian fluid เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ไม่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆของไหลมีค่าความหนืดเป็นค่าไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนหรือความเร็วในการกวนลักษณะการไหลแบบนี้แบ่งเป็น 4 แบบ

2.1) Pseudoplastic ของไหลที่มีค่าความหนืดลดลง เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน หรือยิ่งกวนเร็ว ยิ่งไหลง่าย พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น Shear thinning

2.2) Dilatant ของไหลที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน หรือยิ่งกวนเร็ว ยิ่งหนืด พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น Shear thickening

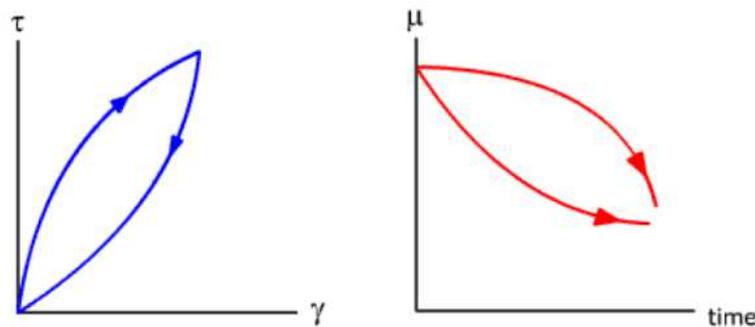
2.3) Bingham fluid ของไหลที่เมื่อมีแรงกระทำสูงมากจนถึงจุดที่เรียกว่า Yield value หรือ Yield stress จึงจะเกิดลักษณะการไหลแบบ Newtonian fluid

2.4) Plastic ของไหลที่เมื่อมีแรงกระทำสูงพอเพื่อเอาชนะค่าความเค้น ณ จุด Yield stress ถึงจะเริ่มไหลได้ และจะไหลแบบ Pseudoplastic

2.1.4.1 การไหลแบบธิโซโทรปี (Thixotropy flow)

ของเหลวที่มีการไหลแบบ Plastic และ Pseudoplastic บางชนิด เมื่อลดแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่จะทำให้อัตราเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ลดลงอย่างช้าๆ โดยไม่เป็นไปตามความโค้งของกราฟเส้นขาขึ้น แต่จะเป็นไปตามความโค้งของกราฟขาลง ซึ่งแตกต่างจากของเหลวที่มีการไหลแบบ Newtonian ที่มีกราฟขาขึ้น และขาลงทับกัน หากพิจารณาค่าความหนืดจะพบว่าลดลงตามระยะเวลา

ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างที่ถูกทำลายจากแรงที่ให้ และไม่สามารถสร้างโครงสร้างนั้นกลับคืนได้ทันทีเมื่อมีแรงกระทำน้อยลง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ธิโซโทรปี (Thixotropy) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟการไหลแบบ Thixotropy [23]

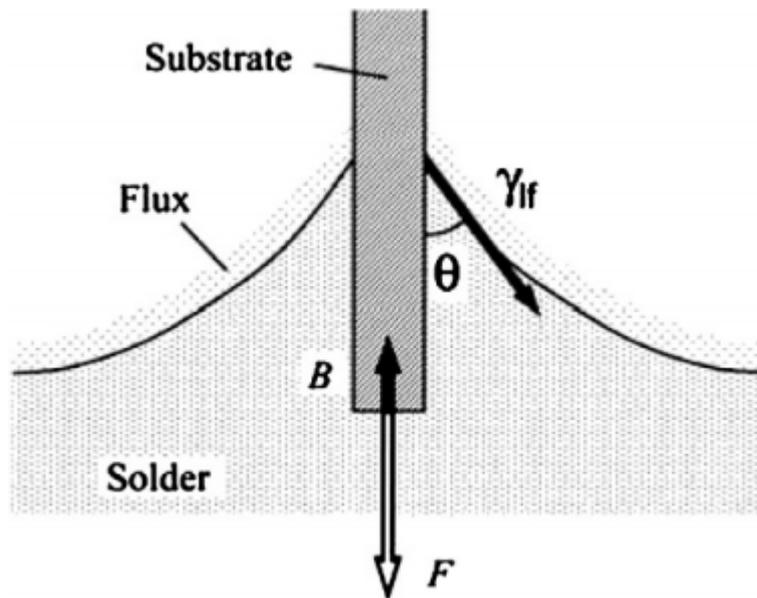
2.1.5 การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นรอง

การเปียกเป็นคุณสมบัติของของเหลวที่แผ่กระจายบนของแข็ง หรือระหว่างหยดโลหะกับแผ่นรอง โดยทั่วไปความสามารถในการเปียกจะวัดได้จากระดับของการกระจายตัว (Degree of wetting) และ อัตราของการกระจายตัว (Rate of wetting) โดยระดับของการกระจายตัวสามารถวัดได้จากมุมเปียก (Contact angle) ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างของแข็ง และของเหลว ซึ่งมุมเปียกจะขึ้นอยู่กับพื้นผิว และพลังงานระหว่างพื้นผิวที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่ร่วมกันระหว่างของแข็งกับของเหลว อัตราการกระจายตัวชี้ให้เห็นว่าของเหลวจะเปียก และกระจายตัวได้รวดเร็วเพียงใด โดยมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัยเช่น สภาพแวดล้อมของระบบ ความหนืดของของเหลว และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่พื้นสัมผัสระหว่างของแข็งกับของเหลว เป็นต้น ซึ่งวิธี Wetting balance เป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ในการคำนวณความสามารถในการเปียก ในวิธีนี้จะทำการวัดแรงบนแผ่นรองขณะที่จุ่มลงในอ่างหลอมโลหะบัดกรี (Solder bath) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ตัวแปรที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการเปียกได้แก่ เวลาการกระจายตัว (Wetting time) และ แรงการกระจายตัว สามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์ของกราฟ Force-time รูปที่ 2.13 ซึ่งแรงการกระจายตัวสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$F = P\gamma_{lf} \cos\theta - B \quad (2.1)$$

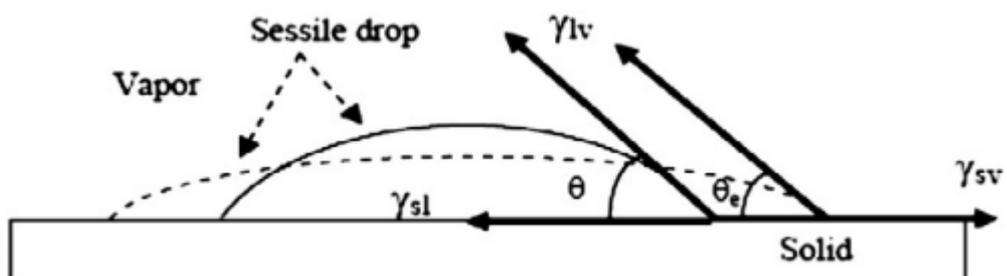
โดยที่	F	คือ แรงการกระจายตัว
	θ	คือ มุมเปียก
	P	คือ เส้นรอบวงของแผ่นรอง
	B	คือ แรง Buoyancy

โดย P และ B เป็นค่าคงที่ ขณะที่ F และ θ สามารถวัดได้จากการทดสอบ และ γ_{lf} สามารถหาได้จากสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.12 เทคนิค Wetting balance [24]

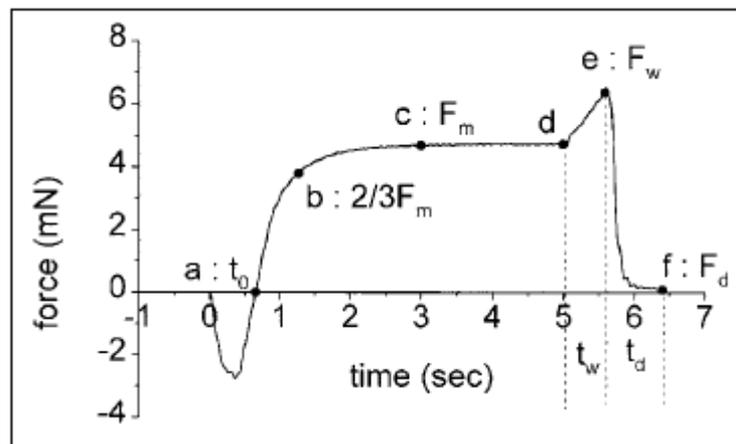
เมื่อหยดของโลหะบัดกรีอยู่บนพื้นผิวของแผ่นรอง หยดของโลหะบัดกรีจะกระจายตัวไปบนพื้นผิวของของแผ่นรอง และจะกลับมาเริ่มทำมุมกับพื้นผิวของของแผ่นรองอีกครั้งหลังจากหยุดกระจายตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การกระจายของหยดโลหะบัดกรีบนพื้นผิวของแผ่นรอง [24]

2.1.6 Wetting curve

จากรูปที่ 2.14 แสดง Wetting curve ที่ใช้เพื่อคำนวณแรงตึงผิวของโลหะบัดกรี โดยมีแกน x เป็นเวลาในหน่วยวินาที (s) และแกน y เป็นแรงในหน่วยมิลลินิวตัน (mN) ซึ่งมีค่าที่ใช้เพื่อบ่งชี้ความสามารถในการเปียก 3 ค่าได้แก่ เวลาในการเปียก (Wetting time) แรงการเปียกหลังจากเวลาจำเพาะ (Wetting force achieved after a specific time) และแรงเปียกสูงสุด (The maximum wetting force) โดยเวลาที่เริ่มจุ่มชิ้นงานลงในอ่างหลอมโลหะบัดกรีจนท่วม 90 องศา หรือช่วงเวลาที่แรงเปียกกลับมาเป็นค่าเท่ากับศูนย์ คือเวลาการเปียก (Wetting time) แรงการเปียกหลังจากเวลาจำเพาะ (Wetting force achieved after a specific time) เป็นค่าที่มีความสำคัญในทางปฏิบัติมากที่สุดเนื่องจากโดยทั่วไปเวลาจำเพาะ (Specific time) เป็นเวลาที่เปรียบได้กับเวลาจริงในการบัดกรี และแรงเปียกสูงสุด (The maximum wetting force) เป็นแรงที่สามารถวัดได้เมื่อชิ้นงานที่ถูกดึงออกจากอ่างหลอมโลหะบัดกรีอยู่ในสภาวะสมดุล และแรงที่วัดได้มีค่าคงที่ ซึ่งแรงเปียกสูงสุดจะสามารถนำมาคำนวณมุมเปียก (Contact angle) ถ้ารู้ค่าของแรงตึงผิว หรือสามารถหาค่าแรงตึงผิวจากการวัดมุมเปียกภายใต้สภาวะสมดุล และในสภาวะสมดุลแรงเปียก (Wetting force: F) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1 ในหัวข้อที่ 2.1.5



รูปที่ 2.14 Wetting curve [25]

ความชันของเส้นโค้งแรงเปียกที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของแรงลอยตัว (Buoyancy force) จากการดึงชิ้นงานออกจากอ่างหลอมโลหะบัดกรี และจุดสูงสุดแสดงให้เห็นว่าโลหะบัดกรีได้ไหลไปตามด้านข้างของชิ้นงานตัวอย่างไปจนถึงขอบท้ายของชิ้นงาน และมุมสัมผัสจะลดลงไปเป็นศูนย์ หลังจากนั้นผิวสัมผัสระหว่างโลหะบัดกรี และชิ้นงานตัวอย่างจะเปลี่ยนจากขอบด้านข้างถึงขอบด้านล่างของชิ้นงาน และการทดสอบจะสิ้นสุดลงเมื่อเกิดคอคอดของโลหะบัดกรีจำไปสู่การแยกออกจากกันของโลหะบัดกรีและชิ้นงาน

2.1.6 การแพร่ของอะตอมและการแข็งตัวของโลหะ

2.1.6.1 การแพร่ของอะตอม

การแพร่ของอะตอม (Diffusion of atom) เป็นการเคลื่อนที่ของอะตอมจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ทั้งในสภาพของแข็ง ของเหลว และก๊าซ การแพร่ในสภาพของเหลว และก๊าซนั้นอาจเกิดขึ้นได้ง่าย แต่การแพร่ในสภาพของแข็งนั้นจะต้องอาศัยตัวช่วยกระตุ้นให้เกิดการแพร่ อันได้แก่ ความร้อน ยิ่งมีพลังงานความร้อนมากก็จะช่วยให้เกิดการแพร่ได้ดีขึ้น อัตราการเคลื่อนที่ของอะตอมมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิหรือพลังงานความร้อน ดังสมการของ Arrhenius (สมการที่ 2.2)

$$Rate = C_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (2.2)$$

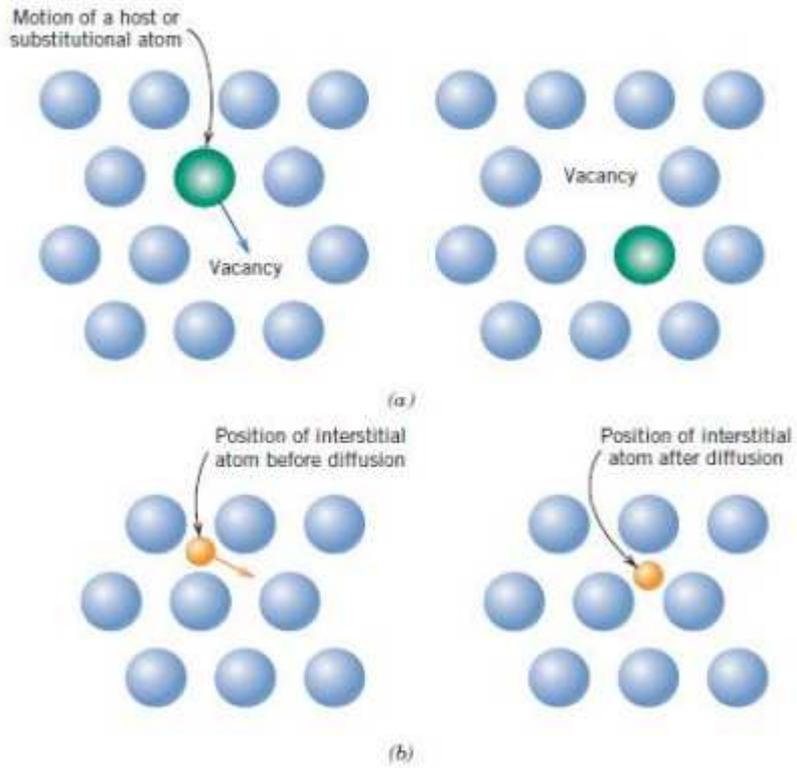
โดยที่	C_0	คือ ค่าคงที่ของอัตราความเร็ว
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (1.987 cal/mol.k)
	T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (k)
	Q	คือ พลังงานกระตุ้น (cal/mol)

2.1.6.2 กลไกการแพร่ (Diffusion mechanisms)

การแพร่ของอะตอมของโลหะบริสุทธิ์เป็นการเคลื่อนที่ของอะตอมของตัวมันเองจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง กระบวนการแพร่แบบนี้เราเรียกว่า การแพร่โดยตัวเอง (Self-diffusion) ขณะที่กระบวนการแพร่โดยอะตอมที่ต่างชนิดกันหรืออะตอมของวัสดุที่ต่างกันมีการแพร่ที่สำคัญอยู่ 2 อย่างอย่างคือ

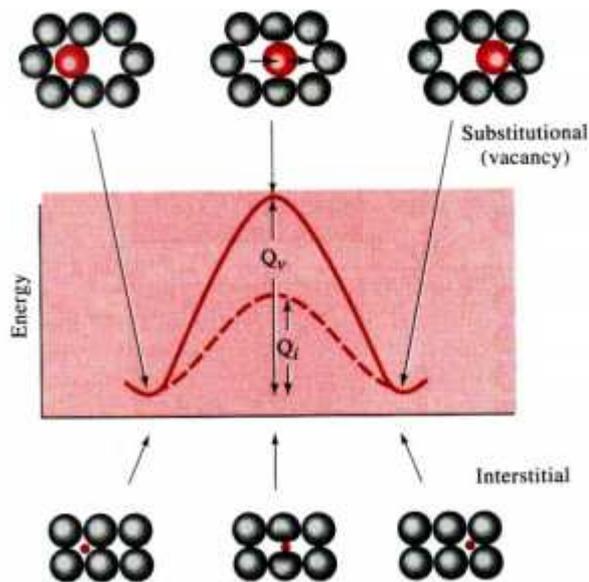
1) การแพร่แบบช่องว่าง (Vacancy diffusion) การแพร่แบบช่องว่างนี้จะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอะตอมจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง เมื่อมีพลังงานกระตุ้นอะตอมจะเกิดการสั่นสะเทือน และเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่ง ซึ่งการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งสู่ที่ว่างอีกตำแหน่ง จะทำให้เกิดช่องว่างขึ้นจึงเรียกการเคลื่อนที่นี้ว่า การเคลื่อนที่แบบช่องว่าง ดังรูปที่ 2.15 (a)

2) การแพร่แบบแทรกที่ (interstitial diffusion) เป็นการแพร่ที่เกิดกับอะตอมที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่ไปแทรกอยู่ตามซอกระหว่างอะตอมที่มีขนาดใหญ่กว่า ดังรูปที่ 2.15 (b)



รูปที่ 2.15 (a) กลไกการแพร่แบบช่องว่าง (b) กลไกการแพร่แบบแทรกที่ [26]

พลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ เป็นพลังงานที่ใช้ในการทำให้อะตอมเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.16 พลังงานที่ใช้ทำให้อะตอมเคลื่อนที่จะต้องสูงกว่าพลังงานแบร์รี (Energy barriers) ซึ่งเรียกพลังงานนี้ว่า พลังงานกระตุ้น (activate energy, Q) โดยพลังงานนี้จะได้จากการให้ความร้อนแก่อะตอม โดยปกติแล้วพลังงานที่ใช้กระตุ้นในกลไกการแพร่แบบช่องว่างจะมากกว่ากลไกการแพร่แบบแทรกที่



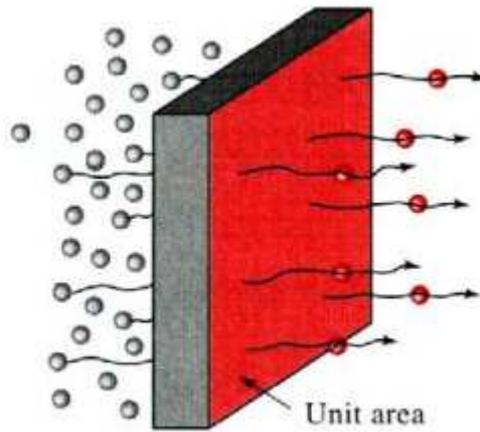
รูปที่ 2.16 พลังงานที่ใช้กระตุ้น (Activate energy, Q) [26]

2.1.6.3 อัตราการแพร่ (Rate of diffusion)

อัตราการแพร่ของอะตอมสามารถวัดเป็นฟลักซ์ (Flux, J) ซึ่งหมายถึง อัตราการถ่ายโอนของอะตอมจากที่ที่มีความเข้มข้นสูงไปยังที่ที่มีความเข้มข้นต่ำ (ดังรูปที่ 2.17) โดยหาออกมาเป็นจำนวนอะตอมที่แพร่ผ่านระบบเป็นหน่วยพื้นที่ตามกฎข้อที่หนึ่งของ Fick คือ (สมการที่ 2.3)

$$J = -D \left(\frac{\Delta c}{\Delta x} \right) \quad (2.3)$$

โดยที่ J	คือ ฟลักซ์ (อะตอม / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)
D	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm^2/s)
$\frac{\Delta c}{\Delta x}$	คือ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามระยะทาง (อะตอม / $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}$)

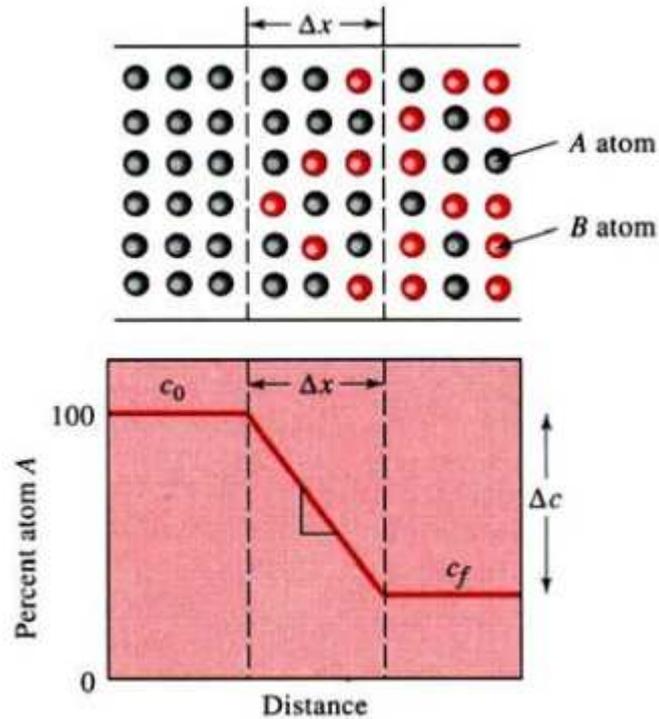


รูปที่ 2.17 ฟลักซ์ขณะเกิดการแพร่หาจากจำนวนของอะตอมที่ซึมผ่านต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา [26]

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแพร่ของอะตอม ประกอบไปด้วย

- 1) ความเข้มข้นหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามระยะทาง (Concentration gradient)

ความเข้มข้นหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามระยะทางเป็นความสัมพันธ์ของปริมาณความเข้มข้นของอะตอม (Δc) ที่เปลี่ยนไปตามระยะทาง (Δx) ดังรูปที่ 2.18 จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุ 2 ชนิดที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกันมาสัมผัสกันหรือเกิดจากก๊าซหรือของเหลวที่มีความเข้มข้นมากๆ อยู่ล้อมรอบวัสดุแข็ง แล้วเกิดการแพร่หรือถ่ายเทอะตอมจากที่ที่มีความเข้มข้นสูงไปยังที่ที่มีความเข้มข้นต่ำ



รูปที่ 2.18 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะตอมที่เกิดการแพร่ตามระยะทาง [26]

2) อุณหภูมิ และสัมประสิทธิ์การแพร่

สัมประสิทธิ์การแพร่จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ตามสมการของ Arrhenius ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$D = -D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (2.4)$$

โดยที่	Q	คือ พลังงานกระตุ้น (cal/mol)
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (1.987 cal/mol.k)
	T	คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (k)
	D_0	คือ ค่าคงที่ของระบบการแพร่

เมื่ออุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และฟลักซ์ของอะตอมก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงๆอัตราการแพร่จะเกิดสูงขึ้น เนื่องจากมีพลังงานกระตุ้นที่สูง ด้วยเหตุนี้กระบวนการแพร่ที่กระทำกับโลหะหรือเซรามิกจึงกระทำที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง

3) ชนิดของโครงสร้างผลึก

โครงสร้างผลึกแต่ละชนิดจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ที่แตกต่างกัน เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการคาร์บอนในเหล็กที่มีโครงสร้างแบบ BCC จะมีค่าเท่ากับ $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่อุณหภูมิ 500°C ซึ่งมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนในเหล็กที่มีโครงสร้างแบบ FCC ที่มีค่า

เท่ากับ $(5 \times 10^{-15}) \text{ m}^2/\text{s}$ ที่อุณหภูมิ 500°C ที่เป็นเช่นนี้เพราะโครงสร้างผลึกแบบ FCC จะมีค่า APF (0.74) มากกว่าโครงสร้างผลึกแบบ BCC (0.68)

4) ชนิดของกลไกการแพร่

กลไกการแพร่แบบแทรกที่หรือแบบช่องว่าง จะส่งผลต่อสภาพของการแพร่ โดยอะตอมขนาดเล็กสามารถแพร่แบบแทรกที่ในโครงสร้างของผลึกที่มีขนาดใหญ่ได้ เช่น อะตอมของคาร์บอนในโครงสร้าง BCC หรือ FCC ของเหล็กกล้า ส่วนทอแดงจะแพร่เข้าไปในโครงสร้างผลึกของอลูมิเนียมแบบกลไกช่องว่าง เพราะอะตอมของธาตุทั้งสองมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน

5) เวลาในการแพร่

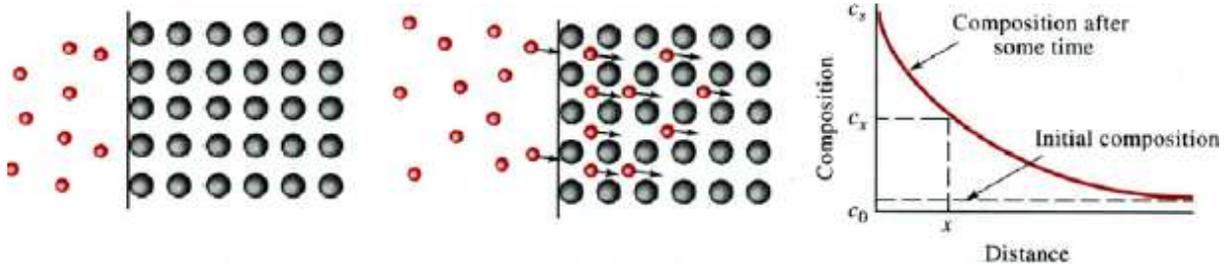
กลไกการเกิดการแพร่ต้องอาศัยเวลา เพราะหน่วยของฟลักซ์เป็นจำนวนอะตอม/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ดังนั้นหากมีอะตอมจำนวนมากก็ต้องใช้เวลานานขึ้น อย่างไรก็ตามแล้วแต่เวลาในการแพร่สามารถลดลงได้ หากเราเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น

การแพร่ในสถานะไม่คงตัว (Non-steady state)

การแพร่ในสถานะไม่คงตัว จะเป็นกระบวนการแพร่ความเข้มข้นของอะตอมจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น เหล็กที่มีอะตอมของคาร์บอนแพร่เข้าไปบริเวณผิวเมื่อเวลาผ่านไปนานเข้าความเข้มข้นของอะตอมที่ผิวของเหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการแพร่ในสถานะไม่คงตัวนี้จะนำไปตามกฎข้อที่สองของ Fick (Fick's second law) ดังสมการที่ 2.5

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2.5)$$

โดยที่	C_s	คือ ความเข้มข้นของอะตอมที่ผิวของวัสดุ
	C_0	คือ ความเข้มข้นของอะตอมที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุก่อนเกิดการแพร่
	C_x	คือ ความเข้มข้นของอะตอมที่ระยะห่างจากผิว x ที่เวลา t
	D	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอม
	X	คือ ระยะทางจากผิว
	t	คือ เวลา
	erf	คือ error function ทางคณิตศาสตร์
		ความเข้มข้นของอะตอมเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงได้แสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การแพร่ของอะตอมผู้ผิวของวัสดุ ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของ Fick [26]

2.1.6.4 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ

กระบวนการแข็งตัวของโลหะหรือโลหะผสมในกระบวนการหล่อโลหะนั้น นับว่ามีความสำคัญมากต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เนื่องจากโลหะส่วนใหญ่จะถูกหลอม และหล่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จรูป

โดยทั่วๆไป การแข็งตัว (Solidification) ของโลหะหรือโลหะผสมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ คือ

1) การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ซึ่งเป็นขั้นตอนการเกิดนิวเคลียส (nuclei) ที่อยู่ตัวในโลหะที่หลอมเหลว

2) การเติบโตของนิวเคลียสไปเป็นผลึก และเกิดเป็นโครงสร้างของเกรน (grain) โดยนิวเคลียสเล็กๆ ในโลหะที่หลอมเหลวจะค่อยๆ เติบโตขึ้นเป็นผลึกจนกระทั่งผลึกเหล่านี้จะต่อกันเป็นโครงสร้างของเกรน บริเวณเกรน บริเวณที่สัมผัสระหว่างเกรนจะถูกเรียกว่า ขอบเขตของเกรน (Grain boundaries)

รูปร่างลักษณะของแต่ละเกรนที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการแข็งตัวจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแตกต่างของอุณหภูมิ (thermal gradient) คือ ปัจจัยที่สำคัญ

2.1.3.5 ประเภทของกลไกการเกิดนิวเคลียสที่อยู่ที่อยู่ในโลหะที่หลอมเหลว

กลไกของการเกิดนิวเคลียสซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งเล็กๆ ที่อยู่ในโลหะที่หลอมเหลวมี 2 กลไก ดังนี้ คือ

1) กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous nucleation) เป็นกลไกที่ง่ายที่สุดมักจะถูกนำมาพิจารณาก่อน กล่าวคือ กลไกนี้มักจะเกิดขึ้นในกระบวนการการแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์ ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของจุดเยือกแข็งสมดุล (Equilibrium freezing) ของโลหะนั้นๆ นิวเคลียสที่เกิดขึ้นโดยกลไกนี้ จะเกิดจากการเคลื่อนตัวของอะตอมโลหะอย่างช้าๆ มาเกิดพันธะระหว่างกันจนกระทั่งได้ขนาดที่อยู่ตัว เรียกว่า นิวเคลียส (nucleus) ซึ่งจะอยู่ตัว และเกิดเป็นผลึกต่อไป

พลังงานที่เกี่ยวข้องในกลไกของการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงพลังงาน 2 ชนิด คือ

1.1) พลังงานอิสระเชิงปริมาตร (Volume หรือ Bulk free energy; ΔG_v) ซึ่งพลังงานส่วนนี้จะให้ออกมาเมื่อมีการแข็งตัวของโลหะที่หลอมเหลว ซึ่งมีค่าเป็นลบ

1.2) พลังงานอิสระเชิงพื้นผิว (Surface free energy; ΔG_s) เป็นพลังงานที่ต้องการเพื่อทำให้เกิดของแข็งใหม่ของอนุภาคของแข็งนิวเคลียส ซึ่งจะมีค่าเป็นบวก

2) กระบวนการเกิดนิวคลีโอแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous nucleation) เป็นกลไกที่นิวคลีโอเกิดขึ้นภายในโลหะที่หลอมเหลวบนผิวของภาชนะบรรจุสิ่งเจือปน หรือวัสดุอื่น ซึ่งพลังงานอิสระที่ต้องการเพื่อทำให้เกิดนิวคลีโอเกิดขึ้นภายในโลหะที่หลอมเหลวบนผิวของภาชนะบรรจุสิ่งเจือปน หรือวัสดุอื่น ซึ่งพลังงานอิสระที่ต้องการเพื่อทำให้เกิดนิวคลีโอที่อยู่ตัวนั้นจะต่ำกว่าที่ต้องการในกลไกของกระบวนการเกิด นิวคลีโอแบบเอกพันธ์ ดังนั้น จึงต้องการปริมาณ Undercooling ไม่สูงมากนัก และโดยทั่วไปเรามักจะพบว่ากระบวนการหล่อโลหะในอุตสาหกรรม มักจะทำที่ Undercooling ไม่สูงมาก คือระหว่าง $0.1-10^{\circ}\text{C}$ จึงอาจกล่าวได้ว่า การเกิดนิวคลีโอในอุตสาหกรรมหล่อโลหะมักจะเป็นแบบวิวิธพันธ์มากกว่าแบบเอกพันธ์

2.1.7 ทฤษฎีการดูดซึมของอนุภาคนาโน [27]

การเติมอนุภาคนาโนลงไปโลหะบัดกรีนั้นจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเกรนของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยการลดพลังงานพื้นผิวของเกรนของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นหลังจากการแข็งตัว โดยสามารถอธิบายได้จากการดูดซึมของอนุภาคนาโน ซึ่งพลังงานพื้นผิวของเกรนของสารประกอบเชิงโลหะแสดงดังสมการที่ 2.6

$$\sum_N \gamma_c^N S_N = \sum_N \left(\gamma_0^N - RT \int_0^c \frac{\Pi^N}{c} dc \right) S_N \quad (2.6)$$

$$\sum_N \gamma_c^N S_N = \sum_N \gamma_0^N S_N - RT \sum_N S_N \int_0^c \frac{\Pi^N}{c} dc \rightarrow \min \quad (2.7)$$

โดยที่	C	คือ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน
	γ_0^N	คือ แรงแต่งผิวของอนุภาค Cu_6Sn_5 ตัวที่ N ที่ปราศจากการดูดซึมจากอนุภาคนาโน
	γ^N	คือ แรงแต่งผิวของอนุภาค Cu_6Sn_5 ตัวที่ N
	γ_c^N	คือ แรงแต่งผิวของอนุภาค Cu_6Sn_5 ตัวที่ N ที่ถูกดูดซึมจากอนุภาคนาโน
	S_N	คือ พื้นที่ของอนุภาค Cu_6Sn_5 ตัวที่ N
	Π^N	คือ ปริมาณการดูดซึมทั้งหมดของอนุภาคนาโนที่อนุภาค Cu_6Sn_5 ตัวที่ N
	N	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส
	T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)

กำหนดให้ปริมาตรของสารประกอบเชิงโลหะมีค่าคงที่ พลังงานพื้นผิวของระนาบต้องมีค่าต่ำที่สุดในสภาวะสมดุล ในสมการที่ 2.7 $\sum_N \gamma_0^N S_N$ ถูกสมมุติให้มีค่าคงที่เนื่องจากไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ดังนั้น $\sum_N S_N \int_0^c \frac{\Pi^N}{c} dc$ ต้องมีค่ามากที่สุด เพื่อให้พลังงานพื้นผิวของเกรนของสารประกอบเชิงโลหะมีค่าต่ำที่สุด

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี

จุดหลอมเหลวถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาโลหะบัดกรีเพื่อนำมาใช้กับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ในปัจจุบันอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการผลิตถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับอุณหภูมิ 456 K ซึ่งเป็นอุณหภูมิจุดยูเทคติกของ Sn-Pb ถ้าจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบที่ถูกพัฒนามีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการผลิตทำให้ผู้ประกอบการจำเป็นต้องจัดหาอุปกรณ์ในการผลิตใหม่ [29] ดังนั้นในการพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน อนุภาคนาโนที่ใช้ไม่ควรทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้น

จากการสำรวจงานวิจัยต่างๆพบว่า ในการทำโลหะบัดกรีเชิงประกอบโดยการเติมอนุภาคนาโนลงไปในโลหะบัดกรีจะมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีในหลากหลายลักษณะ เช่น ในงานวิจัยของ Nai และคณะ [30,31] ที่ศึกษาอิทธิพลของของอนุภาคนาโน MWCNTs ต่อจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag ด้วยเครื่อง DSC พบว่าการเติมอนุภาคนาโน MWCNTs ไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Shen และคณะ [32] ได้ศึกษาจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-3.5Ag-ZrO₂ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าจุดหลอมเหลวโลหะบัดกรี Sn-Ag ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเติมอนุภาคนาโน ZrO₂ ขณะที่งานวิจัยของ Kumar และคณะ [33,34] พบว่าจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีที่เติม SWCNT มีอุณหภูมิลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน การเปลี่ยนแปลงของจุดหลอมเหลวสามารถอธิบายได้จากพลังงานพื้นผิวที่มีพลังงานสูง และปฏิกิริยาผิวสัมผัสที่ไม่เสถียรของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Liu และคณะ [8] ที่พบว่าจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-3.8Ag-0.7Cu มีอุณหภูมิลดลงเมื่อเติมอนุภาคนาโน SiC โดยจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนมีอุณหภูมิต่ำกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 1 K ซึ่งคาดว่า การลดลงของจุดหลอมเหลวเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของพื้นผิวที่ไม่เสถียรของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน เนื่องจากการเติมอนุภาคนาโน SiC ที่มีพลังงานพื้นผิวอิสระสูง อย่างไรก็ตามในบางงานวิจัยพบว่าการเติมอนุภาคนาโนลงในโลหะบัดกรีมีผลให้จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้น เช่น El-Daly และคณะ [7] พบว่าการเติมอนุภาคนาโน SiC ลงในโลหะบัดกรี Sn-1.0Ag-0.5Cu เพื่อทำให้เป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบ ทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Tay และคณะ [35] ในการทำโลหะบัดกรีเชิงประกอบโดยเติมอนุภาคนาโน Co ลงในโลหะบัดกรี Sn-3.8Ag-0.7Cu แล้วทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้น และผลการวิจัยของ Tsao [36] ก็พบเช่นเดียวกันว่าจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag-0.5Cu เพิ่มขึ้น และช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวกว้างขึ้น เมื่อเติมอนุภาคนาโน TiO₂

2.2.2 ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นรอง

การเติมอนุภาคนาโนลงไปในโลหะบัดกรี พบว่ามีผลกระทบต่อความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นรอง ทำให้ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของอนุภาคนาโนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคนาโนที่เติมเข้าไปทำให้ความหนืดของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้น และ

อนุภาคนาโนจะเป็นตัวช่วยการแพร่กระจายของหยดโลหะเหลวบนแผ่นรอง อย่างไรก็ตามการเติมอนุภาคนาโนในปริมาณเล็กน้อยสามารถปรับปรุงการเปียกของโลหะบัดกรีกับแผ่นรองได้ ซึ่งยังไม่มีการวิจัยใดที่สามารถอธิบายเหตุผลของปรากฏการณ์ได้อย่างชัดเจน เช่น งานวิจัยของ Tai และคณะ [37] พบว่า โลหะบัดกรีเชิงประกอบ Sn-0.7Cu ที่เติมอนุภาคนาโน Ag ในปริมาณ 0.5 wt% มีความสามารถในการเปียกที่ดีกว่าโลหะบัดกรี Sn-0.7Cu อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนมีมากขึ้น ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีเชิงประกอบบนแผ่นรองทองแดงมีค่าที่ลดลง งานวิจัยของ Yue และคณะ [38] พบว่าการเติมอนุภาคนาโน Fe_2O_3 ในปริมาณ 0.2-1 wt% ลงในโลหะบัดกรี Sn-1.0Ag-0.7Cu สามารถช่วยปรับปรุงความสามารถในการเปียก เมื่ออนุภาคนาโน Fe_2O_3 ที่ผสมอยู่ในโลหะบัดกรีมีปริมาณไม่เกิน 0.4 wt% และเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโน Fe_2O_3 มีมากกว่า 0.4 wt% ส่งผลให้ความสามารถในการเปียกมีค่าลดลง

2.2.3 ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีแบบครีม

กระบวนการพิมพ์ถือว่ามีสำคัญในอุตสาหกรรมประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากข้อบกพร่องส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้น เช่น การทรุดตัว (Slumping) และ การเกิดบริดจ์ (Bridging) มีผลมาจากความความผิดพลาดในกระบวนการพิมพ์ของโลหะบัดกรีแบบครีม โดยในการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กมีความจำเป็นต้องลดขนาดรูของ Stencil ให้มีขนาดเล็กลงส่งผลให้เกิดการอุดตันในรูของ Stencil ได้ง่ายขึ้น และทำให้เกิดการส่งผ่านที่ไม่สมบูรณ์ของโลหะบัดกรีแบบครีมไปยังแผ่น PCB ซึ่งในงานวิจัยของ Durairaj และคณะ [39] ได้กล่าวไว้ว่ากระบวนการพิมพ์จะประกอบไปด้วยขั้นตอน 4 ขั้นตอน ได้แก่ การวางก๊อนโลหะบัดกรีแบบครีมไว้ด้านหลังของ Squeegee ซึ่งเป็นแท่งไม้หุ้มด้วยยางไว้สำหรับปาดโลหะบัดกรี การเติมโลหะบัดกรีลงในรูของ stencil และการดึง stencil ออกเพื่อให้โลหะบัดกรีหลุดออกจากรูของ stencil โดยในงานวิจัยของ Durairaj และคณะ [40] พบว่าขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อความสามารถในการพิมพ์คือ ขั้นตอนการเติมโลหะบัดกรีลงในรูของ Stencil และขั้นตอนการดึง Stencil ออกเพื่อให้โลหะบัดกรีหลุดออกจากรูของ Stencil ซึ่งประสิทธิภาพของทั้ง 2 ขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับ Rheology ของโลหะบัดกรีแบบครีม ซึ่งในขั้นตอนการเติมโลหะบัดกรีลงในรูของ Stencil โลหะบัดกรีแบบครีมที่ถูกปาดด้วย Squeegee จะต้องมีค่าความหนืดต่ำเพียงพอที่จะไหลลงในช่องว่างของ Stencil และในขณะที่ดึง Stencil ออกความหนืดของโลหะบัดกรีต้องมีมากพอที่จะเอาชนะแรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) ของผนังด้านในของช่อง Stencil ซึ่งการพิมพ์ที่ดีที่สุดถูกจำกัดความจากปริมาตรของก๊อนโลหะบัดกรีที่ทำกรพิมพ์ลงบนแผ่นรอง คือ ปริมาตรของก๊อนโลหะบัดกรีที่ถูกพิมพ์ลงบนแผ่นรองควรมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรรูของ Stencil อย่างไรก็ตามในสภาพแวดล้อมการผลิตปริมาตรของก๊อนโลหะบัดกรีที่ถูกพิมพ์ลงบนแผ่นรองมักมีปริมาตรที่น้อยกว่าปริมาตรรูของ Stencil ที่มีสาเหตุมาจากแรงเชื่อมแน่นของโลหะบัดกรีกับผนังด้านในรูของ Stencil ดังนั้นถ้าสามารถควบคุมขั้นตอนทั้ง 2 ให้ดำเนินการอย่างมีประสิทธิภาพแล้วจะสามารถช่วยลดข้อบกพร่อง และเพิ่มประสิทธิภาพของผลผลิตได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ประสิทธิภาพการพิมพ์ยังถูกควบคุมด้วยจำนวนตัวแปรของกระบวนการพิมพ์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ เครื่องพิมพ์ Stencil สภาวะแวดล้อม และโลหะบัดกรีแบบครีม โดยตัวแปรบางตัวสามารถที่จะปรับเปลี่ยนค่าได้ ตัวอย่างเช่น Stencil ขณะที่คุณสมบัติของโลหะบัดกรีแบบครีม เช่น ความหนืดจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในช่วงวัฏจักรการพิมพ์

2.2.4 สารประกอบเชิงโลหะ

กระบวนการที่สำคัญสำหรับการเชื่อมติดโลหะบัดกรี คือ การทำให้เกิดเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound, IMC) บริเวณรอยต่อของผิวโลหะ โดยมีหน้าที่เชื่อมติดระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นรอง อย่างไรก็ตามชั้นของสารประกอบเชิงโลหะที่หนาเกินไปจะส่งผลให้ Fatigue life ของรอยบัดกรีลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจทำให้เกิดการแตกหักภายในชั้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหรือตามแนวบัดกรีระหว่างโลหะบัดกรี และชั้นสารประกอบเชิงโลหะ [3,5] ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกันไม่ให้อายุการใช้งานของสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อมีการเติบโตที่มากเกินไป โดยในงานวิจัยของ Tang และคณะ [3] ได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน TiO_2 ต่อการเติบโตของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีของโลหะบัดกรี $\text{Sn-3.0Ag-0.5Cu-xTiO}_2$ พบว่าเมื่อเริ่มการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะ TiO_2 จะอยู่ในรูปของอนุภาคนาโนขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่ในหยดโลหะบัดกรี การมีอยู่ของอนุภาคนาโน TiO_2 จะลดพลังงานแบริร์ของการเกิดนิวเคลียส Cu_6Sn_5 ทำให้อัตราการเกิดนิวเคลียส (Nucleation rate) เพิ่มขึ้น และทำให้เกรนของ Cu_6Sn_5 มีขนาดเล็กลง (Refine grain) ซึ่งเป็นการป้องกันการบ่มเกรน (Grain ripening) ของเฟสสารประกอบเชิงโลหะ ดังนั้นความแตกต่างระหว่างรัศมีเกรนของสารประกอบเชิงโลหะในรอยต่อของโลหะบัดกรีที่เติม TiO_2 จะมีขนาดเล็กกว่าในรอยต่อของโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติม TiO_2 นอกเหนือจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดนิวเคลียส และการทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง การเติมอนุภาคนาโนยังส่งผลต่อการยับยั้งการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อของโลหะบัดกรี $\text{Sn-3.0Ag-0.5Cu-xTiO}_2$ โดยสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีการดูดซึมของอนุภาคนาโน TiO_2 นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดที่แตกต่างกันของอนุภาคนาโนที่เติมลงในโลหะบัดกรีจะมีผลต่อขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณรอยบัดกรี ซึ่งในงานวิจัยของ Zhao และคณะ [41] ได้ศึกษาอิทธิพลของขนาดของอนุภาคนาโน Fe_2O_3 ต่อการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-1.0Ag-0.5Cu โดยจะทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหลังจากการบัดกรี และหลังจากการบ่มเพาะความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 100, 200 และ 300 ชั่วโมงตามลำดับ จากผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยบัดกรีหลังการบัดกรีพบว่าขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีขนาดเล็กลงเมื่ออนุภาคนาโนที่เติมลงในโลหะบัดกรีมีขนาดเฉลี่ย 20 และ 50 nm แต่มีขนาดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมอนุภาคนาโนที่มีขนาด 200 nm ลงในโลหะบัดกรี โดยชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีขนาดเล็กที่สุดเมื่ออนุภาคนาโนมีขนาด 20 nm นอกจากนี้ความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่เติมอนุภาค Fe_2O_3 ขนาด 20 nm ยังมีขนาดเล็กกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐานในทุกช่วงเวลาการบ่มความร้อน อย่างไรก็ตามเมื่อเติมอนุภาค Fe_2O_3 ขนาด 200 nm ลงในโลหะบัดกรีพบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะมีขนาดใหญ่กว่าโลหะบัดกรีพื้นฐานในทุกช่วงเวลาการบ่มความร้อน จากปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่าอนุภาค Fe_2O_3 สามารถยับยั้งการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ แต่ประสิทธิภาพการยับยั้งการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่เติมอนุภาค Fe_2O_3 ขนาดเล็กกว่าจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าทั้งหลังการบัดกรี และหลังการบ่มความร้อน