

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีและหลักการ

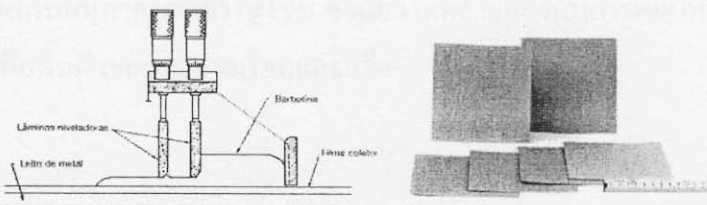
ในการเตรียมวัสดุผสมในงานวิจัยนี้อาศัยกระบวนการบดผสมเชิงกล เพื่อให้ได้ผงวัสดุผสมตามต้องการ ซึ่งกระบวนการบดผสมเชิงกลมีหลักการทำงานดังนี้

2.1.1 กระบวนการบดผสมเชิงกล (mechanical alloying, MA)

กระบวนการบดผสมเชิงกลมีจุดเด่นคือ ผงโลหะที่ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีการขยายตัวที่ดี ลดเวลาในการต้องขัดเคลาชิ้นงาน เป็นเทคนิคที่ใช้แก้ปัญหาของโลหะที่มีสถานะบางส่วนเป็นของเหลว ซึ่งไม่สามารถผลิตโลหะที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันได้ และช่วยลดความเสี่ยงอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นขณะใช้งาน เนื่องจากเป็นกระบวนการของโลหะผสมที่อุณหภูมิต่ำ (cold alloying process) ซึ่งเครื่องมือบดมีหลายชนิดได้แก่ szegvari attritor mill, spex vibratory mill, large diameter ball mill สำหรับเครื่องมือบดผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เครื่องบดแพลนารี

2.1.3 วิธีการผลิตโลหะพอรุน

วิธีการผลิตโลหะพอรุนทางด้านโลหะกรรมวัสดุผง สามารถทำได้หลายวิธี การฉีดขึ้นรูป (injection molding) การหล่อเทป (tape casting) หรือ “doctor blade” (รูปที่ 2.1) เป็นเทคนิคการผลิตแผ่นเซรามิกบางซึ่งถูกนำมาใช้ทำแผ่นโลหะพอรุน เทปโลหะพอรุนนี้นำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวกรองหรือแผ่นฐานโลหะสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง (SOFC) นอกจากนี้ยังมีการขึ้นรูปด้วย sponge และ pore-former method ใช้ในการขึ้นรูปอะลูมินา สำหรับงานกรองน้ำ

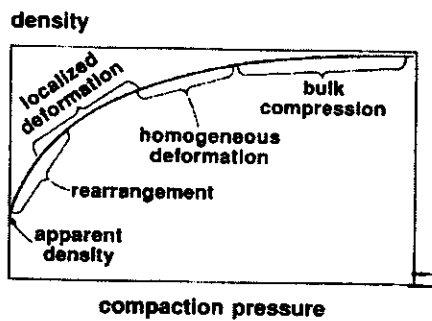


รูปที่ 2.1 การหล่อเทป (Tape Casting) [<http://www.fz-juelich.de>]

สำหรับวิธีการผลิตวัสดุพูนในงานงานวิจัยนี้ อาศัยวิธีการอัดขึ้นรูปและการอบ
ผืนึก (compacting and sintering)

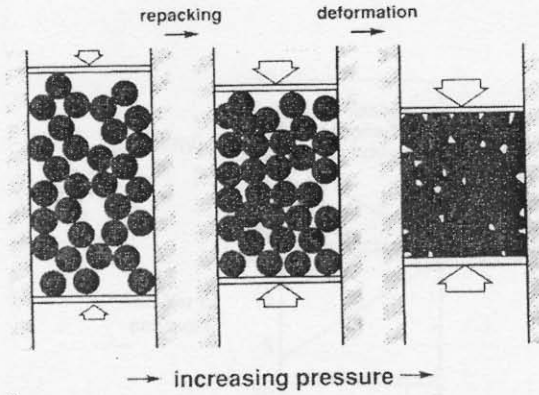
2.1.3.1 ทฤษฎีการอัดขึ้นรูป

อัตราการแน่นตัวเริ่มต้นมีค่าสูงตามความดันที่ให้ เมื่อการเปลี่ยนรูปดำเนินต่อไป
ความชันของเส้น โค้งความหนาแน่นต่อความดันลดลงซึ่งให้เห็นว่าอนุภาคเกิดความแข็งแรงแบบเวิร์ก
ฮาร์ดเดนนิ่ง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ภาพสเก็ทซ์แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับความดันในการอัดแน่น
แสดงขั้นตอนสำคัญและความสามารถในการอัดลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

ภาพลำดับขั้นตอนการอัดแน่นผงวัสดุในรูปที่ 2.3 แสดงหลักเกณฑ์ในการนิยาม
ขั้นตอนการอัดแน่น การอัดแน่นเริ่มต้นที่ความหนาแน่นประมาณเท่ากับความหนาแน่นปรากฏ มี
ช่องว่างระหว่างอนุภาคปรากฏโดยทั่วไป เมื่อมีการเข้่าความหนาแน่นสูงสุดที่ได้คือความ
หนาแน่นเกาะ ผงที่อยู่ในสภาวะหลอมยังคงมีช่องว่างอยู่ ไม่มีความแข็งแรง และจำนวนโคออร์ดิ
เนชัน (CN) หรือจำนวนอนุภาคที่สัมผัสอยู่รอบอนุภาคหนึ่งๆ มีค่าต่ำ เมื่อเริ่มให้ความดันการตอบ
รับแรกสุดคือการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาค โดยอนุภาคมีการเติมในรูพูนขนาดใหญ่ก่อนส่งผลให้
จำนวนการสัมผัสกับอนุภาครอบข้างสูงขึ้น ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการเข้่าหรือสั่นผง การจัดเรียง
ตัวใหม่ให้ผลดีเมื่อพื้นผิวของอนุภาคเรียบและแข็ง

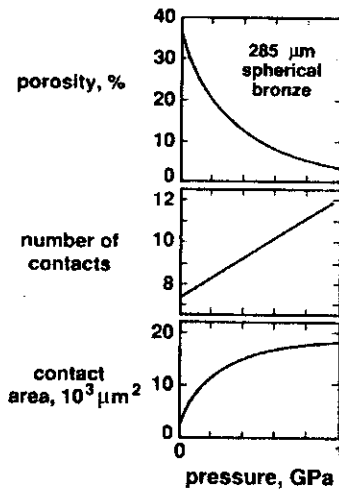


รูปที่ 2.3 ภาพแสดงขั้นตอนการอัดผงโลหะ เริ่มต้นมีการจัดเรียงตัวโดยลบลบปริมาตรระหว่างอนุภาค เมื่อแรงอัดสูงขึ้นการแน่นตัวเกิดจากการเสียรูปของอนุภาค

การเพิ่มความดันทำให้การจัดเรียงตัวของอนุภาคดีขึ้นและนำไปสู่การลดลงของความพรุน โดยการฟอร์มตัวของจุดสัมผัสใหม่ระหว่างอนุภาค แสดงด้วยข้อมูลในรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นกราฟของอนุภาคบรอนซ์ทรงกลมที่แสดงค่าความพรุนลดลงเมื่อจำนวนการสัมผัสและพื้นที่ที่สัมผัสระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น ที่จุดสัมผัสต่างๆ เริ่มมีการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น และที่ทุกจุดสัมผัสในวัฏจักรของการอัดแน่นมีการเก็บพลังงานยืดหยุ่นคงค้างไว้ในชิ้นงาน ความดันสูงทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นโดยการขยายบริเวณสัมผัสผ่านการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ดังนั้นความดันทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปจำกัดเฉพาะในส่วนสัมผัส ส่งผลให้เกิดความแข็งแรงจากการเปลี่ยนโครงสร้าง (เกิดความเครียด) หรือเวิร์กฮาร์ดคeniง และยอมให้จุดสัมผัสใหม่ฟอร์มตัวขึ้นที่ช่องว่างระหว่างอนุภาคที่ยุบตัวลง (collapse) บริเวณสัมผัสระหว่างอนุภาคปรากฏเป็นลักษณะแบนราบจากที่มีรูปโค้งตามเส้นรอบวง ความหนาแน่นกรีน (ρ) และเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนโค้ง (X) มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$X = D \left[1 - (\rho_0 / \rho)^{2/3} \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

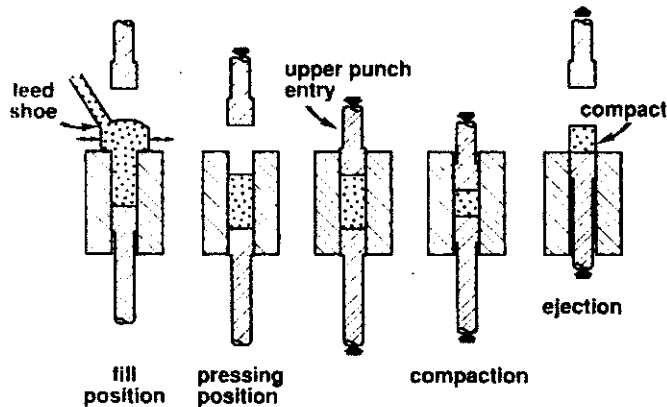
เมื่อ D เป็นขนาดอนุภาค และ ρ_0 เป็นความหนาแน่นเริ่มต้นที่สอดคล้องกับค่า $X = 0$ ความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมขึ้นกับปริมาณแรงเฉือนที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาค แรงเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นตรงกลางของจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคส่งผลให้มีการพัฒนาความแข็งแรงขึ้นในชิ้นงาน ความแข็งแรงหลังการอัดและก่อนการอบผนึก เรียกว่าหรือความแข็งแรงกรีน (green strength)



รูปที่ 2.4 การอัดแน่นผ่านแม่พิมพ์ของผงบรอนซ์ทรงกลม แสดงการเปลี่ยนแปลง ความพรุน จำนวนอนุภาคที่สัมผัสและพื้นที่สัมผัสเมื่อแรงอัดเพิ่มขึ้น

2.1.3.2 การอัดขึ้นรูปการอัดในแนวแกนเดียว (uniaxial compaction) ลำดับ ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของเครื่องมือขณะอัดแน่นแสดงในรูปที่ 2.5 โดยเริ่มต้นจากบรรจุผงโลหะลงในแม่พิมพ์และอัดผ่านพินช์ (punch) ซึ่งอาจเป็นพินช์ตัวเดียว (ส่วนใหญ่เป็นตัวบน) หรือพินช์ทั้งสองตัวคือทั้งตัวบน (upper punch) และตัวล่าง (lower punch) ทำให้เกิดแรงดันด้านข้าง ก่อนที่จะเทผงโลหะลงในแม่พิมพ์จะต้องเลื่อนพินช์ตัวบนออกมาด้านนอกก่อน ส่วนพินช์ตัวล่างอยู่ในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งเดิมในแม่พิมพ์ ถ้ามีการคำนวณปริมาณของผงโลหะจากความสูงของช่องว่างในแม่พิมพ์และความหนาแน่นปรากฏของผงจะทำให้ทราบปริมาณที่จะเติมลงในแม่พิมพ์ ผงโลหะถูกบรรจุลงแม่พิมพ์โดยอุปกรณ์สำหรับเติมผง (feed shoe) อาจผ่านกระบวนการสั่นและเขย่าลงสู่แม่พิมพ์ ตำแหน่งสำหรับเติมผงของพินช์ตัวล่างแตกต่างจากตำแหน่งที่ใช้ในขณะอัดเพื่อให้การอัดผงเข้าสู่ตรงกลางของแม่พิมพ์ ตำแหน่งของพินช์ตัวล่างสามารถปรับเปลี่ยนได้เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของผงทั่วทั้งชิ้น หลังการเติมผงโลหะแล้ว เลื่อนพินช์ตัวล่างให้อยู่ในตำแหน่งที่จะอัดและเลื่อนพินช์ตัวบนเข้าสู่แม่พิมพ์ การเพิ่มความดันให้กับผงโลหะอาจเลื่อนทั้งพินช์ตัวบนและตัวล่างเข้าหากัน หรือเลื่อนเฉพาะพินช์ตัวบนเพียงตัวเดียวในขณะที่พินช์ตัวล่างอยู่กับที่ ขั้นตอนสุดท้ายของการอัดแน่นผงวัสดุมีความดันสูงสุด และเมื่ออัดเสร็จพินช์ตัวบนถูกเลื่อนออกไป ใช้พินช์ตัวล่างเป็นตัวดันเอาชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และเริ่มวัฏจักรการอัดใหม่โดยการเติมผงโลหะลงแม่พิมพ์ ถึงแม้ว่าการเคลื่อนที่ของพินช์ตัวบนและตัวล่างในรูปที่ 2.5 จะดูไม่ยุ่งยาก แต่ในการทำงานจริงขั้นตอนการออกแบบแต่ละชิ้นส่วนมีความซับซ้อนมาก โดยปกตินิยมใช้แท่ง

แกนกลาง (core rod) เป็นตัวบอกตำแหน่งของพันธะด้านในหรือทำรูไว้ในชิ้นงาน โดยทั่วไปปัญหาเรื่องการสึกหรอของแม่พิมพ์เกิดขึ้นเมื่อต้องใช้แรงในการอัดสูง และสามารถควบคุมได้ด้วยการเติมสารหล่อลื่นผสมลงในผงวัสดุ เครื่องมือที่ใช้ส่วนใหญ่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ หรือซีเมนต์คาร์ไบด์เพื่อให้มีอายุการใช้งานนาน



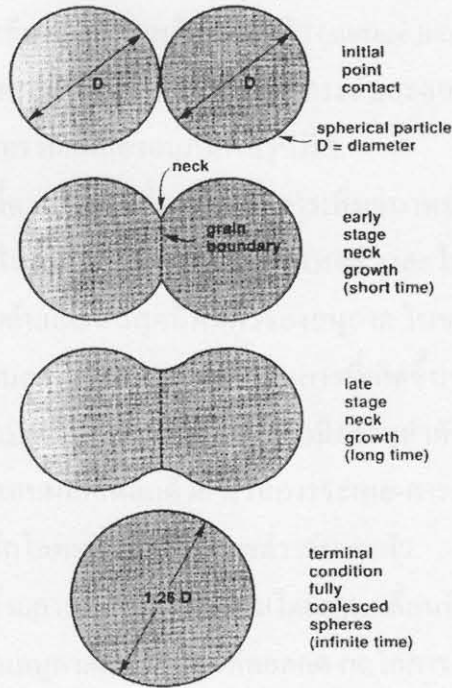
รูปที่ 2.5 ลำดับขั้นตอนการเคลื่อนที่ของเครื่องมือในวัฏจักรการอัดแน่นผง

2.2 ทฤษฎีการอบผนึก (Sintering theory)

2.2.1 แนวคิดพื้นฐาน (Basic concept)

พิจารณาบริเวณจุดสัมผัสของอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคในรูปที่ 2.6 (ภาพบนสุด) โดยทั่วไปในการอัดแน่นผงอนุภาคแต่ละอนุภาคมีบริเวณสัมผัสหลายกับอนุภาคอื่นได้หลายบริเวณ พันธะระหว่างอนุภาคที่บริเวณสัมผัสขยายโตขึ้นและรวมตัวกัน (merge) เมื่อการอบผนึกดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ที่แต่ละจุดสัมผัสของอนุภาคเกิดเป็นขอบเกรนโตขึ้นมาแทนที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของแข็งและไอ (solid-vapor interface) ดังรูปที่ 2.6 การอบผนึกเป็นเวลานานทำให้อนุภาคสองอนุภาครวมเป็นหนึ่งอนุภาคขนาดใหญ่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 1.26 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเมื่อเริ่มต้น

Two Sphere Sintering Model



รูปที่ 2.6 แบบจำลองการอบผนึกอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคที่พัฒนาพันธะระหว่างอนุภาคเริ่มต้นจากจุดสัมผัส การเพิ่มขนาดของคอคอคสร้างขอบเกรนที่รอยต่อระหว่างอนุภาค และในที่สุดรวมเป็นหนึ่งอนุภาคใหญ่

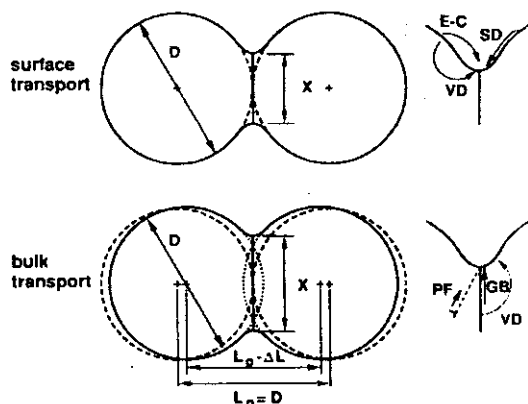
ขั้นตอนการอบผนึกเริ่มต้นจากขั้นตอนแรก (initial stage) ที่คอคอคระหว่างอนุภาคมีการเพิ่มขนาดอย่างรวดเร็ว ขั้นตอนต่อมาเรียกว่าขั้นตอนกลาง (intermediate stage) โครงสร้างรูพรุนราบเรียบขึ้นและมีการเชื่อมต่อกันของรูพรุนเป็นลักษณะทรงกระบอก (cylindrical nature) ขณะที่สมบัติของชิ้นงานมีการพัฒนา ในช่วงท้ายของขั้นตอนกลางเกิดการโตของเกรน (grain growth) ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นและจำนวนเกรนลดน้อยลง กรณีนี้เกิดขึ้นพร้อมกับการแยกตัวออกไปอยู่โดดเดี่ยวของรูพรุนและอัตราการอบผนึกช้าลง

เมื่อความพรุนหดตัวลงประมาณ 8% (หรือความหนาแน่นทางทฤษฎี 92%) ทำให้โครงข่ายรูพรุนเปิดไม่เสถียร จากรูปลักษณะโครงข่ายของรูพรุน ณ จุดนี้ทำให้รูพรุนรูปทรงกระบอกยุบตัวลง (collapse) กลายเป็นทรงกลม ซึ่งไม่มีประสิทธิภาพในการทำให้เกรนโตช้าลง การที่เห็นรูพรุนเดี่ยวปรากฏขึ้นแสดงว่าขั้นตอนการอบผนึกมาถึงขั้นตอนสุดท้ายแล้ว ขณะเดียวกันอัตราการแน่นตัวช้าลง ก๊าซที่ค้างอยู่ในรูพรุนเป็นตัวกำหนดความหนาแน่นสุดท้ายของชิ้นงาน ดังนั้นการอบผนึกในสุญญากาศจึงทำให้ได้ความหนาแน่นสูงขึ้นตราบเท่าที่โลหะยังไม่เกิดการระเหย

กลไกการเคลื่อนที่เป็นตัวกำหนดการไหลของมวลที่เกิดขึ้นตามแรงขับ กลไกการเคลื่อนที่แบ่งเป็นสองประเภทคือ การเคลื่อนที่ตามพื้นผิว (surface transport) และการเคลื่อนที่แบบมวลรวม (bulk transport) ทั้งสองกลไกประกอบด้วยกลไกระดับอะตอมที่สนับสนุนให้เกิดการไหลของมวล ดังแสดงด้วยอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคในรูปที่ 2.7

การเคลื่อนที่ตามพื้นผิวเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขนาดของคอคอด โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงระยะต่างๆ ภายในอนุภาค (นั่นคือ ไม่มีการหดตัวและไม่มีการแน่นตัวเกิดขึ้น) ทั้งนี้เนื่องจากการไหลของมวลเริ่มต้นและสิ้นสุดที่พื้นผิวของอนุภาค ในขณะที่ขอบนิกที่ควบคุมโดยการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวมีกระบวนการสำคัญสองกระบวนการที่เกิดขึ้นขณะอบนิกคือการแพร่ตามพื้นผิวและการระเหย-การควบแน่น การแพร่ตามพื้นผิวมีความสำคัญในการอบนิกโลหะหลายชนิดที่อุณหภูมิต่ำ รวมทั้งการอบนิกเหล็กด้วย ส่วนการระเหย-การควบแน่นไม่เกิดที่อุณหภูมิต่ำแต่มีความสำคัญต่อการอบนิกโลหะที่มีความเสถียรต่ำ เช่น ตะกั่ว

ในทางตรงข้ามการอบนิกที่ควบคุมโดยการเคลื่อนที่มวลรวมทำให้เกิดการหดตัวมวลเริ่มต้นเคลื่อนที่จากภายในอนุภาคและสิ้นสุดที่คอคอด กลไกการเคลื่อนที่แบบมวลรวมคือการแพร่ในเนื้อวัสดุ การแพร่ตามขอบเกรน การไหลแบบพลาสติก และการไหลแบบหนืด สำหรับการไหลแบบพลาสติกมีความสำคัญที่สุดในช่วงเริ่มให้ความร้อน โดยเฉพาะผงที่ผ่านการอัดทำให้มีความหนาแน่นของดิสโลเคชันสูง โดยทั่วไปความเค้นของแรงดึงผิวไม่เพียงพอที่จะสร้างดิสโลเคชันขึ้นมาใหม่ ดังนั้นเมื่อดิสโลเคชันถูกอบอ่อน (จากการให้ความร้อน) ให้เลื่อนออกจากผงอนุภาค บทบาทของการไหลแบบพลาสติกจึงลดลง ในทางตรงข้ามสำหรับวัสดุสถานะฐาน เช่น แก้วและพลาสติก การอบนิกโดยการไหลแบบหนืดที่อัตราการรวมตัวกันของอนุภาคขึ้นกับขนาดของอนุภาคและความหนืดของวัสดุ โลหะสามารถอบนิกโดยการไหลแบบหนืดได้เช่นกันถ้ามีเฟสของเหลวเกิดขึ้นตามขอบเกรน การแพร่ตามขอบเกรนมีความสำคัญบ้างสำหรับการแน่นตัวในวัสดุที่เป็นผลึก และมีความสำคัญมากในการแน่นตัวของโลหะทั่วไป ทั้งกระบวนการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวและการเคลื่อนที่มวลรวมทำให้คอคอดมีการเพิ่มขนาด แต่ความแตกต่างที่สำคัญอยู่ที่ความหนาแน่น (หรือการหดตัว) ระหว่างการอบนิก โดยทั่วไปกระบวนการเคลื่อนที่แบบมวลรวมมีความสำคัญมากขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 2.7 แบบจำลองกลไกการอพยพทั้ง สองประเภทในอนุภาคทรงกลม กลไกการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวใช้สำหรับการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยมวลเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดที่พื้นผิว (E-C = การระเหย-การควบแน่น SD = การแพร่ตามพื้นผิว VD = การแพร่ในเนื้อวัสดุ) การเคลื่อนที่มวลรวมมีการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยแหล่งมวลจากข้างใน (PF = การไหลแบบพลาสติก GB = การแพร่ตามขอบเกรน VD = การแพร่ในเนื้อวัสดุ) ดังนั้นเฉพาะกลไกการเคลื่อนที่มวลรวมเท่านั้นทำให้เกิดการหดตัวของอนุภาค

2.2.2 ขั้นตอนแรก (initial stage)

ค่าความแตกต่างของความดันไอ (vapor pressure) ขอบรับให้มีการประมาณค่าได้ รวมทั้งความเข้มข้นของช่องว่างในผลึก (vacancy concentration) และความเค้น โดยรวมของการอพยพ ตัวอย่างเช่น ความดันไอที่บริเวณคอคอดมีค่าต่ำกว่าที่ภาวะสมดุลเพราะบริเวณคอคอดมีความโค้งสุดขั้วเป็นความโค้งเว้า อย่างไรก็ตามมวลรวมของผงจะปล่อยไอออกมาที่ความดันสูงกว่าสมดุลเพราะมวลของผงมีความโค้งนูน ดังนั้นจึงมีมวลสุทธิไหลเข้าสู่บริเวณคอคอด

การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานมีประโยชน์สำหรับกระบวนการที่ต้องทำหลังการอพยพเพราะช่วยให้ไม่ต้องวัดขนาดของคอคอดแต่ละอันเพื่อหาปริมาณการหดตัว โดยทั่วไปชิ้นงานทางด้าน P/M มองการหดตัวออกเป็นสองลักษณะ คือลักษณะแรกเป็นชิ้นงานที่ต้องการความแม่นยำสูง ดังนั้นผู้ผลิตที่ต้องการความแม่นยำของชิ้นส่วนสูงมักไม่ต้องการให้เกิดการหดตัวในชิ้นงาน ถ้าหลีกเลี่ยงการหดตัวได้ชิ้นงานจะมีความแม่นยำสูง การออกแบบเครื่องมือสำหรับชิ้นงานที่มีการหดตัวต้องให้มีการเผื่อขนาดของชิ้นงานไว้เพื่อให้ได้ขนาดสุดท้ายหลังการอพยพอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ซึ่งอาจทำให้เกิดความยุ่งยากในกระบวนการผลิต ถ้าชิ้นงานมีความหนาแน่นต่างกันส่งผลให้มีการหดตัวต่างกันระหว่างการอพยพด้วย ดังนั้นการอพยพชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดเบี้ยว (warpage) การอพยพเป็นเวลาสั้นผนวกกับการใช้อุณหภูมิต่ำในการอพยพโดยใช้แรงอัดสูงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดน้อยที่สุด ลักษณะที่สองเป็นชิ้นงานที่

ต้องการความหนาแน่นสูง ในวัสดุบางอย่างต้องการความหนาแน่นสูงเพื่อนำไปใช้งาน ได้จึงต้องยอมให้มีการหดตัวระหว่างการอบผนึกได้ ดังนั้นการหดตัวเป็นสิ่งที่ต้องการหรือต้องหลีกเลี่ยงขึ้นอยู่กับวัสดุ ความยากง่ายในการอัด และสมบัติที่ต้องการ

2.2.3 ขั้นตอนกลาง (intermediate stage)

ความสำคัญของขั้นตอนกลางคือการกำหนดสมบัติของชิ้นงานหลังการอบผนึก ลักษณะเด่นที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้คือความโค้งมนของรูพรุน (pore rounding) การแน่นตัวและการโตของเกรน

อัตราการแน่นตัวขึ้นอยู่กับการแพร่ของช่องว่างในผลึกออกจากรูพรุน ดังนั้นอัตราการแน่นตัว dp/dt เป็นดังนี้

$$dp/dt = JAN\Omega \quad (2.2)$$

เมื่อ J คือฟลักซ์ของการแพร่ (หรือจำนวนอะตอมต่อหน่วยเวลาต่อหน่วยพื้นที่) A คือพื้นที่ที่มีการแพร่ผ่าน Ω คือปริมาตรอะตอม และ N คือจำนวนรูพรุนต่อหน่วยปริมาตร สมมติให้กระบวนการกำจัดรูพรุนเป็นการแพร่ในเนื้อวัสดุ โดยให้ขอบเกรนเป็นแหล่งรวมช่องว่างในผลึก (และช่องว่างในผลึกถูกทำลายที่นั่น)

การอบผนึกเป็นเวลานานทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติหรือความหนาแน่นของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งอัตราการแพร่ การโตของเกรน และการเคลื่อนที่ของรูพรุนต่างเป็นกระบวนการที่กระตุ้นได้ด้วยความร้อน วัสดุส่วนใหญ่อัตราเหล่านี้ยังขึ้นอยู่กับรูปร่างและลักษณะเฉพาะ (เช่น ขนาดเกรน ขนาดรูพรุน และระยะห่างระหว่างรูพรุน) เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาขณะอบผนึก ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลกระทบที่ซับซ้อนต่อกระบวนการอบผนึก

2.2.4 ขั้นตอนสุดท้าย (final stage)

การอบผนึกในขั้นตอนนี้สุดท้ายเป็นกระบวนการที่ช้า เพราะรูพรุนทรงกลมที่แยกจากกันเกิดการหดตัวด้วยกลไกการแพร่แบบมวลรวม รูพรุนแยกกันอยู่ตามมุมของเกรน ทำให้สมดุลระหว่างพลังงานขอบเกรนและพลังงานพื้นผิวของเฟสแข็ง-ไอเกิดขึ้นเรียกว่ามุมสองหน้า (dihedral angle) รูพรุนที่อยู่ตามขอบเกรนจะมีรูปร่างมุมสองด้านเหมือนเลนส์มุมสองอันประกบกัน เมื่อรูพรุนแยกตัวออกจากขอบเกรนจะมีรูปร่างเป็นทรงกลม ด้วยเหตุนี้รูพรุนจึงมีรูปร่างแปร

ตามบริเวณที่อยู่ รูพรุนที่ไม่อยู่ติดกับขอบเกรนมีลักษณะทรงกลม รูพรุนที่อยู่ตามขอบเกรนมีลักษณะนูนสองด้าน และรูพรุนที่อยู่ตามมุมเกรนมีลักษณะมน หลายเหลี่ยม ดังนั้นรูพรุนต้องแพร่ช่องว่างในผลึกให้ห่างจากขอบเกรนเพื่อทำให้เกิดการหดตัวอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นกระบวนการที่ช้ามาก ถ้าให้ความร้อนต่อไปรูพรุนเกิดการรวมตัวกันส่งผลให้ขนาดเฉลี่ยของรูพรุน โตขึ้นและจำนวนรูพรุนลดลง ความแตกต่างระหว่างความโค้งของรูพรุนต่างๆ นำไปสู่การโตของรูพรุนขนาดใหญ่ และสูญเสียรูพรุนขนาดเล็กซึ่งเป็นรูพรุนที่มีความเสถียรน้อยกว่า เรียกเหตุการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์ออสท์วาลด์ (ostwald ripening) ถ้าภายในรูพรุนมีก๊าซติดค้างอยู่ความสามารถในการละลายก๊าซในเมทริกซ์ส่งผลกระทบต่ออัตราการกำจัดรูพรุน ดังนั้นจึงต้องกำจัดรูพรุนในขั้นตอนสุดท้าย เพราะการโตของรูพรุนทำให้ความหนาแน่นลดลงและส่งผลให้การอบผนึกในขั้นตอนสุดท้ายนานขึ้น

อัตราการกำจัดรูพรุนในขั้นตอนสุดท้ายเกี่ยวกับผลกระทบที่สำคัญสองอย่างคือพลังงานพื้นผิว (γ) และความดันก๊าซในรูพรุน (P_g) สมการอัตราการแน่นตัวที่เหมาะสมเป็นดังนี้

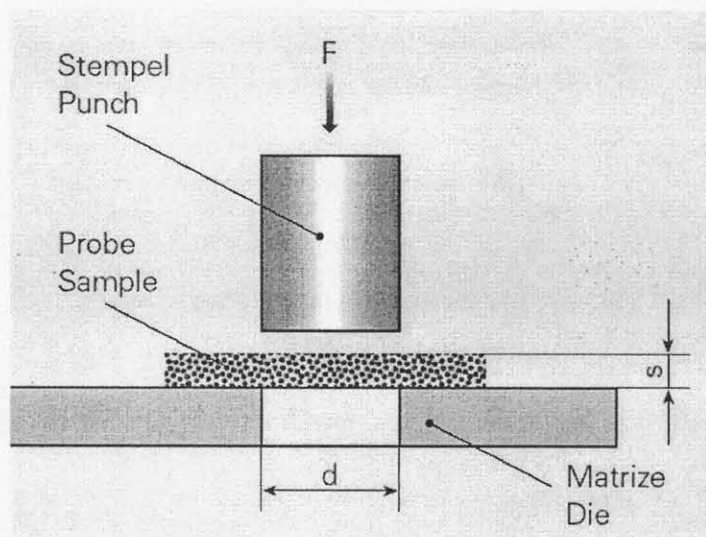
$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{12D_v\Omega}{kTG^3} \left(\frac{2\gamma}{r} - P_g \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ ρ เป็นความหนาแน่น t เป็นเวลา Ω เป็นปริมาตรอะตอม D_v เป็นสภาพแพร่ในเนื้อวัสดุ k เป็นค่าคงที่ของโบลท์แมนน์ T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ G เป็นขนาดเกรน γ เป็นพลังงานพื้นผิวเฟสของแข็ง-ไอ r เป็นรัศมีรูพรุน และ P_g เป็นความดันก๊าซในรูพรุน จากสมการแสดงให้เห็นว่าเมื่อก๊าซถูกขังอยู่ในรูพรุนอัตราการแน่นตัวจะลดลงเข้าสู่ศูนย์ก่อนที่รูพรุนทั้งหมดถูกกำจัดออก ดังนั้นการอบผนึกในสุญญากาศเท่านั้นจึงได้ความหนาแน่นสูงสุด

2.3 การทดสอบสมบัติของตัวกรองวัสดุผสม

2.3.1 การทดสอบความแข็งแรงเฉือน (Shear strength test)

รูปแบบการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุกรอง ตามมาตรฐานของ DIN 30911 part 6 วิธีการทดสอบความแข็งแรงเฉือนเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติความแข็งแรงของวัสดุ เนื่องจากการทดสอบแรงดึงมีความยุ่งยากในการวัดมากกว่า และผลที่ได้ไม่เพียงพอที่จะนำมาคำนวณได้ภายใต้เงื่อนไขการกระทำนี้ โดยการทดสอบแรงเฉือนจะเป็นไปในลักษณะการ กระแทกผ่านช่องว่าง (hole) รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การทดสอบแรงเฉือน (shear strength test)

[<http://www.gkn-filters.com>]

สมการทดสอบหาความแข็งแรงเฉือน

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot S} \quad (2.28)$$

$$\tau = \text{ความแข็งแรงเฉือน} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

$$F = \text{แรงกระทำ} (N)$$

$$S = \text{ความหนาของชิ้นตัวอย่าง} (mm)$$

$$d = \text{ขนาดของชิ้นตัวอย่าง} (mm)$$

2.3.2 การทดสอบฟองอากาศ (bubble point test)

รูปแบบของการทดสอบนี้ ตีพิมพ์ในมาตรฐาน DIN ISO 4003 การทดสอบฟองอากาศนี้สามารถใช้น้ำฟองอากาศในน้ำแทนฟองอากาศจริง เพื่อหาขนาดของรูพรุนขนาดใหญ่ที่สุด โดยนำชิ้นงานทดสอบไปแช่ในของเหลวทดสอบที่มีค่าความตึงผิวต่ำ (ปกติจะใช้ isopropanol เป็นของเหลวทดสอบ: wetting agent) ตามกระบวนการนี้ ความดันอากาศจะปล่อยให้อากาศเข้าด้านหนึ่งและอีกด้านบรรจุชิ้นตัวอย่าง เมื่อเพิ่มความดันจนกระทั่งฟองอากาศแรกเกิดขึ้น (รูปที่ 2.9) ความดันที่ให้ขณะนั้น เรียกว่า ความดัน "bubble point" ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า "ขนาดรูพรุนปรากฏ" ได้ (apparent pore diameter) ด้วยสมการ

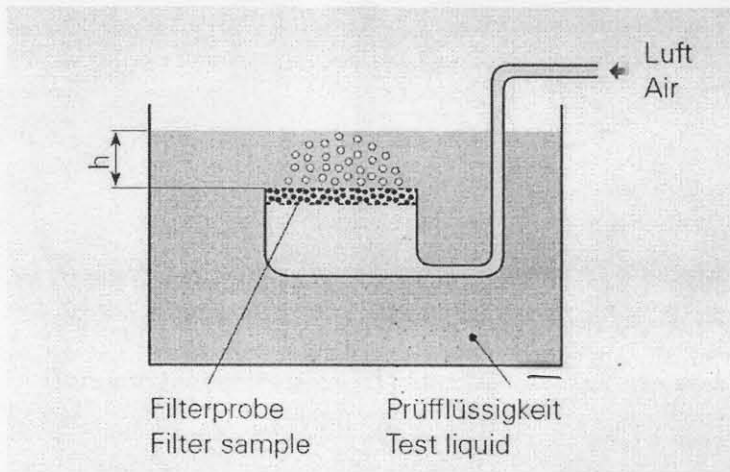
$$d_x = \frac{4 \cdot \delta \cdot \cos \varphi}{\Delta p} \quad (2.4)$$

d_x = ขนาดของรูพรุนปรากฏ (m)

δ = แรงตึงผิว (N/m)

$\cos \varphi$ = มุมการเปียก (wetting angle)

Δp_x = ความดันที่ตัวกรองได้รับ (Pa)



รูปที่ 2.9 การทดสอบฟองอากาศ bubble point test

[<http://www.gkn-filters.com>]

2.3.3 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ (permeability coefficient test)

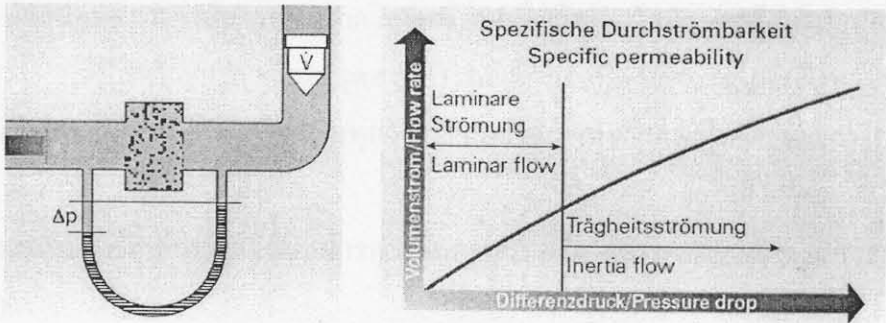
รูปแบบของการทดสอบนี้ ตีพิมพ์ในมาตรฐาน DIN ISO 4002 โดยใช้ wetting agent: isopropanol ตามหน้าที่การใช้งานของตัวกรอง ตรวจสอบขนาดรูพรุน ทดสอบความแข็งแรง แล้วการหาประสิทธิภาพของอัตราการไหล (ตามรูปที่ 2.10) ซึ่งขึ้นกับความแตกต่างของความดันและเพิ่มขึ้นไปจนอาจมีค่าเป็นอนันต์ สำหรับการวัดความสามารถการซึมผ่านโดยมากใช้อากาศ ซึ่งแสดงออกมาได้ค่อนข้างง่าย โดยวัดความแตกต่างของความดันที่ลดลง (pressure drop) และอัตราการไหลของอากาศที่ความดันและอุณหภูมิคงที่ โดยใช้ darcy's equation

$$\frac{\Delta P}{e} = \frac{Q \cdot \eta}{A \psi_v} \quad (2.5)$$

เมื่อ ΔP คือ ความดันที่ลดลง (Pa)

e คือ ความหนาของชั้นทดสอบ (m)

- A คือ พื้นที่หน้าตัดของชั้นทดสอบ (m^2)
- η คือ ความหนืดพลศาสตร์ของไหลทดสอบ ($kg/m.s$)
- Q คือ อัตราการไหลของของไหล (m^3/s) เท่ากับอัตราการไหลโดยมวลของของไหลหารด้วยความหนาแน่น (ρ) ของของไหล
- ψ_v คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (m^2)



รูปที่ 2.10 การทดสอบความสามารถในการให้ของไหลซึมผ่าน
(Permeability coefficient test) [[http:// www.gkn-filters.com](http://www.gkn-filters.com)]

2.3.4 ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (average poresize diameter) ค่าขนาดเฉลี่ยเป็นขนาดเสมือนกำหนดไว้เพื่ออธิบายถึงวัสดุตัวกรองใดๆ ให้ชัดเจนขึ้น โดยกำหนดขนาดของรูพรุนให้เป็นหลอดรูปทรงกระบอกซึ่งสามารถลดความดันลงได้เหมือนกับวัสดุตัวกรอง ในกรณีนี้ความยาวของหลอดจะสอดคล้องกับความหนาของวัสดุตัวกรองซึ่งคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.6

$$d_{Lc} = \sqrt{\frac{32eQ\eta}{A \cdot \Delta P \cdot \varepsilon}} \quad (2.6)$$

- เมื่อ d_{Lc} คือ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (m)
- η คือ ความหนืดพลวัตของไหลทดสอบ ($kg/m.s$), (Pa.s)
- e คือ ความหนาของตัวกรอง หรือความยาวของหลอด (m)
- Q คือ อัตราการไหลของของไหล (m^3/s)
- ΔP คือ ความดันที่ลดลง (Pa)
- A คือ พื้นที่ผิวตัวกรอง (m^2)
- ε คือ ความพรุน (%) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$$\varepsilon = \frac{\rho_{solid} - \rho_{porous}}{\rho_{solid}} \times 100\% \quad (2.7)$$

2.4 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 ที่มาของการศึกษาการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ตีบุก

มีการศึกษาการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ตีบุกอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี 1946 ซึ่งพบปัญหาของเครื่องมือในห้องปฏิบัติการว่ามีสาเหตุมาจากวิสเคอร์ตีบุกซึ่งเกิดจากโลหะบัดกรีทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดลัดวงจร ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และส่งผลไปยังทุกวงการ เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีการใช้งานในทุกวงการ ยกตัวอย่างดังที่แสดงในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 ผลกระทบของวิสเคอร์ที่ติดกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงการต่างๆ (Brussel และคณะ 2002)

การใช้งาน	ผลกระทบ
การแพทย์: 1 เครื่องปั๊มหัวใจ(Heart Pacemaker)	ทำให้เกิดการลัดวงจร กระแสที่ส่งออกมาไม่เต็มที่
การทหาร: 1 เรดาร์รุ่น F-15 (F-15 Radar) 2 U.S. Missile Program 3 Phoenix Air to Air Missile	ทำความเสียหายกับวงจรขนาดจุลภาค (microcircuit)

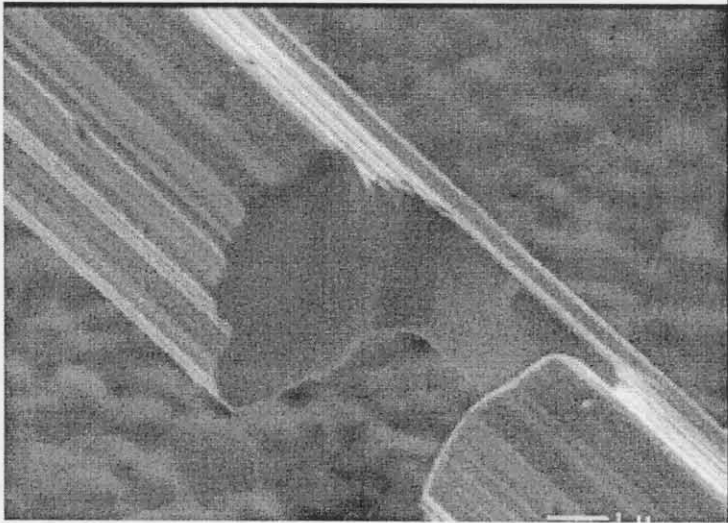
นอกจากนี้เมื่อวันที่ 1 ก.ค. 2006 ทางสหภาพยุโรป (European Union) ร่วมกับ RoHS ประกาศเลิกใช้ตะกั่วในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตามนโยบายเพื่อสิ่งแวดล้อม

Abteu และ Selvaduray (2000) ได้ศึกษาเกี่ยวกับโลหะบัดกรีชนิดไร้ตะกั่ว สำหรับการใช้งานในไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในโลหะบัดกรีส่วนใหญ่มักจะมีดีบุกเป็นส่วนประกอบ เนื่องจากดีบุกมีสมบัติการเปียกและการแพร่ดี บนแผ่นฐานหลายๆ ชนิด ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ จุดหลอมเหลวของดีบุก คือ 231.9 องศาเซลเซียสในสถานะของแข็งดีบุก จะมีโครงสร้างผลึกแตกต่างกันอยู่ 2 แบบ เป็น 2 ลักษณะ คือดีบุกขาวหรือ β -Tin มีโครงสร้างผลึกเป็นบอดีเซนเตอร์ เตตระกอนอล (body center tetragonal) ซึ่งจะมีความเสถียร

ที่อุณหภูมิห้อง อีกลักษณะก็คือ ดีบุกเทาหรือ α - Tin มีโครงสร้างผลึกเป็นลูกบาศก์เพชรซึ่งจะมีความเสถียรเมื่ออุณหภูมิ ต่ำกว่า 13 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนจาก β -tin ไปเป็น α - tin (กระบวนนี้เรียกว่า tin Pest) จะเกิดขึ้นเมื่อ อุณหภูมิตกลงไปต่ำกว่า 13 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นนำไปสู่การแตกหักในโครงสร้างของดีบุก tin pest จึงเป็นปัญหาอย่างมากในการนำดีบุก มาประยุกต์ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำๆ และยังมีแนวโน้มว่าดีบุกจะเกิดวิสเคอร์ดีบุกขึ้น มีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยว (single crystal) คล้ายๆ หลอดเล็กๆเนื่องจากลักษณะการเติบโตเป็นแบบทีละอะตอม ซึ่งยึดได้จนมีความสูง 0.64 มิลลิเมตร วิสเคอร์ดีบุกจะมีโครงสร้างผลึกเป็นเตตระกอนอล เนื่องจากความเค้นภายในตัววัสดุเองหรือแรงจากภายนอกมากระทำ เส้นใยดีบุกจะโตอย่างรวดเร็วที่ 51 องศาเซลเซียส แต่เส้นใยดีบุกไม่มีผลกระทบต่อความสามารถการบัดกรี เมื่อมีการนำดีบุกกับทองแดงมาผสมกันเป็นสารประกอบยูเทคติก Sn-0.7 wt%Cu อุณหภูมิยูเทคติก 227 องศาเซลเซียสจากปฏิกิริยา Cu จะเข้าไปฝังประรวมกันเป็นสารประกอบโลหะ Cu_3Sn_5 ซึ่งยังคงสมบัติของโลหะผสมนี้อยู่ ซึ่งยังไม่แน่ชัดว่าการเกิดขึ้นของ วิสเคอร์ดีบุกเนื่องมาจากการแปลงเฟสจาก $\beta \rightarrow \alpha$ หรือเปลี่ยนเฟสไปเป็น ดีบุกเทา

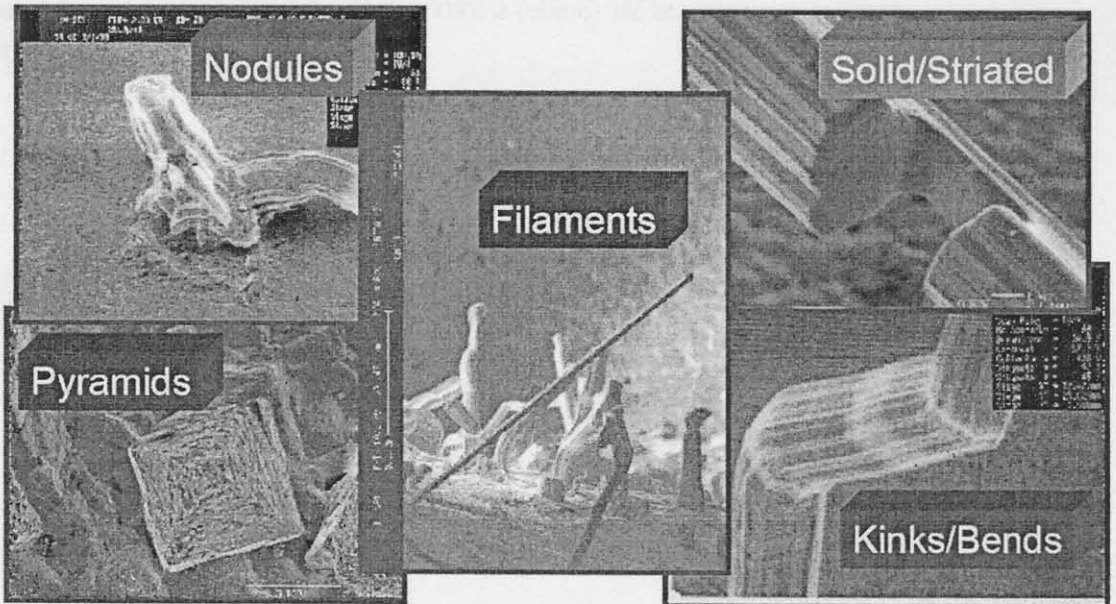
2.4.1 ข้อมูลบางประการของวิสเคอร์ดีบุก

วิสเคอร์ดีบุกมีโครงสร้างใกล้เคียงผลึกเดี่ยว รูปร่างของวิสเคอร์ดีบุกจะมีหลายลักษณะ เช่น ปุ่มนูน พีรามิด (รูปที่ 2.25) ซึ่งจะมีขนาดไม่เกิน $10 \mu m$ รูปร่างที่พบมากจะมีลักษณะคล้ายเข็ม มีทั้งลักษณะตรง และ หักโค้ง ความยาวจะอยู่ในช่วงระดับมิลลิเมตรขนาดอยู่ในช่วง $1 - 4 \mu m$ ที่ขนาดใหญ่มักจะอยู่ในระดับ $10 \mu m$ ขนาดเล็กจะอยู่ในระดับ $0.006 \mu m$ ซึ่งมีในหลายตัวอย่างที่ขนาดของ วิสเคอร์ดีบุกมีขนาดใหญ่มากกว่าขนาดของเกรนดีบุก นอกจากนี้วิสเคอร์ดีบุกมีความแข็งแรงเชิงกลสูงในทิศของแนวแกน เพราะมีโครงสร้างผลึกค่อนข้างสมบูรณ์ จากการใช้เทคนิคการรวมของลำไอออน ทำให้เห็นหน้าตัดของวิสเคอร์ดีบุกมีลักษณะเป็นทรงตัน (รูปที่ 2.11)



รูปที่ 2.11 วิสเคอร์ดีบุกที่ผ่านใช้เทคนิคการรวมของลำไอออน [Heidi และคณะ 2004]

เมื่อตรวจสอบลักษณะของวิสเคอร์ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด พบว่ามีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไปดังแสดงในรูปที่ 2.12 (Brusse และคณะ.2002)



October 17, 2002

Tin Whiskers: Attributes and Mitigation

7

รูปที่ 2.12 รูปร่างของวิสเคอร์ดีบุกในแบบต่างๆ [Brusse และคณะ 2002]

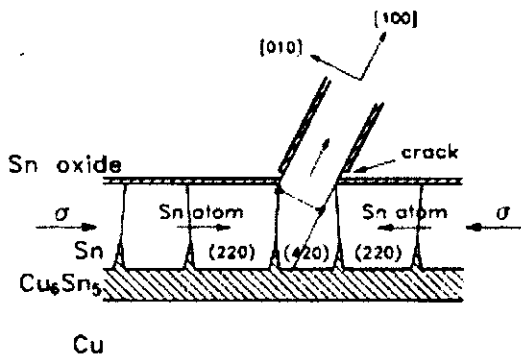
2.4.2 ทฤษฎีการเกิดขึ้นของเส้นใยคืบ

ซึ่งการเกิดขึ้นเองของ วิสเคอร์คืบ มีกระบวนการคล้ายคลึงกับการฟอร์มตัวของ เคนไดรต์ แต่ไม่ใช่สิ่งเดียวกัน (NASA 2000)

Lee และคณะ (1998) ได้ศึกษากลไกการเกิดขึ้นเองของเส้นใยคืบ โดยนำคืบมาเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้าลงบนแผ่นฟอสฟอรับรอนซ์ (phosphor bronze sheet) ทำการทดลองที่อุณหภูมิ ห้องมีตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ ความหนาแน่นกระแส (current density) ซึ่งใช้ค่าอยู่ในช่วง 0.5-3.5 A/dm² แรงขับเคลื่อนที่มีผลต่อกลไกการเกิดขึ้นเองของเส้นใยคืบคือความเค้นตกค้าง (residual stress) ในลักษณะ 2 แนวแกนคือ ลักษณะยึดในแนวตั้งและลักษณะกดในแนวนอน วัดค่าได้ประมาณ 8 เมกะปาสคาล อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาการสร้างเฟสใหม่ของสารประกอบโลหะสามารถเขียนแสดงได้ดังนี้



ซึ่งค่าของความเค้นกดในลักษณะ 2 แนวแกนนี้มีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางการวางตัวของเกรนของคืบ การก่อตัวเป็นวิสเคอร์คืบ (รูปที่ 2.13) ความเค้นภายในดังกล่าวเป็นตัวขับเคลื่อนให้คืบ ออกมาจากเกรนแทรกผ่านผิวออกไซด์ที่อยู่เหนือชั้นฟิล์มคืบในลักษณะเฉือน คืบจะถูกขับเคลื่อนให้ออกมาเรื่อยๆ ในลักษณะที่ละเอียดอ่อน เนื่องจากการขยายตัวของดิสโลเคชันลูป (dislocation Loop) ซึ่งจะขยายตัวในลักษณะการปีน (climb) หลังจากที่ไม่สามารถเลื่อน (glide) ไปตามผิวได้อีกแล้ว



รูปที่ 2.13 ลักษณะการเกิดขึ้นของเส้นใยคืบ

[Lee and Lee, 1998]

Heidi และคณะ (2004) อธิบายสาเหตุของการเกิดขึ้นได้ว่า เนื่องมาจากสมบัติที่ต่างกันเนื้อวัสดุ (anisotropic) ของโลหะที่สามารถเกิดวิสเคอร์คืบได้ ซึ่งโดยมากจะเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น คืบ สังกะสีและแคดเมียม) เป็นผลให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion coefficient) ของค่าที่แลตทิซด้าน a กับด้าน c แตกต่างกันเกือบเท่าตัว

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุก

การศึกษาการเกิดวิสเคอร์ดีบุกเป็นไปเพื่อขยับยั้งการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุกเอง การทดลองโดยมากจึงเป็นการเผ่าสังเกตพฤติกรรมการเกิดการเกิดขึ้นเอง ด้วยเหตุนี้จึงมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดวิสเคอร์ดีบุกอย่างหลากหลาย ได้แก่ ความชื้น สนาม-กระแสไฟฟ้า บรรยากาศควบคุม ลักษณะพีริฟิเทต ระบบที่ใช้เป็นฐานในการเกิด ขนาดและรูปร่างของเกรน อุณหภูมิ แต่ในทุกงานวิจัยการเกิดวิสเคอร์ดีบุก ต้องอาศัยความเค้นตักเป็นแรงขับเคลื่อน

Kim และคณะ (2005) ศึกษาการเกิด วิสเคอร์ดีบุกบน โลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดขึ้นเองของ วิสเคอร์ดีบุกคือการให้ความร้อนในลักษณะเข้าไปเข้ามา 600 รอบ โดยให้ความร้อนอยู่ในช่วงอุณหภูมิ -55 ถึง 125 องศาเซลเซียส โดยในแต่ละรอบของการให้ความร้อนใช้เวลา 30 นาที พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดวิสเคอร์ดีบุกคือ ความไม่เท่ากันของสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุผสมที่นำมาใช้ทำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

Fukuda และคณะ (2007) ทำการศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเกิดวิสเคอร์ดีบุกบนฟิล์มดีบุกที่เคลือบอยู่บนแผ่นทองแดง ซึ่งใช้ระยะเวลาการทดลอง 8 เดือนภายใต้บรรยากาศปกติ ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความชื้น 50%RH โดยใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ $0.48 \times 10^2 \text{ A/cm}^2$ พบว่ากระแสไฟฟ้าจะลดปริมาณการเกิดวิสเคอร์แต่จะทำให้เส้นใยมีความยาวได้มากขึ้น

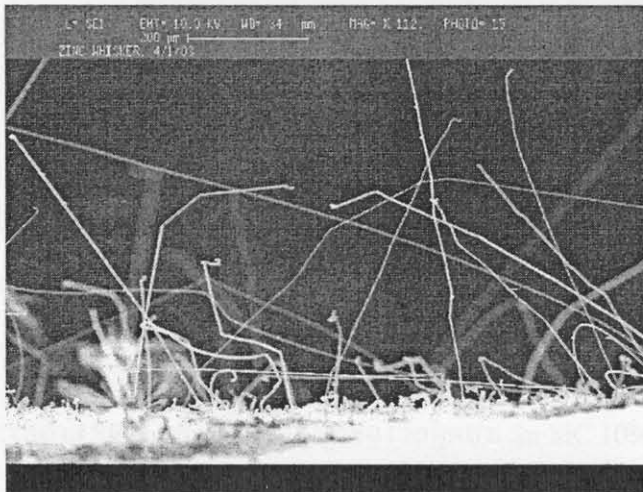
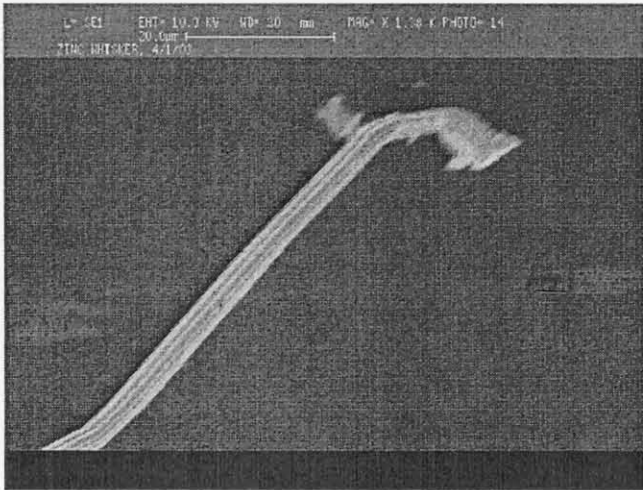
Chuang และคณะ (2007) ทำการศึกษาผลการเติมธาตุหายากเช่น Lu ใน Sn เพื่อเตรียมเป็นโลหะบัดกรี Sn-6.6Lu พบว่ามีการฟอร์มตัวเป็นวิสเคอร์ดีบุก ณ บริเวณของส่วนที่เป็นเฟส Lu_3Sn_5 ที่บรรยากาศปกติอัตราการเติบโตของวิสเคอร์ดีบุกเป็น $1 \text{ A}^0\text{s}^{-1}$ เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสอัตราการเติบโตของวิสเคอร์ดีบุกเป็น $500 \text{ A}^0\text{s}^{-1}$ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุก

Tu และคณะ (1994) ใช้กระบวนการผันกลับไม่ได้ของอุณหพลศาสตร์เพื่อตรวจสอบการทำปฏิกิริยากันเองของฟิล์มบาง Cu-Sn จากปฏิกิริยาการฟอร์มตัวเป็นสารประกอบกึ่งโลหะ ทำให้ปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการฟอร์มตัวเกิดความเค้นกดในสองแนวแกนในชั้นของดีบุก จากผลของความเค้นทำให้เกิดวิสเคอร์ดีบุกของดีบุกไปพร้อมกับปฏิกิริยาเคมี ค่าสภาพคล่องของอะตอมจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อรูปร่างและปฏิกิริยาของชิ้นงาน ถ้าอุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส สารประกอบจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนไม่มีผลพอสำหรับการเกิด วิสเคอร์ดีบุกจะเกิดเป็นเนินเล็กๆแทน แบบจำลองของการเกิดวิสเคอร์ดีบุก (หรือการเกิดเนิน) น่าจะเกิดวิสเคอร์ดีบุกที่บริเวณจุดที่ผิวของดีบุกมีความอ่อนสุดทำให้ผิวของชั้นออกไซด์แตกได้ จุดนั้นจะเป็นตำแหน่งคลายตัวของความเค้นและจะมีความเค้นอยู่รอบๆจุดที่เกิดและเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดวิสเคอร์ดีบุกจนกว่าความเค้นจะหมดไป

2.4.4 เส้นใยอื่นๆ

นอกจากวิสเคอร์ดีบุกที่เกิดขึ้นได้เองแล้วยังพบว่า โลหะอื่นที่มีจุดหลอมเหลวต่ำก็สามารถเกิดวิสเคอร์ได้ ที่พบได้แก่ สังกะสี (รูปที่ 2.14) แคดเมียม ทอง และอลูมิเนียม เป็นต้น

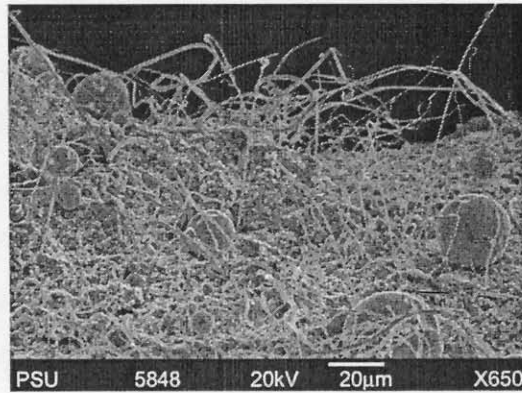
Heidi และคณะ (2004) อาศัยเทคโนโลยีการรวมของลำไอออน (focus ion beam technology) ในการสังเคราะห์หน้าตัดของวิสเคอร์ดีบุกซึ่ง เส้นใยดีบุกที่ทดสอบเป็นการปล่อยให้เกิดขึ้นเองใช้เวลานาน 15-20 ปี พบว่าเกรนที่เป็นส่วนของ วิสเคอร์ดีบุกที่ถูกตัด มีความละเอียดมากในระดับจุลภาคย่อยเมื่อเทียบกับฐานซึ่งมีขนาดเกรนสม่ำเสมออยู่ในช่วง 4-10 μm อธิบายสาเหตุของการเกิดขึ้นได้ว่า เนื่องมาจากความแตกต่างกันของสมบัติในเนื้อวัสดุ



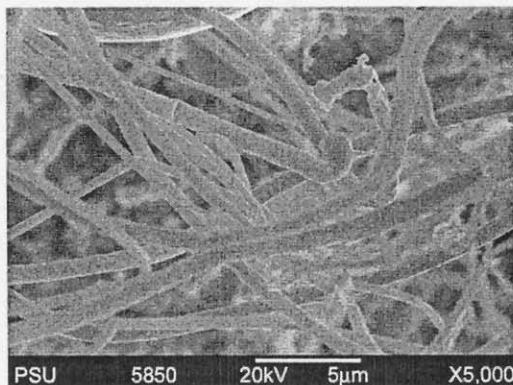
รูปที่ 2.14 วิสเคอร์สังกะสี (Zinc Whisker)

[nepp.nasa.gov/whisker/photos/floor_tile/index.html]

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นแนวทางใหม่ในการผลิตวัสดุพอรุน โดยอาศัยการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุกที่เกิดจากวัสดุผสมที่ผลิตด้วยกรรมวิธีบดผสมเชิงกลแล้วอาศัยความร้อนเป็นปัจจัยกระตุ้น ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นของ เล็ก สีง และคณะ (2003) ได้มีการศึกษาสมบัติพิเศษของวัสดุผสม Sn - SiC ที่เตรียมด้วยวิธีบดผสมเชิงกล แล้วนำมาอบผืนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200 - 350 องศาเซลเซียส จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงในสภาวะร้อน (hot - stage optical microscope) พบว่าเกิดวิสเคอร์ดีบุกทั่วทั้งชิ้นตัวอย่าง (รูปที่ 2.15) อุณหภูมิที่เริ่มเกิดวิสเคอร์ดีบุกเริ่มที่ประมาณ 240 องศาเซลเซียส ลักษณะของวิสเคอร์ดีบุกที่ได้มีขนาด $1 \mu\text{m}$ โดยประมาณจากสมบัติดังกล่าวจึงมีแนวคิดที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุพอรุน



a) กำลังขยาย x650



b) กำลังขยาย x500

รูปที่ 2.15 ภาพถ่าย SEM ของวิสเคอร์ดีบุกของวัสดุผสม Sn-SiC 10% โดยน้ำหนัก