

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

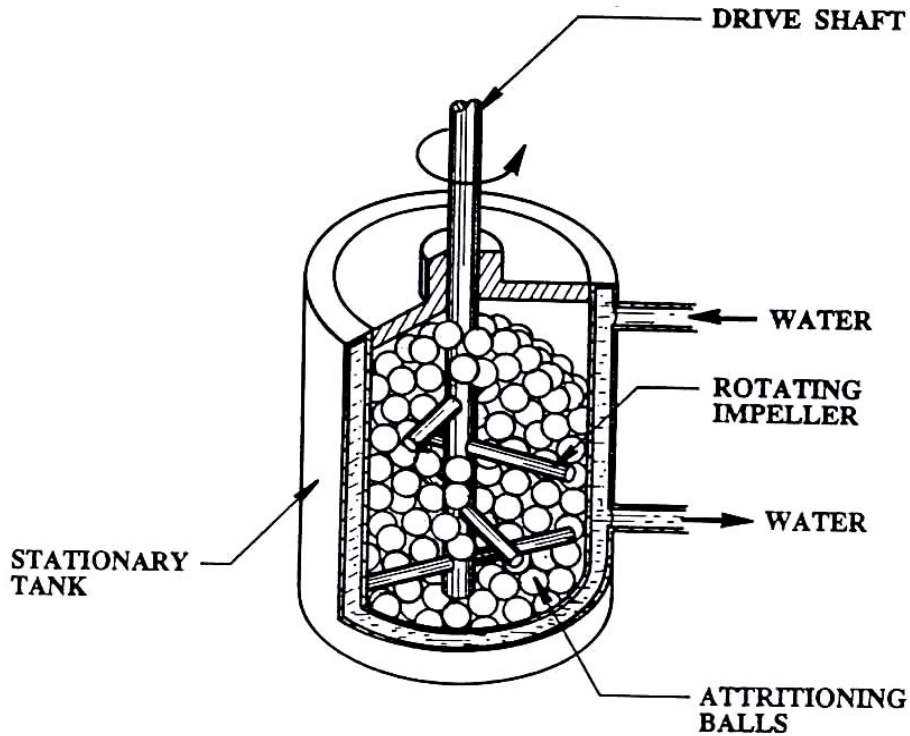
เนื่องจากในปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการสูงขึ้นในทุกๆด้าน เช่นเครื่องมือเครื่องใช้ เครื่องอำนวยความสะดวกต่างๆในชีวิตประจำวันได้แก่ รถยนต์ เครื่องบิน ยานอวกาศเป็นต้น โลหะผสมเป็นวัสดุสำคัญตัวหนึ่งที่มีความจำเป็นนำมาใช้ในการสร้างสิ่งเหล่านี้ด้วย ในอดีตการผลิตโลหะผสมทำได้ด้วยวิธีการหล่อ แต่ในปัจจุบันการผลิตโลหะผสม วิธีเชิงกล (mechanical alloying, MA) มีบทบาทมากขึ้นเนื่องจากมีข้อดีคือทำให้โครงสร้างจุลภาคที่ละเอียดและเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติทางกลเหนือกว่าโลหะผสมที่ผลิตด้วยวิธีการหล่อ การผลิตโลหะผสมเชิงกลเป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตโลหะผสมเพื่อให้มีโครงสร้างจุลภาคที่ละเอียดและเป็นเนื้อเดียวกันตามความต้องการ ทำให้โลหะผสมจากกระบวนการโลหะผสมเชิงกล มีสมบัติที่เด่นและเหนือกว่าโลหะผสมที่ได้จากกระบวนการหล่อแบบปกติ หลักการพื้นฐานของกระบวนการโลหะผสมเชิงกล ในการผลิตผงโลหะผสม คือการทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นในสถานะที่เป็นของแข็ง (solid state reaction) โดยผงโลหะผสมจะเกิดการแตกหักและการเชื่อมกันอีกครั้งซ้ำ ๆ กันเช่นนี้ตลอดกระบวนการผลิตภายในภาชนะที่บรรจุลูกบอลบดทำงานที่พลังงานสูง (high energy ball mill) และบรรยากาศก๊าซเฉื่อย (inert atmosphere) ทั้งนี้ส่วนผสมทางเคมีของอนุภาคจะค่อยๆ เปลี่ยนไประหว่างการบดซึ่งแตกต่างกับการบดแบบธรรมดาที่อนุภาคไม่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแต่อย่างใด ตัวอย่างโลหะผสมที่ผลิตด้วยกระบวนการนี้เช่น นิกเกิลเป็นโลหะหลัก (nickel base materials) ได้แก่ INCONEL MA 6000 ใช้เป็นวัสดุทำใบพัดเฮลิคอปเตอร์ INCONEL MA 754 ใช้สำหรับทำใบพัดเทอร์ไบน์และใบพัดของเครื่องยนต์เจ็ท INCONEL MA 758 ซึ่งมีส่วนผสมของโครเมียมสูงใช้ในอุตสาหกรรมการหล่อแก้วและอุปกรณ์ของเตาหลอม เหล็กเป็นโลหะหลัก (iron-based materials) ได้แก่ INCONEL MA 957 Fe-14Cr-1Ti-0.3Mo-0.25Y₂O₃ ใช้ทำอุปกรณ์ชิ้นส่วนเตาปฏิกรณ์ จะบวมโตน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 ชนิดโลหะเบาที่อะลูมิเนียมเป็นโลหะหลัก (aluminium-based alloys) เช่น AL-9052 ประกอบด้วย 4Mg และ 0.8-1.1C (wt.%) มีความแข็งแรงสูงมากและทนการกัดกร่อน ใช้ในทะเลได้ดี AL-905XL ประกอบด้วย 4Mg 13Li และ 1.2C (wt.%) เป็นโลหะผสมที่มีความหนาแน่นต่ำ ความแข็งแรงสูงและเหนียว ใช้ในงานอวกาศ AL-9021 ประกอบด้วย 1.5Mg 4Cu และ 0.8-1.1C (wt.%) เป็นโลหะผสมที่มีเนื้อเหมาะสมสำหรับทำวัสดุผสม การเตรียมโลหะผสมด้วยวิธีเชิงกลเตรียมได้ด้วยเครื่องบดชนิดต่างๆ เช่นไวเบรชันมิลล์ (vibration mill) จาร์มิลล์ (jar mill) และเครื่องบดแอทไครเตอร์

เป็นต้น เครื่องบดแอทไตรเตอร์เป็นเครื่องบดชนิดหนึ่งที่สามารถใช้เตรียมโลหะผสมเชิงกลได้ ใช้เวลาในการเตรียมต่ำกว่าเครื่องบดอื่นๆที่กล่าวมา เครื่องบดแอทไตรเตอร์แบ่งตามกรรมวิธีการบดมี 3 ชนิดคือ บดเป็นชุด (batch) บดต่อเนื่อง (continuous) และบดหมุนเวียน (circulation) ถ้าแบ่งชนิดตามความเร็วแบ่งได้เป็น เครื่องบดแอทไตรเตอร์ (attritor) และเครื่องบดแอทไตรเตอร์ความเร็วสูง (high speed attritor) เครื่องบดแอทไตรเตอร์ใช้ลูกบอลขนาด 3.18-9.52 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 60-350 รอบต่อนาที เครื่องบดแอทไตรเตอร์ความเร็วสูง ใช้บอลขนาด 0.5-3.0 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 320-1700 รอบต่อนาที ในการวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องบดแอทไตรเตอร์ขนาดห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้ในการวิจัยตลอดจนทดสอบสมรรถนะของเครื่องบดในการผลิตโลหะผสมระหว่างอะลูมิเนียม-ทองแดงด้วยวิธีโลหะผสมเชิงกล

1.2 การตรวจเอกสาร

1.2.1 เครื่องบดแอทไตรเตอร์

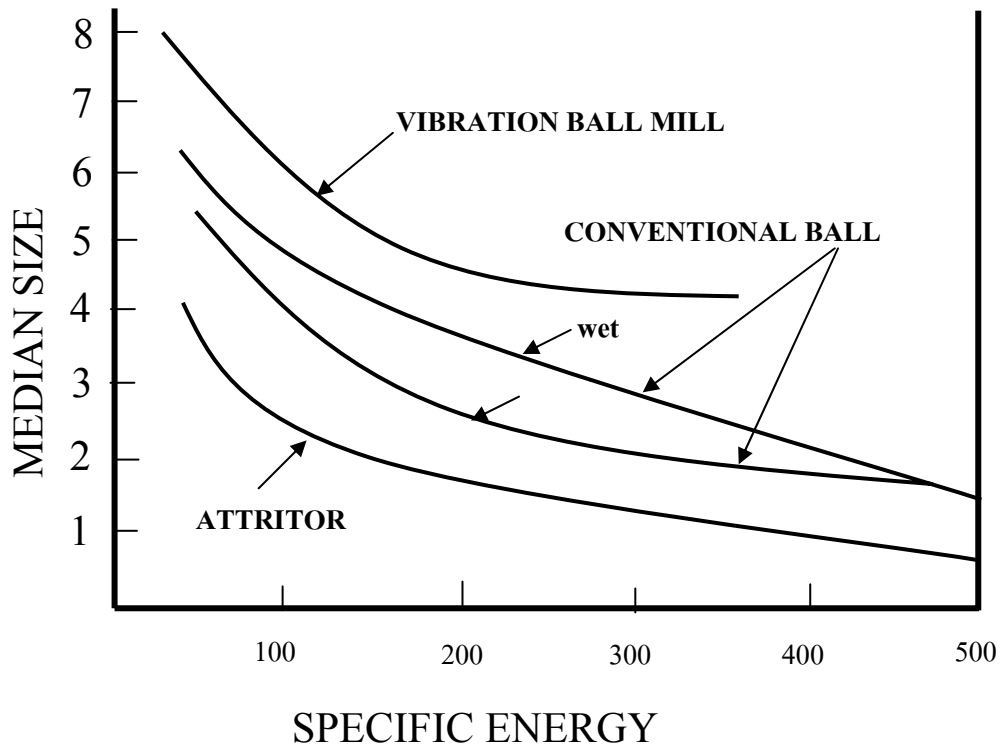
เครื่อง Szegvari attritor (Szegvari and Yang, 1999) ซึ่งเรารู้จักกันคือ เครื่องบดแอทไตรเตอร์ เป็นเครื่องบดละเอียดที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในปัจจุบัน ภายในใส่ลูกบอล ซึ่งเมื่อเวลาทำการบดจะอยู่ในสภาพปั่นป่วน ชื่อทั่วไปที่เรียกเครื่องบดแอทไตรเตอร์ คือ “stirred ball mill” (รูปที่ 1.1) เครื่องบดแอทไตรเตอร์มีตั้งแต่ความเร็วรอบต่ำถึงความเร็วรอบสูง แต่ละชนิดใช้ขนาดลูกบอลและความเร็วรอบแตกต่างกันไป (ตารางที่ 1.1) แนวคิดที่สำคัญมากของเครื่องบดแอทไตรเตอร์คือกำลังที่ใส่เข้าไปเพื่อตีกระแทกลูกบอล ให้ลูกบอลไปบดวัสดุ ไม่ได้ใช้เพื่อการหมุนหรือการสั่นเป็นหลัก และผนังหม้อบดไม่ได้ใช้บดวัสดุโดยตรงแต่ต้องแข็งแรงรับการกระแทกลูกบอลได้ ดังนั้นการบดวัสดุจึงใช้ลูกบอลเป็นตัวบดโดยตรง เครื่องบดมีหลายชนิด แต่ละชนิดใช้ขนาดบอลและความเร็วรอบแตกต่างกันไป (ตารางที่ 1.1) เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องบดชนิดอื่น เครื่องบดแอทไตรเตอร์มีประสิทธิภาพสูงกว่า เครื่องบดไว บราโทรี และ เครื่องบดเวนชันแนล จากรูปที่ 1.2 เส้นบนสุดเป็นข้อมูลของเครื่องบดไว บราโทรี เส้นกลางสองเส้นเป็นของเครื่องบดเวนชันแนล และเส้นล่างสุดเป็นเครื่องบดแอทไตรเตอร์ เมื่อพิจารณา specific energy input ที่ประมาณ 100 kwh/t ขนาดอนุภาค (median particle size) ที่ได้จากเครื่องบดแอทไตรเตอร์มีขนาดเล็กกว่าของเครื่อง conventional ball mill 1/2 เท่า และเล็กกว่าของเครื่อง vibratory mill 1/3 เท่า นอกจากนั้นที่ specific energy input ที่ 200 kwh/T ทำการบดได้อนุภาคเล็กกว่าเครื่อง vibratory ball mill และ conventional ball mill นั้นแสดงว่าเครื่องแอทไตรเตอร์มีประสิทธิภาพสูงกว่าทั้งสองเครื่องที่กล่าวมา และใช้เวลาในการบดน้อยกว่า (รูปที่ 1.2)



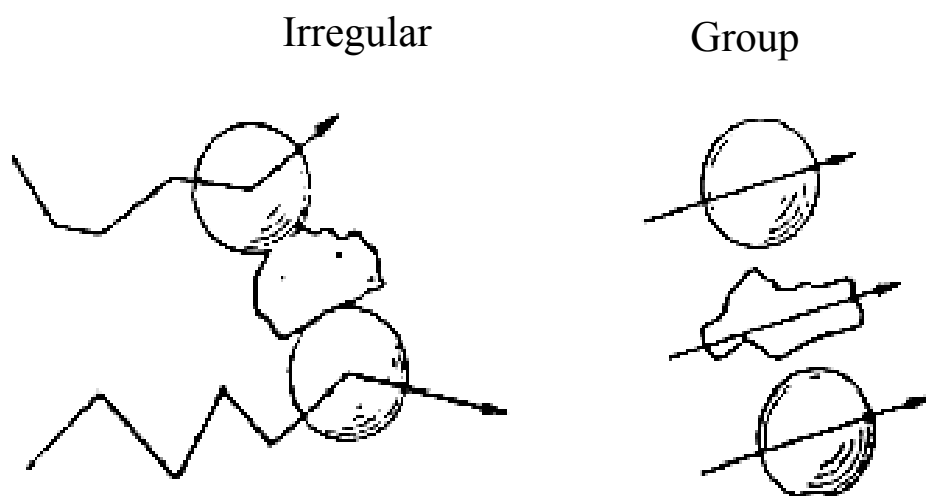
รูปที่ 1.1 เครื่องบดแอทไทรเตอร์พลังงานสูง ชนิด Attritor ball mill เช่น Szegvari grinding mill (Kuhn, et al., 1985)

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบเครื่องบดชนิดต่างๆ (Szegvari and Yang, 1999)

| ชนิดของเครื่องบด | ขนาดบอล | ความเร็วรอบ (rpm) | tip speed (fpm) |
|---------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------|
| เครื่องบดมิลล์ (ball mill) | 12.7 mm and larger | 10-50 | - |
| เครื่องบดแอทไทรเตอร์ (attritor) | 3.18-9.52 mm | 60-350 | 600-1000 |
| high speed attritor | 0.5-3.00 mm | 320-1700 | 2500-3000 |
| sand mill (horizontal mill) | 0.25-2.00 mm | 800-3800 | 200-3000 |
| rotor stator | - | 1000-3600 | 2000-4200 |
| high speed disperser | - | 1200-3600 | 5000-6000 |



รูปที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบขนาดผงแร่คาลโคไพไรต์ต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้ เพื่อบดหัวแร่คาลโคไพไรต์ (Szegvari and Yang, 1999)



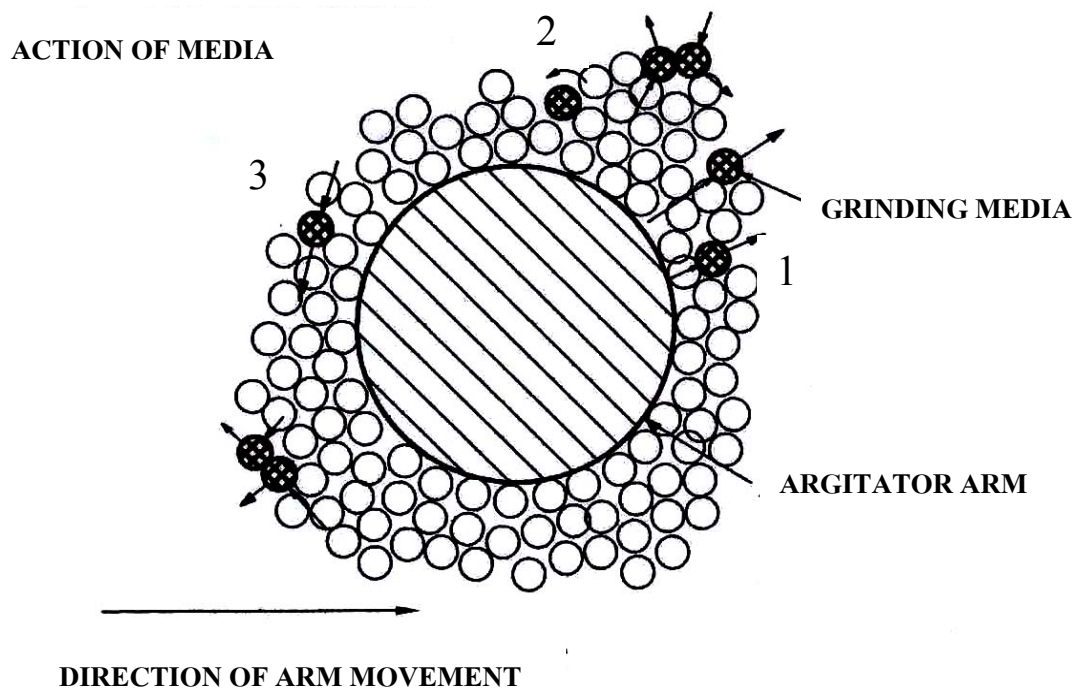
รูปที่ 1.3 แสดงการเคลื่อนที่ของลูกบอลและผงโลหะ (Szegvari and Yang, 1999)

ประสิทธิภาพของเครื่องบดแร่ที่โรตอร์สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ เพลาชับ เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยแกนในแนวนอนและหมุนอยู่ที่ศูนย์กลางหม้อบดแกนได้หมุนตีลูกบอลให้เกิดการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (random) ลูกบอลจำนวนมากจะวิ่งชนกระแทกวัสดุให้ละเอียดทั้งหม้อบดเป็นสาเหตุให้เกิดการเคลื่อนไหวแบบไม่สม่ำเสมอ (irregular movement) แทนการเคลื่อนไหวเป็นกลุ่ม (group movement) (รูปที่ 1.3)

ผลจากการเคลื่อนไหวไม่สม่ำเสมอนี้เกิดจากการหมุนของแกนไปตีลูกบอล ลูกบอลจะวิ่งออกไปกระทบกับลูกบอลอื่นๆ เป็นสาเหตุให้เกิดการเคลื่อนไหวไม่สม่ำเสมอดังนี้

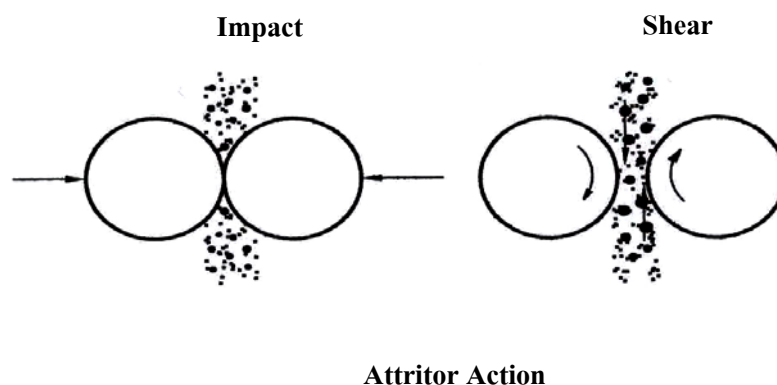
1. แกนตีลูกบอลทำให้ลูกบอลที่ถูกตีไปชนกับลูกบอลอื่น
2. ลูกบอลได้รับแรงจากการตีจะเคลื่อนที่หมุนไป
3. แรงผลึกทำให้ลูกบอลตกไปในที่ว่าง และถูกแกนตีให้เคลื่อนที่ต่อไป

(รูปที่ 1.4)



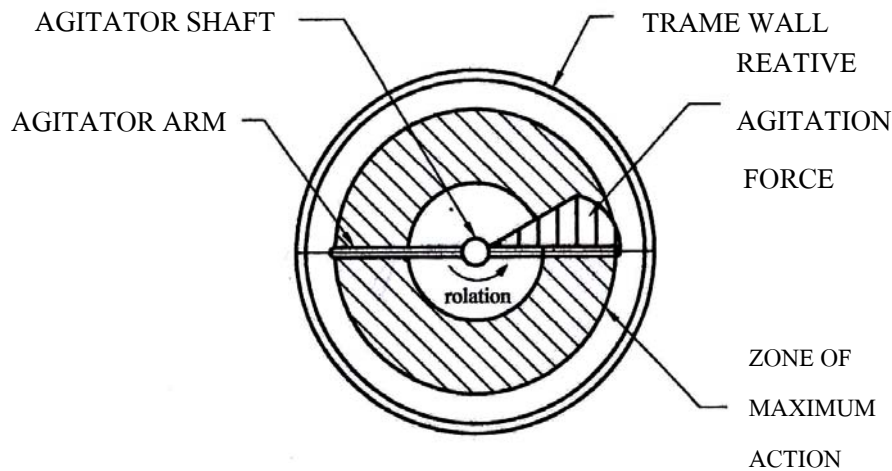
รูปที่ 1.4 แสดงการเคลื่อนที่ของแกนและลูกบอล (Szegvari and Yang, 1999)

กลไกการบดที่ดีมีสองอย่างคือการกระทบ (impact) และการเฉือน (shearing) ในหม้อบดแอทไตรเตอร์การกระทบกระทำโดยลูกบอล ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไม่สม่ำเสมอ (รูปที่ 1.5)



รูปที่ 1.5 แสดงการกระทบและการเฉือน (Szevari and Yang, 1999)

การเฉือนเกิดขึ้นเมื่อใช้ความเร็วรอบต่ำ (200-400 rpm)(Conway Baker, et al., 2002) และปริมาณของลูกบอลน้อย (40%) ของหม้อบด (Barley, et al., 2004) เกิดจากการหมุนของลูกบอลแบบไร้อทิศทางที่แน่นอนความเร็วในการหมุนแตกต่างกัน แต่เมื่อใช้ความเร็วรอบสูงและปริมาณลูกบอลที่มากขึ้นจะทำให้เกิดการผสมผสานแรงเฉือนและแรงกระทบ เป็นผลให้สามารถบดอนุภาคผงโลหะให้มีขนาดเล็กลงและมีการกระจายตัวที่ดี จากหลักการเดียวกัน ทำให้เครื่องบดแอทไตรเตอร์ใช้ในการบดผสม โดยทำให้อนุภาคขนาดต่างๆ แยกตัวและไม่รวมตัวเป็นก้อน (agglomerates) ภายในหม้อบดแอทไตรเตอร์ ลูกบอลมีความสำคัญมาก เมื่อแขนของเพลลาและวัสดุที่บดเคลื่อนที่ไปรอบๆ ภายในหม้อบดตลอดเวลา ระยะทาง 2/3 ของแขนจากจุดศูนย์กลางของหม้อบดพลังงานจำนวนมากจะถ่ายโอนจากแขนไปสู่ลูกบอล แต่พลังงานจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ปลายแขน (รูปที่1.6) (Blecher and Schwedes, 1996 และ Stender, et al., 2004) และในเครื่องขนาดใหญ่ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพขึ้นได้โดยเพิ่มระบบการไหลเวียนของวัสดุ (circulating system) การบดในเครื่องบดแอทไตรเตอร์ไม่ได้ใช้ผนังหม้อบดเป็นตัวบด ดังนั้นจึงสึกหรอเพียงเล็กน้อย ทำให้หม้อบดมีอายุการใช้งานได้นาน จึงเป็นไปได้ที่จะใช้ผนังหม้อบดบางๆ ได้ และสามารถส่งผ่านความร้อนและควบคุมความร้อนได้ดีกว่าหม้อบดผนังหนา ในส่วนของหม้อบดและการสึกหรอของชิ้นส่วน เมื่อเปรียบเทียบเครื่องแอทไตรเตอร์ รุ่น Q-50 ขนาด 50hp กับเครื่องบดละเอียด sand mill ขนาด 60hp โดยชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนเหล็กกล้าทั้งหมดก่อนทำการบด เมื่อชั่งน้ำหนักที่หายไปของเครื่องบดแอทไตรเตอร์ รุ่น Q-50 : เพลลาขับ แขน หม้อบด ลูกบอล หลังจากการบด 6000 ชั่วโมง น้ำหนักหายไปเพียง 10 ปอนด์ ส่วนเครื่องบดละเอียด sand mill หลังจากบดได้ 2000 ชั่วโมงของการปฏิบัติงาน ชิ้นส่วนที่เป็นเหล็กกล้าทั้งหมดแต่ ลูกบอลเป็นเซอร์โคเนียม น้ำหนักเหล็กกล้าหายไป 75 ปอนด์



รูปที่ 1.6 แสดงการถ่ายพลังงานจากแกนสู่ลูกบอล (Szegvari and Yang, 1999)

สมการเกี่ยวกับการบดของเครื่องบดแอทไตรเตอร์ได้ถูกพัฒนาขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับ เวลาในการบด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา แขน หม้อบด และความเร็วในการหมุน (สมการที่ 1.1)

$$T = \frac{KD^3}{\sqrt{N}} \quad (1.1)$$

เมื่อ T = เวลาที่ใช้ในการบดให้ได้ความละเอียดค่าหนึ่ง (Median particle size)

K = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการบด ชนิดของเพลลาขับ แขน หม้อบดและชนิดของเครื่องแอทไตรเตอร์

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล

N = ความเร็วรอบของเพลลา

อีกนัยหนึ่งเวลาของการบดเป็นปฏิภาคโดยตรงกับขนาดของลูกบอล และในทางกลับกัน ถ้าลดความเร็วรอบลง ก็จะไปเพิ่มเวลาในการบด ลูกบอลเป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการบดละเอียด โดยทั่วไปถ้าใช้ลูกบอลที่มีขนาดเล็กกว่า จะบดได้เร็วกว่าเพราะว่ามีจำนวนลูกบอลมากกว่า และมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าอย่างไรก็ตามถ้าลูกบอลเล็กกว่า 3.1 มิลลิเมตร สิ่งที่น่าคำนึงถึงคือ มวลของลูกบอลจะน้อย เป็นผลให้แรงกระแทก (impact force) น้อย และทำให้เวลาในการบดยาวอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นถ้าไม่ต้องการบดละเอียดมาก ๆ ใช้บอลขนาดโตกว่า จะบดได้เร็วกว่า (รูปที่ 1.7)

หลักเกี่ยวกับการถ่ายโอนพลังงานและการใช้พลังงาน ที่เกิดขึ้นในเครื่องบดแอทไทรเตอร์ ขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งที่ได้รับความเค้น (SN คือจำนวนเหตุการณ์ทั้งหมดที่เกิดความเค้น) และพลังงานที่ถ่ายโอน (SE คือพลังงานที่ถ่ายโอนไปที่อนุภาคระหว่างได้รับความเค้น 1 เหตุการณ์) จากการศึกษาของสถาบัน Institute of Mechanical Process Engineering ที่ TU Braunschweig โดยเฉพาะการศึกษาของ Kwade และคณะ (1996) และ Becker (1999) ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าพลังงานจำเพาะ (specific energy, SE_{GM}) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนเหตุการณ์ของความเค้น (SN) โดยพลังงานที่ถ่ายโอนจากการชนของลูกบอล 2 ลูกไปยังอนุภาค (SE_{GM}) จะเป็นไปตามสมการที่ (1.2) (สมการที่ 1.2-1.7 หน่วยเป็นระบบ SI units)

$$SE_{GM} = d_{GM}^3 \rho_{GM} v_t^2 \quad (1.2)$$

เมื่อ d_{GM} = เป็นขนาดของลูกบอล

ρ_{GM} = เป็นความหนาแน่นของลูกบอล

v_t = เป็นความเร็วของแกนหมุน

ในกรณีที่ใช้ลูกบอลขนาดเดียวและมีความหนาแน่นคงที่จะได้ว่า

$$SE_{GM} \propto v_t^2 \quad (1.3)$$

Zheng และคณะ (1999) ได้เสนอการหาค่าพลังงานจำเพาะ (Specific energy, E_v) ของการบดด้วยเครื่องบดแอทไทรเตอร์ดังนี้

$$E_v = \frac{E}{V} \quad (1.4)$$

เมื่อ E = พลังงานที่ให้ระหว่างการบด

V = ปริมาตรของวัสดุที่บด

การหาประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน, E_f หาได้จากสมการ (1.5)

$$E_f = \frac{\Delta S}{E_v} \quad (1.5)$$

ใช้พลังงานจะมีค่าสูงเมื่อสามารถบดได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ (มีพื้นที่ผิวมาก) โดยใช้พลังงานที่ให้น้อยหรือกล่าวได้ว่าเมื่อใช้พลังงานจำเพาะเท่ากันประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อบดอนุภาคได้ละเอียดมากกว่า นอกจากนี้ Magini และคณะ (1995) ยังได้เสนอวิธีการถ่ายโอนพลังงานจากการชนกันของลูกบอลไปสู่อนุภาคที่บด (ติดอยู่กับผิวลูกบอล) เมื่อบดด้วยเครื่องบด planetary mill ซึ่งมีลักษณะการวิเคราะห์คล้ายกันกล่าวคือในการชนของลูกบอล 1 ครั้งพลังงานจลน์ที่สูญเสียไปจากการชนแบบยืดหยุ่นไม่สมบูรณ์จากการถ่ายโอนไปสู่อนุภาคที่ติดอยู่ที่ผิวลูกบอลในขณะที่ยังชนกันดังนี้

$$\frac{\Delta E}{Q_{max}} = [7.66 \times 10^{-2} R_I^{1.2} \rho_b^{0.6} E^{0.4}] d_b \Omega^{1.2} / \sigma \quad (1.6)$$

เมื่อ $\frac{\Delta E}{Q_{max}}$ = พลังงานที่ถ่ายโอนจากการชนของลูกบอลไปสู่อนุภาคต่อมวลของอนุภาคที่ถูกบด

ในการชนแต่ละครั้ง

R_I = รัศมีของแกน

ρ_b = ความหนาแน่นของลูกบอล

E = โมดูลัสความยืดหยุ่นของลูกบอล

d_b = เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล

Ω = ความเร็วรอบ

σ = ความหนาแน่นของอนุภาคที่เคลือบ (หรือติด) อยู่บนผิวของลูกบอลที่วิ่งชนกัน

ดังนั้นพลังงานทั้งหมดที่ถ่ายโอนไปยังอนุภาคที่ถูกบดจะขึ้นอยู่กับความถี่ (หรือความเร็วรอบต่อนาที) และเวลาที่ใช้ในการบด (Yang, et al., 1997) ดังนี้

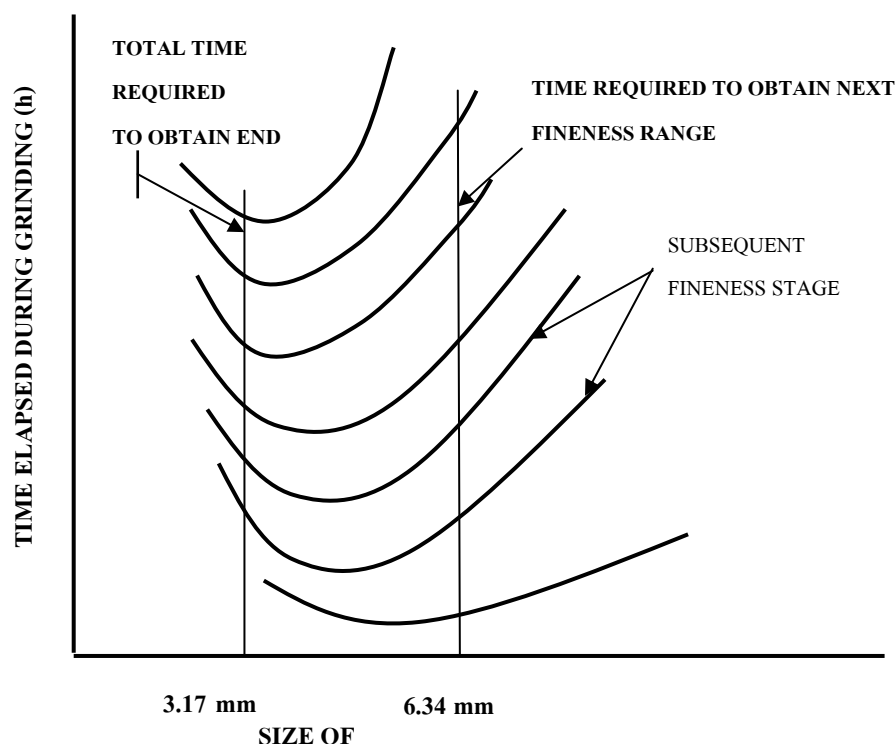
$$E_t = \frac{\Delta E}{Q_{max}} ft \quad (1.7)$$

เมื่อ E_t = พลังงานทั้งหมด

f = ความถี่ของการกระแทก

t = เวลาบด

จากการศึกษาของ Magini และคณะยังพบว่ากำลังไฟฟ้าที่วัดโดยตรงกับค่าที่คำนวณได้จากสมมติฐานการถ่ายโอนพลังงานที่เสนอมีความสัมพันธ์กันอย่างดี ซึ่งหมายถึงผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ในกรณีทีอนุภาค



รูปที่ 1.7 แสดงเวลาของการบดเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับขนาดของลูกบอล (Szegvari and Yang, 1999)

การเลือกลูกบอลขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างซึ่งเกี่ยวข้องกับเรื่องต่อไปนี้

1. โดยทั่วไปลูกบอลที่มีความถ่วงจำเพาะสูง จะดีกว่าลูกบอลที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ ลูกบอลควรมีความถ่วงจำเพาะมากกว่าวัสดุที่บด วัสดุที่เหนียวสูงต้องการลูกบอลที่มีความหนาแน่นสูงกว่าเพื่อป้องกันการลอย
2. ขนาดป้อนครั้งแรก (initial feed size) ลูกบอลที่มีขนาดเล็กกว่าจะยากในการบดวัสดุที่มีขนาดโตกว่า
3. ขนาดสุดท้ายของอนุภาค (final particle size) ลูกบอลขนาดเล็กกว่ามีประสิทธิภาพมากเมื่อต้องการบดอนุภาคเล็กมาก ๆ
4. ความแข็ง (hardness) ลูกบอลที่แข็งกว่า มีประสิทธิภาพในการบดมากกว่าและอายุการใช้งานยาวนานกว่า

5. pH กรดเข้มข้นหรือวัสดุที่บด อาจทำปฏิกิริยากับลูกบอลโลหะ
6. สีไม่ตก (discoloration) เช่น ถ้าเคลือบสีขาวไว้ก็ควรยังคงขาวอยู่
7. การปนเปื้อนการสึกกร่อนของลูกบอล จะต้องไม่ทำความเสียหายต่อวัสดุที่บดหรือสามารถแยกออกโดยใช้แม่เหล็กหรือทางเคมี
8. หาได้ง่าย (availability) ลูกบอลชนิดพิเศษจำพวกหนึ่งใช้เวลาผลิตนาน
9. ราคา (costs) ลูกบอลบางชนิดอาจแพงกว่า 2-3 เท่าแต่ทนต่อการสึกหรอดีกว่า บางครั้ง 5-6 เท่า เพราะฉะนั้นราคาที่ดีคือราคาที่ใช้งานได้ยาวนาน
10. ขนาดที่ไม่เปลี่ยนแปลง (consistency in size) แม้ว่าลูกบอลขนาดเล็กจะมี

ความสำคัญมากกว่า โดยอุดมคติต้องการขนาดเดียวกันทั้งหมด ลูกบอลต้องอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์หรือไม่แตกหัก หมั่นตรวจหรือคัดแยกออกจากลูกบอลที่ชำรุดหรือไม่ได้ขนาด

ลูกบอลต่างๆ ไปที่ใช้กับเครื่องบดแอทไตรเตอร์มีหลายชนิด ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอน (carbon steel) เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ทังสเตนคาร์ไบด์ (tungsten carbide) เซรามิก เซอร์โคเนียม แก้ว (glass) ฟลินสโตน (flintstones) และเอกซ์โซติก (exotics) เช่น ซิลิคอนไนไตรด์ ซิลิคอนคาร์ไบด์

ลูกบอลเหล็กกล้าคาร์บอน ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 7.8 ปกติใช้มากที่สุด มีความแข็ง ไม่แพง หาได้ง่าย ชนิดธรรมดา เหตุผลที่นิยมใช้คือความแข็ง

ลูกบอล chrome steel มีส่วนผสมโครเมียม 1.5% โครเมียมทำให้แข็งและเป็นหนึ่งในลูกบอลที่ดีที่สุด มีสมบัติคล้าย ๆ กับเหล็กกล้าไร้สนิม สามารถใช้กับวัสดุที่มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน ๆ ได้

เหล็กกล้าไร้สนิม ที่มี 16-18% โครเมียม แพงกว่าลูกบอลเหล็กกล้าคาร์บอน 5 เท่า เหล็กกล้าไร้สนิมมีดิสโลเคชันน้อยกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 440C มีสภาพแม่เหล็ก ช่วยลดการปนเปื้อนเหล็กได้ ลูกบอลเหล็กกล้าไร้สนิม series 300 ทนการกัดกร่อนดีกว่าไม่เป็นสนิม สึกหรอน้อย แม้ว่าโดยทั่วไปเวลาในการบดมากกว่า

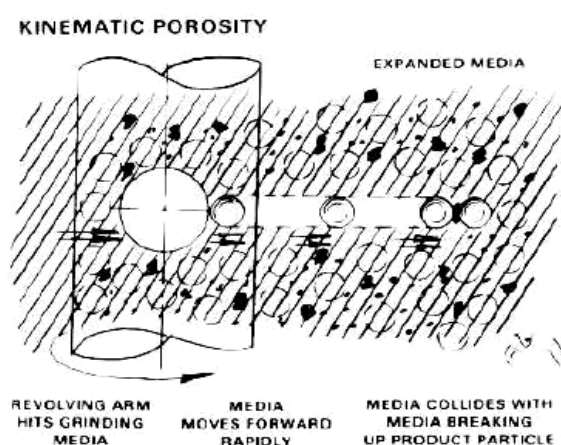
ทังสเตนคาร์ไบด์ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 15 แข็งและแน่น แต่แพงมากใช้สำหรับวัสดุแข็งเช่น ทังสเตนคาร์ไบด์ โคบอลท์หรือโลหะแข็ง

ลูกบอลเซรามิกได้แก่ steatite มีส่วนประกอบหลักคือ 64% ซิลิกาผสมด้วย 26% แมกนีเซียมออกไซด์และ 6% อะลูมินา และ mullite มีส่วนประกอบหลักคือ 74% อะลูมินา ผสม ซิลิกา และแมกนีเซียมออกไซด์ ใช้กับวัสดุโลหะ ไม่ใช้กับวัสดุที่สึก บอลเซรามิก สึกหรองง่ายมากซึ่งลูกบอลเหล็กจะทนกว่ามาก อย่างไรก็ตามเนื่องจากความหนาแน่นต่ำจึงใช้เวลาในการบดยาวกว่า

เครื่องแอทไตรเตอร์แบ่งตามกรรมวิธีการบด มี 3 ชนิด

- 1.แบบบดเป็นชุด (batch)
- 2.แบบบดต่อเนื่อง (continuous)
- 3.แบบบดหมุนเวียน (circulation)

batch attritor มีหม้อบดผนังสองชั้น บรรจุลูกบอล ความคมอุณหภูมิด้วยน้ำไหลผ่านระหว่างผนังสองชั้น วัสดุที่ใช้ทำผนังโดยทั่วไปใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 (S304) เหล็กกล้าหรือเคลือบเซรามิก เคลือบพลาสติกหรือยาง การผลิตขนาดใหญ่ (production size attritor) มีระบบป้อนวัสดุโดยใช้ป้อนอยู่ภายใน การบำรุงรักษาสามารถทำในขณะที่เครื่องกำลังทำงานได้ อนุภาคมีการกระจายตัวดี อนุภาคผงโลหะต่างๆ ไม่ต้องผสมมาก่อน สามารถผสมกันเองในหม้อบด (chamber) การตรวจสอบและแก้ไขส่วนผสมต่างๆ ทำได้ในระหว่างที่เดินเครื่องอยู่โดยไม่ต้องหยุดเครื่องแต่อย่างใด สามารถใช้กับวัสดุความหนาแน่นสูง เช่น ทังสเตนคาร์ไบด์ ป้อนวัสดุผ่านวาล์วด้านล่างขณะเครื่องเดินด้วยความเร็วต่ำ บดที่อุณหภูมิสูง 500 °C บดภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย โดยใช้ไอรังหรือแผ่นกันรั่วชนิดอื่นเป็นอุปกรณ์กันก๊าซรั่ว สามารถใช้บดวัสดุได้หลายชนิดเช่น rare earth magnets แอทไตรเตอร์ขนาดห้องปฏิบัติการมีหม้อบดขนาด 0.750 ลิตร หรือ (เล็กสุดขนาด 0.125 ลิตร) ขนาดใหญ่มีหม้อบดขนาด 3000 ลิตร แอทไตรเตอร์ขนาดห้องปฏิบัติการ ภายในหม้อบดเคลือบด้วยเซรามิก (อะลูมินา) เซอร์โคเนียมออกไซด์ ซิลิกอนไนไตรด์ โพลียูรีเทน ยางเกรดดี (Good grade rubber) และ tefzel ความคมอุณหภูมิโดยระบายความร้อนสู่ระบบหมุนเวียน แอทไตรเตอร์ใช้บดวัสดุแข็งและอ่อน ferrite ทังสเตนคาร์ไบด์ โคบอลต์อะลูมิเนียมและโลหะอื่นๆ เครื่องบดแอทไตรเตอร์ที่ประสบความสำเร็จมาก ๆ คือ dry grinding attritor มีเพลลา แชน ลูกบอลเคลื่อนที่แบบสุ่มในช่องว่างในหม้อบดเรียกว่า kinematics porosity ลูกบอลและอนุภาคเคลื่อนที่อย่างอิสระและชนกระทบกัน (รูปที่ 1.8) ทำให้สามารถผลิตโลหะผสมด้วยวิธีนี้ได้จากการเกิดเชื่อมเย็น cold welding และการแพร่ของธาตุหรือการกระจายตัวฝังประในเนื้อโลหะของเฟสออกไซด์หรือเฟสอื่น ซึ่งเรียกว่า DSM (dispersion strengthened metal) ในกระบวนการนี้ผลของ kinematics porosity ทำให้วัสดุแตกเป็นชิ้นเล็กต่อมาตีกระแทกเข้าด้วยกัน จนรวมตัวกลายเป็นโลหะผสมตัวใหม่ (DSM)



รูปที่ 1.8 แสดง Kinematics porosity (Szegevari and Yang, 1999)

พารามิเตอร์ในการบดด้วยเครื่องแอทไตรเตอร์ที่สำคัญมีดังนี้

พลังงานการกระแทกซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องบดตลอดจนความหนาแน่นและขนาดของบอล ในการเกิดผลึกจะใช้พลังงานการกระแทกสูงแต่จะใช้พลังงานต่ำลงเมื่อเกิดเฟสอะมอร์ฟัส (Soni, 2000)

ขนาดของบอลบด มีผลต่ออุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ ขนาดของบอลมีผลต่อการเชื่อมและการแตกหักของอนุภาค ในการบดควรใช้บอลขนาดเดียวกัน ทั้งนี้เพราะถ้าลูกบอลมีหลายขนาดในขณะที่บดมีแนวโน้มจะจัดเรียงตัวกันเป็นชั้น ลูกบอลขนาดใหญ่จะอยู่ด้านล่างและขนาดเล็กจะอยู่ด้านบน อัตราส่วนขนาดของลูกบอลต่อขนาดอนุภาคก็มักมีความสำคัญ กล่าวคือลูกบอลขนาดใหญ่ด้านล่างก็จะทำให้อนุภาคขนาดใหญ่แตกได้ดี ส่วนลูกบอลขนาดเล็กด้านบนก็จะทำให้เกิดอัตราการบดอนุภาคขนาดเล็กสูง ทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงขึ้น (Barley, et al, 2004 และ Blecher and Schwedes, 1996)

อัตราส่วนปริมาณลูกบอลต่ออนุภาคผงวัสดุ อัตราส่วนปริมาณลูกบอลต่ออนุภาคสูงทำให้เกิดความถี่สูงในการชนกระแทกบอลต่ออนุภาค ทำให้พลังงานการกระแทกสูงขึ้นขณะเดียวกันก็ต้องการกำลังไฟฟ้าต่อวินาทีหรือพลังงานอื่นเพิ่มขึ้นเช่นกัน ความถี่ในการชนกระแทกต่ำสุดใช้อัตราส่วนปริมาณลูกบอลต่ออนุภาคผงวัสดุอยู่ในช่วง 5-30 ในการเกิดอะมอร์ฟัส พบว่าจะเพิ่มอัตราส่วนปริมาณลูกบอลต่ออนุภาคผงวัสดุ แต่มีการปนเปื้อนของเหล็กจากเครื่องบด โดยทั่วไปใช้อัตราส่วนประมาณ 100 ปริมาณลูกบอลในหม้อบด (Media loading) เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ควบคุมลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นจากการชนของลูกบอล ที่ปริมาณลูกบอลสูงๆ (60%) จะทำให้เกิดแรงกระแทกและแรงกดบนอนุภาคจนแตกในบริเวณด้านบนและด้านล่างของหม้อบด และที่มีปริมาณลูกบอล 70% จะเกิดการแตกจากแรงกระแทกบริเวณด้านล่างของหม้อบด เพราะลูกบอลใน โชนนี้เคลื่อนที่ชนกันด้วยความเร็วสูง (Barley, et al., 2004) ส่วนที่ปริมาณลูกบอลน้อยๆ จะทำให้เกิดแรงเฉือน บนอนุภาคมากกว่า

ความเร็วรอบเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุด อย่างหนึ่ง ถ้าความเร็วรอบของเครื่องบดสูงจะเกิดการปนเปื้อนได้เช่นกัน ชั้นของลูกบอลในหม้อบดในขณะบดจะสูงขึ้นถ้าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจึงยังผลให้เกิดแรงกระแทกเป็นส่วนใหญ่ เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคที่ได้มีขนาดเฉลี่ยใหญ่กว่าเมื่อบดที่ความเร็วรอบต่ำกว่า (ลักษณะของแรงเป็นแบบซัดสีมากกว่า) (Conway Baker, et al., 2002) จากการศึกษาของ Becker และคณะ (2001) พบว่าในการบดหินปูนด้วยเครื่องบดแอทไตรเตอร์ ขนาดของลูกบอล ความหนาแน่นของลูกบอลและความเร็วรอบของแกนหมุน มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างความละเอียดของผลผลิตและพลังงานจำเพาะที่ให้ เนื่องจากความเข้มข้นของความเค้นของลูกบอลบนนั่นเองกล่าวคือที่ความละเอียดค่าหนึ่งจะเกิดจากความเข้มข้นของความเค้นที่เหมาะสมซึ่งเกิดจากพลังงานจำเพาะที่ให้ต่ำสุด อุณหภูมิเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ทำให้เกิดโครงสร้างที่ต้องการ ระบบความร้อนในการผสมเป็นลบ ($\Delta H_{\text{mix}} < 0$) เช่น Ni - Zr

การเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราการแพร่เกิดเร็วขึ้น สำหรับระบบความร้อนในการผสมผสมเป็นบวก ($\Delta H_{\text{mix}} > 0$) การแพร่อาจเกิดขึ้นช้ากว่าเช่น ผลของโลหะผสม Cu - Ta อุณหภูมิเริ่มต้นจะเกิดหลังจากบดเป็นเวลา 30 ชั่วโมง

การแพร่อาจเกิดขึ้นช้ากว่าเช่น ผลของโลหะผสม Cu - Ta อุณหภูมิเริ่มต้นจะเกิดหลังจากบดเป็นเวลา 30 ชั่วโมง

บรรยากาศ ในการผลิตโลหะผสมเชิงกลส่วนมากจะใช้ก๊าซเฉื่อยเช่น ในการเตรียมโครงสร้างอะมอร์ฟัส $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{40}$ โดยวิธีโลหะผสมเชิงกลจะใช้บรรยากาศ (air) และก๊าซฮีเลียมเป็นต้น

การปนเปื้อนมาจากการสึกของหม้อบดและบอลบดแต่น้อยมาก (ppm level) ระดับของการปนเปื้อนแตกต่างกันออกไปตามชนิดของเครื่องบดแต่ส่วนมากเกิดจากการสึกของเครื่องมือที่เป็นเหล็ก ดังนั้นโดยทั่วไปจึงเลือกใช้ผนังหม้อบดหรือลูกบอลที่มีการปนเปื้อนน้อยที่สุดหรือไม่ทำความเสียหายกับระบบได้

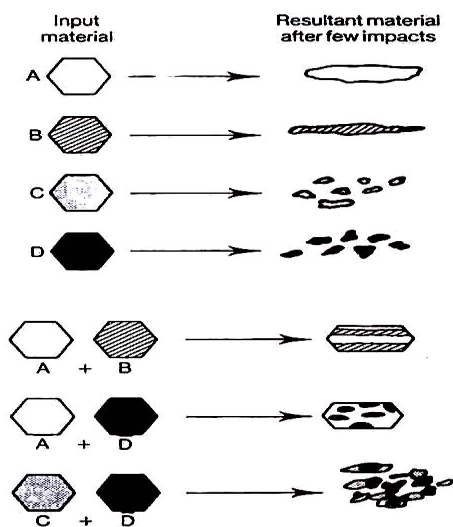
1.2.2 โลหะผสมเชิงกล

วิธีโลหะผสมเชิงกลเป็นวิธีเชิงกล ที่ใช้สำหรับเตรียมโลหะผสมหรือวัสดุผสม รุ่นแรกๆจะใช้เตรียมวัสดุบางชนิดที่ใช้ในงานอวกาศ ในภายหลังทำในเชิงพาณิชย์โดย International Nickel Company (INCO) กระบวนการนี้ยังใช้ผลิตอนุภาคผงขนาดละเอียดโดยการควบคุมโครงสร้างขนาดเล็กหรือสารประกอบระหว่างโลหะและอนุภาคผงโลหะเป็นอะมอร์ฟัส ตัวอย่างที่ใช้วิธีการนี้เช่นการผลิต oxide dispersion strengthened nickel base super alloys for gas turbine (มี Y_2O_3 กระจายตัวอยู่ในโลหะผสมนิกเกิล MA 754 ซึ่งมีส่วนประกอบ 20Cr - 0.3Al-0.5Ti-0.05c-0.6 Y_2O_3 และ Ni ที่เหลือ) Oxide dispersion strengthened iron และ Cobalt โลหะเบาหลายชนิดเช่นอะลูมิเนียม ไทเทเนียมและแมกนีเซียม

1.2.2.1 กระบวนการโลหะผสมเชิงกลและเครื่องมือที่ใช้

กระบวนการพื้นฐานของโลหะผสมเชิงกล ขึ้นอยู่กับการเชื่อมติดการแตกหักและการเชื่อมติดใหม่ ของอนุภาคที่ผสมกันในบอลมิลพลังงานสูงกระบวนการประกอบด้วย microforging, cold welding และการแตกของอนุภาคเพื่อที่จะผลิตวัสดุเป็นแผ่นขนาดละเอียด ซึ่งเกิดจากการนวดและการกระทบทำให้อนุภาคฝังติดกันระหว่างบอลที่ชนกัน อาจทำให้เกิดการเคลือบผิวชั้นที่เคลือบอาจจะบวมออกและถูกทำให้ละเอียด โดยกลไกของบอล มิลล์พลังงานสูง ในบอลมิลล์พลังงานสูงประกอบด้วยกระบวนการ welding และการแตกของอนุภาคซึ่งจะเกิดสมดุลกันที่จุดใดจุดหนึ่งและขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาค (composite powder)

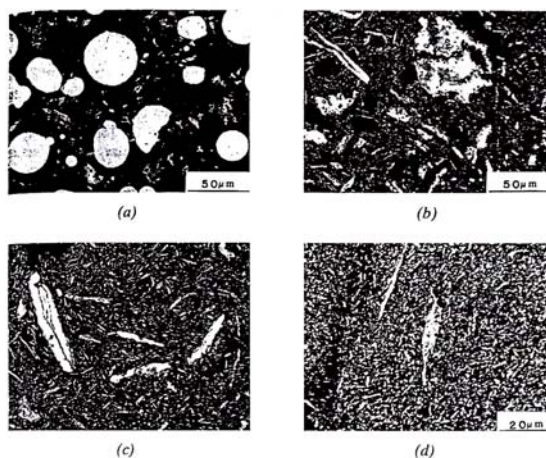
จะยังคงมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับกระบวนการของการบดพลังงานต่ำ ที่อนุภาคจะถูกทำให้ละเอียดโดยการบดแบบธรรมดาด้วยแรงเฉือน กระบวนการโลหะผสมเชิงกลจะถูกใช้สำหรับเตรียมวัสดุเช่น โลหะเหนียว (ductile metals) โลหะผสมเหนียว (ductile alloys) และสารประกอบโลหะเหนียว (ductile intermetallic compound) โลหะเปราะ (brittle metal) โลหะผสมเปราะ (brittle alloys) (รูปที่ 1.9) กระบวนการโลหะผสมเชิงกล แสดงด้วยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ดังรูปที่ 1.10a ถึง 1.10d ในตัวอย่างนี้จะเลือกวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ วัสดุเหนียวถูกเตรียมด้วยวิธี gas atomization ได้แก่ Ni_3Al intermetallic compound และวัสดุเปราะคืออนุภาคผงไทเทเนียมไดโบไรด์ (TiB_2) ใช้บดผสมในเครื่องบดแอทไทรเตอร์ ในอัตราส่วน 20 % vol TiB_2 และ 80 % vol Ni_3Al บดที่เวลาต่างๆแล้วนำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาค รูปที่ 1.10a แสดงส่วนผสมของอนุภาคก่อนที่จะบดผสม อนุภาคผง Ni_3Al จะมีรูปร่างกลมและ TiB_2 จะมีขนาดเล็กและซับซ้อน รูปที่ 1.10b แสดงภาคตัดขวางของอนุภาคผงหลังจากบดด้วยเครื่องบดแอทไทรเตอร์ 3 ชั่วโมง จะเห็นว่าอนุภาคจะเริ่มยาวแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ แผ่นๆ อนุภาคโตจะแตกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติกสูงมากและจะเห็นได้ชัดว่าอนุภาค TiB_2 เรียงเป็นชั้นในเนื้อของโลหะเหนียว รูปที่ 1.10c แสดงโครงสร้างจุลภาคหลังวัสดุถูกบด 6 ชั่วโมง โครงสร้างจะละเอียดมากขึ้นเมื่อเทียบกับการบด 3 ชั่วโมงจะมีอนุภาคยาวๆและใหญ่อยู่บ้าง แต่แสดงให้เห็นการแตกเกิดขึ้นที่ตรงกลางของอนุภาค การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก ต่อมาจะทำให้อนุภาคเกิดรอยร้าวและแตกเป็นอนุภาคมีขนาดเล็กในที่สุด รูปที่ 1.10d แสดงโครงสร้างภายหลังการบด 15 ชั่วโมง จากภาพขยายจะเห็นว่าอนุภาคมีขนาดเล็กลง อย่างไรก็ตามจะมีอนุภาคโตแบนๆ อยู่บ้าง ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นผงโลหะผสมเชิงกลโดยสมบูรณ์ ซึ่งไม่สามารถแยกเฟสได้อย่างชัดเจน การผลิตผงโลหะผสมเชิงกลสามารถผลิตด้วยเครื่องบดหลายชนิดตามที่อธิบายไว้ในหนังสือ ASM handbook โดย Kuhn และคณะ (1985) และมีสองชนิดที่มีชื่อเสียงคือ attritor ball mill ดังรูปที่ 1.1 และ spex shaker สำหรับการผลิตอนุภาคผงในปริมาณมาก จะใช้เครื่องบดแอทไทรเตอร์ เช่น Szegvari grinding mill เครื่องบดนี้ประกอบด้วย หม้อบด ที่หล่อเย็นด้วยน้ำและมีใบพัดหมุน (rotating impeller) ลักษณะใบพัดเป็นเพลาดั้งในแนวตั้ง มีแขนรอบ ๆ เพลา เพื่อหมุนและตีบอล แขนอาจมีรูปร่างตรง หรือเป็นตัวแอล ความจุของเครื่องบดอยู่ระหว่าง $0.04-0.4 \text{ m}^3$ (5-500 ลิตร) เพลาจะหมุนด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที (4.2 Hz) มีแผ่นกันรั้วที่ส่วนบน ซึ่งทำให้สามารถปรับใบพัดเป็นเพลาดั้งในแนวตั้ง มีแขนรอบ ๆ เพลา เพื่อหมุนและตีบอล แขนอาจมีรูปร่างตรง หรือเป็นตัวแอล ความจุของเครื่องบดอยู่ระหว่าง $0.04-0.4 \text{ m}^3$ (5-500 ลิตร) เพลาจะหมุนด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที (4.2 Hz) มี แผ่นกันรั้วที่ส่วนบนซึ่งทำให้สามารถบดภายใต้บรรยากาศต่างๆได้



รูปที่ 1.9 การเปลี่ยนแปลงของวัสดุภายหลังจากการผ่านกระบวนการ โลหะผสมเชิงกล

A และ B วัสดุเหนียว C และ D วัสดุเปราะ A + B เกิดการเชื่อมกัน A + D วัสดุเปราะ ผังในวัสดุเหนียว C + D วัสดุเปราะมาก ผังในวัสดุเปราะน้อย

(Animesh, 1995)



รูปที่ 1.10 โครงสร้างจุลภาคของกระบวนการ MA ของ Nickel aluminide intermetallic

compound 20 vol % titanium diboride (a) ผสมผงโลหะ (as-mixed powder) (b) บด 3 ชั่วโมง (c) บด 6 ชั่วโมง (d) บด 15 ชั่วโมง

(Animesh, 1995)

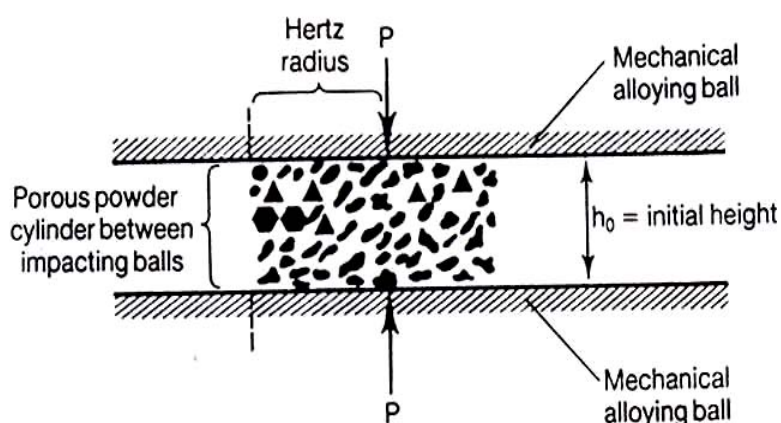
1.2.2.2 การปนเปื้อน (contamination)

ในระบบการบดผสมโลหะผสมเชิงกลอนุภาคจะสัมผัสกับลูกบอลที่กระทบ และผนังของหม้อบด สำหรับการบดอนุภาคที่อ่อนกว่าจะใช้ organic surfactant ด้วย surfactant นี้จะอยู่ภายในก้อนอนุภาค บรรยากาศที่ใช้ระหว่างกระบวนการโลหะผสมเชิงกล สามารถทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ ตามปกติลูกบอลจะทำด้วย bearing steel 52100 ซึ่งทำให้เกิดการปนเปื้อนในระบบได้ ความพยายามที่จะลดการปนเปื้อน บางครั้งลูกบอลที่ใช้จะทำด้วยวัสดุที่ใกล้เคียงกับโลหะผสมที่จะทำ อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะใช้วัสดุที่เหมือนกับโลหะผสมที่จะทำเป็นลูกบอล ดังนั้นจึงมีเหล็กเข้ามาปนอยู่ พบว่าเหล็กอาจปนเปื้อนสูงถึง 5% เมื่อทำการบดนานถึง 10-30 ชั่วโมง วิธีหนึ่งที่ช่วยลดการปนเปื้อนของลูกบอลคือการเคลือบลูกบอลด้วยวัสดุที่จะทำโลหะผสมเชิงกล ตัวอย่างเช่น ถ้าอนุภาคของอนุภาคที่จะผลิตเป็นออกไซด์ที่กระจายตัวใน nickel-base super alloy powder ลูกบอลจะถูกเคลือบด้วยชั้นบางๆของนิกเกิล โดยให้ลูกบอลตกอย่างอิสระในหม้อบด ซึ่งมีการสลายตัวของ nickel carbonyl อยู่ การเคลือบจะป้องกันปัญหาการปนเปื้อน ถึงแม้ว่าโลหะผสมเชิงกลเป็นกระบวนการแห้ง แต่จะใช้ surfactant เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเชื่อมเย็บ มากเกินไปและทำให้เกิดสมดุลระหว่างการเชื่อมเย็บและการแตก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวัสดุอ่อนและเหนียวคล้ายกับอะลูมิเนียมหรือดีบุก สารประกอบอินทรีย์ที่ใช้เป็น surfactant จะเป็นขี้ผึ้ง (wax) ซึ่งมีชื่อทางการค้า nopsowax-22DSP, C₂H₂ (C₁₈H₃₆ON)₂ พบว่าหลังจากบดไป 1 ชั่วโมงตรวจด้วย DSC ไม่พบ surfactant ปนอยู่และเชื่อว่า surfactant จะไม่ปนอยู่ในโลหะผสมหรืออาจถูกกำจัดออกไปด้วยก๊าซ แต่บางกรณีอาจมีปนอยู่บ้าง บรรยากาศของการบดผสม ก็เป็นสาเหตุของการปนเปื้อนในอนุภาคผง ได้พบว่าผงอะลูมิเนียมจะมีออกซิเจนเพิ่มขึ้น 3 เท่า หลังจากการบดผสม 3 ชั่วโมง การแก้ปัญหานี้มักทำในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย อย่างไรก็ตามบรรยากาศก๊าซเฉื่อยอาจจะบริสุทธิ์ไม่พอ จะทำให้เกิดการปนเปื้อนได้เช่นกัน เช่นก๊าซอาร์กอนที่ไม่บริสุทธิ์

1.2.2.3 กลไกที่ทำให้แข็งแรงและเป็นโลหะผสม

กลไกการฟอร์มตัวของโลหะผสมเชิงกล และการทำให้แข็งแรงจะเป็นลักษณะเฉพาะเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ระหว่างการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคของระบบต่างๆเช่น เหนียว-เหนียว เหนียว-เปราะและ เปราะ-เปราะ ซึ่งมีการศึกษาอย่างกว้างขวาง การเกิดสารประกอบระหว่างโลหะและวัสดุอะมอร์ฟัสใหม่ ด้วยวิธีโลหะผสมเชิงกลมีการวิเคราะห์ไว้อย่างละเอียด ฟิสิกส์ของโลหะผสมเชิงกลได้มีการศึกษาโดยนักวิจัยไม่ก็กลุ่มที่พยายามเสนอโมเดลและการทดลองเพื่อสนับสนุนโมเดลดังกล่าว โมเดลของโลหะผสมเชิงกลเป็นเรื่องยากและซับซ้อน ซึ่งในอดีตผู้ให้ความสนใจไม่มากอย่างไรก็ตาม ความสำคัญของฟิสิกส์โลหะผสมเชิงกล

พยายามที่โยงความสัมพันธ์ ที่จะให้เข้าใจถึงพื้นฐานและความหมายที่จะให้สามารถทำนายกระบวนการได้ กระบวนการของโลหะผสมเชิงกลประกอบด้วยกระบวนการชนระหว่างอนุภาคและบอลหรือผนังของหม้ออบ ผลลัพธ์สุดท้ายของกระบวนการคือการแตกของอนุภาคและการรวมกลุ่มกัน (coalescence) ในเครื่องบดแอทไตรเตอร์ เหตุการณ์ที่เกิดการแตกกันส่วนใหญ่ จะทำให้อนุภาคถูกจับไว้ระหว่างลูกบอล เมื่อองค์ประกอบของอนุภาคเป็นวัสดุเหนียว จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นพลาสติกและเนื้อแข็งแรงขึ้น ปกติทำให้เกิดการแตกได้ ทำให้เกิดผิวใหม่และผิวสะอาดการเชื่อมเย็นระหว่างอนุภาคสองชนิดที่แตกต่างกันสามารถเกิดขึ้นได้ และสุดท้ายอนุภาคผงเป็นเกล็ดประกอบด้วยชั้นของวัสดุสองชนิด ความหนาของชั้นจะถูกทำให้ละเอียดโดยการบดต่อเนื่อง ถึงแม้ว่าขนาดของอนุภาคผงโดยเฉลี่ยจะเริ่มมีขนาดคงที่ได้แม้บดเป็นช่วงสั้นๆ ซึ่งเกิดจากการสมดุลระหว่างการแตกและการรวมกันของอนุภาค (รูปที่ 1.11)



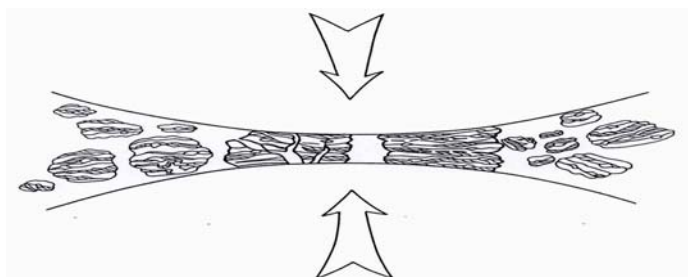
รูปที่ 1.11 แสดงแนวคิด miniforging ที่เกิดขึ้นกับอนุภาคที่อยู่ระหว่างลูกบอลสองลูกที่กระทบกัน ทำให้เกิดการจับเป็นก้อนใหม่ขึ้น (Animesh, 1995)

ปริมาตรของอนุภาคผงที่ถูกกักไว้ระหว่างลูกบอล จะเป็นทรงกระบอกซึ่งมีความสูงเป็น h_0 และรัศมีของ Hertz, r_h รูปแบบของโมเดลนี้ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆเช่น ความเครียด อัตราความเครียด และอุณหภูมิของอนุภาคผงที่เข้าสู่เหตุการณ์ miniforging โมเดลของพารามิเตอร์เหล่านี้ถูกอภิปรายในรายละเอียดโดย Maurice and Courtney ผลของโมเดลแสดงให้เห็นว่า ความเครียดแตกและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นปานกลางและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะไม่เพียงพอที่จะผลิตโลหะผสมเชิงเคมี (Chemical alloying) ค่าความเครียดแตกซึ่งขึ้นอยู่กับผลผลิตของการชนกันก่อนด้วยความเร็วของตัวกลาง (U) และครึ่งหนึ่งของช่วงที่ชนกัน (hertzian collision, τ) หากด้วย h_0 เมื่อ $U\tau/2$ เข้าใกล้ h_0 ทำให้ความเครียดต่อการชน

เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและสามารถเป็นผลทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจะเป็น Stochastic และมีการกระแทกหลายครั้งเมื่อ $\nu\tau \approx 2 h_0$ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อการกระแทก 1 ครั้งและค่าความเครียดกระแทกจะแปรจาก วัสดุชนิดหนึ่งและขึ้นอยู่กับอัตราส่วนที่ป้อน (มวลของลูกบอล/มวลของอนุภาคผง) อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นในระดับมหภาคซึ่งวัดได้ด้วยเทอร์โมคัปเบิลระหว่างการทำโลหะผสมเชิงกล และพบว่าอยู่ในช่วง 333~393 K เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เฉพาะที่การหลอมขององค์ประกอบเฉพาะที่จะเกิดขึ้นได้ การใช้คอมพิวเตอร์คำนวณจลนพลศาสตร์ของการบด แสดงว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นประมาณ 300 K การวิเคราะห์จะใช้วิดีโอถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของลูกบอลซึ่งจะทำให้เคลื่อนที่ช้าลงโดย stroboscope สัญญาณการเคลื่อนที่เป็นอะนาลอกจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยการวิเคราะห์และแปลความหมาย จากคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถสังเกตการกระจัด และความเร็วของการเคลื่อนที่ของลูกบอลอย่างต่อเนื่อง จากโมเดลทำนายได้ว่า การกระแทกส่วนใหญ่จะเป็นผล ทำให้พลังงานกระจายออกไปในช่วง $10^{-3} \sim 10^{-2}$ จูล ภายในเวลา 30 นาทีซึ่งอนุภาคแต่ละอนุภาคจะถูกการชนอย่างน้อย 1 ครั้ง ซึ่งก็พอทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 100~350 K อย่างไรก็ตามจากการคำนวณนี้ไม่ได้ทำนายการหลอมเฉพาะที่ด้วยการเพิ่มของอุณหภูมินี้ สามารถที่จะช่วยทำให้เกิดการแพร่และเกิดโลหะผสมและก่อรูป เป็นสารประกอบระหว่างกระบวนการโลหะผสมเชิงกล ในกรณีที่เป็นส่วนผสมของอนุภาคผง ที่เกิดเป็นสารประกอบระหว่างโลหะจะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เกิดจุดร้อนเป็นที่ซึ่งทำให้เริ่มเกิด ปฏิกิริยาขึ้น และเป็นผลทำให้ก่อรูปเป็นสารประกอบเร็วขึ้น โมเดลจะถูกพัฒนาเพื่อให้หาเวลาในการบดเพื่อเพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคตามต้องการ เมื่อระยะระหว่างเฟสระหว่างวัสดุสองชนิดลดลงถึงระดับวิกฤติหนึ่งจะเกิดโลหะผสมขึ้นอย่างสมบูรณ์ตามสมมติฐาน ความเครียดจริงสะสม 3~5 จำเป็นสำหรับการทำให้เกิดโลหะผสมสมบูรณ์ เวลาที่ต้องการสามารถคำนวณได้ เวลาที่ต้องการจะน้อยลงสำหรับ spex mill เมื่อเทียบกับเครื่องบดแอทไตรเตอร์ เนื่องจากอัตราเร็วในการชนกับที่เกิดขึ้นสูงกว่า และเป็นผลจากความเครียดต่อการกระทบ 1 ครั้งที่มากกว่า ดังนั้นการกระแทกเพียงไม่กี่ครั้งก็สามารถทำให้กระบวนการสมบูรณ์ได้ในกรณีนี้อัตราส่วนบรรจุ (charge ratio) ก็มีอิทธิพลที่สำคัญ เช่น hertzian impact model, impact stress, powder Strain : Powder strain rates และการเพิ่มอุณหภูมิของอนุภาคระหว่างเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก สามารถที่คำนวณค่าประมาณได้ เวลาที่ใช้ในการบดที่ต้องการเพื่อให้ได้โลหะผสมตามต้องการ จะถูกคำนวณและพบว่า ใกล้เคียงกับเวลาที่ได้จากการสังเกต การวิเคราะห์การถ่ายโอนมวลและพลังงาน ระหว่างกระบวนการโลหะผสมเชิงกล ถูกวิเคราะห์โดย Lazarew และคณะ เขาได้พิจารณาระบบของบอลและอนุภาคผงภายในเครื่องบดแอทไตรเตอร์ เป็นองค์ประกอบร่วมกันไม่สามารถอัดได้และเป็นของไหล non-newtonian การวิเคราะห์ได้ระบุว่า การก่อรูปของโลหะผสมเกิดขึ้นในโซนที่มีเกรเดียนต์ของความเร็วสูงและการบดที่ความเร็วสูงเกินไปทำให้ลดการสัมผัสของลูกบอลด้วยกันจะสามารถทำให้หยุดการเกิดเป็นโลหะผสมได้ ดังนั้นควรมีความเร็วรอบพอเหมาะเพื่อทำให้เกิดโลหะผสมเชิงกลที่ต้องการ

1.2.2.4 โลหะผสมเชิงกลที่อย่างน้อยวัสดุชนิดหนึ่งเป็นวัสดุเหนียว

ถ้ามีวัสดุในระบบอย่างน้อย 1 ชนิดที่เป็นวัสดุเหนียว เมื่อถูกบอลกระทบ ก็จะทำให้แบนและเปลี่ยนรูปร่างแบบพลาสติก ในขณะที่วัสดุเปราะจะแตกเป็นขนาดเล็กลง กระบวนการนี้คงดำเนินต่อไปจะ ทำให้เกิดอนุภาคผสม (รูปที่ 1.12)



รูปที่ 1.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายหลังจากถูกการชน 1 ครั้ง เมื่ออนุภาคตั้งแต่ 2 อนุภาค หรือมากกว่าถูกกักไว้ระหว่างการกระทบของลูกบอลจะทำให้เกิดการสัมผัสกัน และก่อรูปเชื่อมติดกัน (Animesh, 1999)

เมื่อเพิ่มเวลาจะทำให้เกิดอนุภาคแบนเป็นชั้นๆ และทำให้อนุภาคแตก และเชื่อมติดกันใหม่ อนุภาคผงที่เปราะก็จะถูกทำให้ละเอียดต่อไปและเริ่มที่จะกระจายตัว อย่างสม่ำเสมอภายในอนุภาค ที่จุดนี้ช่องว่างระหว่างลามลาร์จะลดลงและละลาย ธาตุที่ละลายก่อรูปเป็นกะเปาะของสารละลาย ของแข็ง การฟอร์มตัวสารละลายของแข็งถูกช่วย โดยตำหนิในโครงสร้างที่เป็นจุดอ่อนแอมจะเกิดการแพร่ได้ง่ายความร้อนถูกผลิตโดยพลังงานจลน์ของการกระทบของลูกบอล และมีระยะการแพร่สั้นจะเกิดเฟสกึ่งเสถียร ตกตะกอน (ประ) ภายในอนุภาคผงระหว่างขั้นตอนสุดท้ายของวิธีโลหะผสมเชิงกลของวัสดุเหนียว อนุภาคแบนเป็นชั้นๆจะมีขนาดละเอียดมาก และเป็นกันหอย ด้วยองค์ประกอบของอนุภาคแต่ละอนุภาคที่มีแนวโน้มเป็นองค์ประกอบเริ่มต้นโดยรวม ถ้าอนุภาคเปราะมีอยู่ด้วยตอนนี้ก็จะกระจายอย่างสม่ำเสมอ ภายในอนุภาคแต่ละอนุภาค ในทางปฏิบัติระยะระหว่างอนุภาคเปราะ (dispersoid) ตามแนวเชื่อมติดกันใกล้เคียงกันช่องว่างของการเชื่อมติดกันซึ่งจะลดลงไปเรื่อยๆ เมื่อยังคงบดต่อไป ความแข็งของวัสดุที่ถูกบด ซึ่งเพิ่มขึ้นในค่าด้น ๆ ของกระบวนการ ก็จะถึงจุดอิ่มตัว การอภิปรายที่กล่าวมาแล้วจะใช้ในการพัฒนาวัสดุผสม ด้วยวิธีเชิงกลที่มีองค์ประกอบเริ่มต้นประกอบด้วย วัสดุเหนียว-วัสดุเหนียว หรือวัสดุเหนียว-วัสดุเปราะ การผลิตโลหะผสมด้วยวิธีโลหะผสมเชิงกล Froes ชี้ว่า ถ้าใช้ขนาด

เริ่มต้นของอนุภาคขนาด $100 \mu\text{m}$ แล้วจะใช้เหตุการณ์เพียง 6~8 ครั้ง ก็จะได้อนุภาคแบนเป็นชั้นๆขนาด $0.2 \mu\text{m}$ และใช้เหตุการณ์ 11~13 ครั้ง จะได้อนุภาคแบนเป็นชั้นๆขนาด $0.2 \mu\text{m}$ และใช้เหตุการณ์ 11~13 ครั้ง จะได้อนุภาคแบนเป็นชั้นๆขนาด $0.5 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นระดับอะตอม ในการทดลองผลิตโลหะผสมเชิงกล ของผงโลหะ Ni และ Cr พบว่าโลหะผสมเชิงกล จะสมบูรณ์เมื่อสมบัติแม่เหล็กจะใกล้เคียงกับ cast alloy ที่มีองค์ประกอบเดียวกัน ทำให้ได้โลหะผสมในระดับอะตอม

1.2.2.5 โลหะผสมเชิงกลของวัสดุที่เป็นวัสดุเปราะทั้งคู่

ในระบบที่เป็นวัสดุเปราะทั้งคู่ ไม่มีความเข้าใจอย่างดีเกี่ยวกับกลไกของโครงสร้าง ตามหลักตรรกวิทยา การบดจะเป็นเพียงการลดขนาดของอนุภาคไปสู่ระดับหนึ่งในขณะที่ยังรักษาลักษณะเฉพาะตัวอยู่ อย่างไรก็ตาม การได้สารประกอบระหว่างโลหะ เช่น $\text{Mn}_2\text{-Bi}$ และ Si-Ge (solid solution) จากโลหะเปราะ 2 ชนิด ซึ่งค่อนข้างซับซ้อนกันพอควร ได้มีการสังเกตการฟอร์มตัวของโลหะผสมโดยวิธีโลหะผสมเชิงกลของระบบ Si-28 at\% Ge เมื่อเพิ่มเวลาการบดจากเริ่มต้นที่มีแลตทิซพารามิเตอร์ 2 ชนิด เมื่อบด 5 ชั่วโมง จะสังเกตเป็นแค่ 1 แลตทิซพารามิเตอร์แลตทิซพารามิเตอร์ใหม่นี้สัมพันธ์กับโลหะผสมของวัสดุเดียวกันที่ผลิตโดยวิธีโลหะวิทยาแบบดั้งเดิม ที่ประกอบด้วยการหลอมเหลว ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะผลิตโลหะผสมระบบ โลหะเปราะ-โลหะเปราะ ด้วยวิธีโลหะผสมเชิงกล โลหะผสมที่ได้ลักษณะเป็นเม็ดๆ ที่มีอนุภาคที่แข็งแรงกว่าฝังในเนื้อที่อ่อนกว่า ในกรณีที่มีความแข็งเหมือนกัน แต่ละตัวก็สามารถไปฝังในอีกตัวหนึ่งได้ ดังนั้นระบบนี้จึงมีวิธีที่แตกต่างจาก ductile phase ความร้อนมีผลทำให้การเกิดโลหะผสมดีขึ้นแต่ความเย็นไม่ได้ช่วยในระบบนี้ในกระบวนการอาจมีการเชื่อมเย็บหรือกระบวนการแพร่เกิดขึ้นเนื่องจากเป็นผลรวมของอุณหภูมิเฉพาะที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างฝังและ hydrostatic stresses ในอนุภาคผงแต่อนุภาคของโลหะผสมที่ได้อาจจะไม่เสถียร เนื่องจากเกิดการแตกขึ้นอย่างต่อเนื่อง อนุภาคมีแนวโน้มที่จะจับเป็นก้อน เมื่อเริ่มเกิดเชื่อมเย็บหรือการก่อรูปของการถ่ายโอนวัสดุ อย่างไรก็ตามจะมีการศึกษาระบบให้ละเอียดมากยิ่งขึ้น

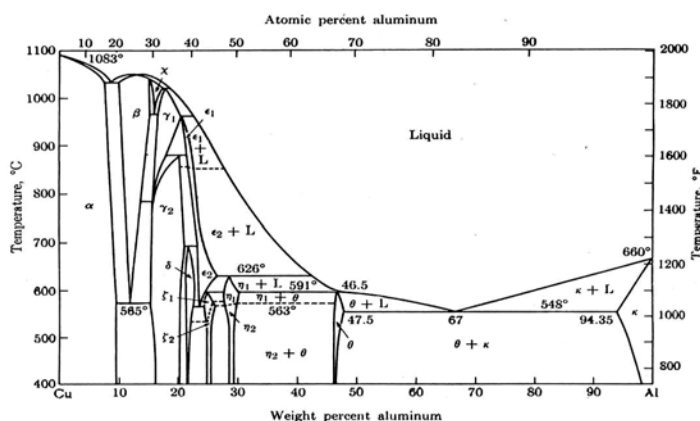
1.2.2.6 การเตรียมโลหะผสม Cu-Al ด้วยวิธีโลหะผสมเชิงกล

การผลิตโลหะผสม Cu-Al ด้วยวิธีโลหะผสมเชิงกล เมื่ออัตราส่วนผสมเป็น 14 at % Al จะได้โครงสร้างเป็นสารละลายของแข็งเมื่อส่วนผสมเป็น 35 at % Al จะได้สารประกอบระหว่างโลหะ $\gamma\text{-Cu}_3\text{Al}_4$ (Ying and Zhang, 2000) นอกจากนี้

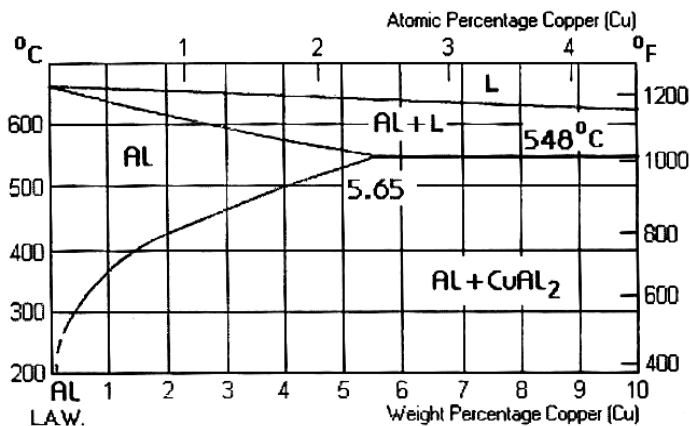
ยังพบว่าเฟส θ -CuAl₂ จะเกิดขึ้นก่อนเป็นเฟสแรกของโลหะผสมทั้งสอง Lima และคณะ (1999) เสนอว่า (γ -Cu₉Al₄ จะเกิดขึ้นได้ชนิดเดียวกันเมื่อผสม 33 at% Al-Cu เป็นเวลานาน Peng และคณะ (1999) Jiang และคณะ (1993) และ Liu และคณะ (1998) พบเช่นเดียวกันว่าการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Cu และ Al ด้วยวิธีรีดเย็นจะเกิดเฟส θ -CuAl₂ เป็นเฟสแรกเช่นเดียวกัน โดยอุณหภูมิที่สามารถกระตุ้นปฏิกิริยาได้ต่ำกว่า 300 °C Ying and Zhang (2000) ยังพบว่าเมื่อส่วนผสมเป็น 35 at% Al γ -Cu₉Al₄ จะเกิดเมื่อกระตุ้นอุณหภูมิที่สูงกว่าเฟส θ -CuAl₂ เมื่อผสมตะกั่วเข้าไปในระบบด้วยเช่นที่ส่วนผสม Al 10 wt% Pb 4.5 wt% Cu Zhu และคณะ (2002) พบว่าหลังจากการอบ 40 ชั่วโมงเกิดเฟสสารละลายของแข็ง 1.13 wt% Cu เฟส θ -CuAl₂ และ γ -Cu₉Al₄

1.2.3 โลหะผสมอะลูมิเนียม - ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะที่มีระบบผลึกเป็น FCC เหมือนกับอะลูมิเนียม จึงมีผลให้สามารถละลายได้ดีในอะลูมิเนียม และมีผลให้สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเปลี่ยนแปลงไป ทองแดงเมื่อละลายในอะลูมิเนียมจะให้สารละลายของแข็งวัฏภาค (phase) κ โดยมีปริมาณทองแดงละลายได้สูงสุด 5.65 % ที่อุณหภูมิ 548 °C และปริมาณทองแดงจะละลายในวัฏภาค κ ได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 548 °C จะเหลือเพียงประมาณ 0.5 % ที่อุณหภูมิ 200 °C ที่ปริมาณ 54 % ทองแดงหรือ 46 % อะลูมิเนียม ปรากฏว่าอะลูมิเนียมจะรวมกับทองแดงให้สารประกอบเชิงโลหะ (intermetallic compound) ซึ่งจะมีสูตร CuAl₂ หรือเรียกว่าวัฏภาค θ มีระบบผลึกเป็นเตตระโกนอลเชิงซ้อน (complex tetragonal) มีความแข็งปานกลาง แต่เปราะแตกง่าย (brittle) (รูปที่ 1.13-1.14)

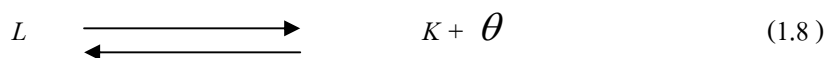


รูปที่ 1.13 แผนภาพสมดุลของโลหะผสม Al-Cu (วีระพันธ์, 2531)



รูปที่ 1.14 แผนภาพเฟสของโลหะผสม Al - Cu (วีระพันธ์, 2533)

จากแผนภาพสมดุลจะปรากฏจุดยูเทคติกที่อุณหภูมิ 548°C ส่วนผสม 33% ทองแดง เมื่อเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิ 548°C จะแตกตัวให้วัฏภาค K (Cu 5.65 %) กับวัฏภาค θ หรือ CuAl_2 (Cu 52.75 %) (สมการ 2.1)



เมื่อ

L = โลหะหลอมเหลว

K = เฟสอะลูมิเนียม

θ = เฟส CuAl_2

โครงสร้างของยูเทคติกจะประกอบด้วยแถบบางๆระหว่างวัฏภาค K และ θ สลับกัน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์สูงแต่เปราะลักษณะคล้ายเพอร์ไลต์ (pearlite) ในเหล็กกล้าคาร์บอน โครงสร้างไฮโปยูเทคติก ในที่นี้จะแยกเป็นสองลักษณะคือไฮโปยูเทคติกที่เกิน 5 % ทองแดงและที่ต่ำกว่า 5 โครงสร้างไฮโปยูเทคติกที่เกินกว่า 5% ทองแดงในสภาพการเย็นตัวที่เป็นอัตราการเย็นตัวสมดุล โครงสร้างจะประกอบด้วยวัฏภาค K เป็นโครงสร้างพื้นฐานโดยมีลักษณะโครงสร้างยูเทคติก ($K + \theta$) กระจายอยู่ตามบริเวณขอบเกรน ซึ่งมีผลทำให้ความเหนียวลดลง สำหรับโครงสร้างไฮโปยูเทคติกที่ส่วนผสมน้อยกว่า 5% ลักษณะโครงสร้างจะประกอบด้วยวัฏภาค K อันเป็นโครงสร้างพื้นฐาน อาจปรากฏการตกผลึกของวัฏภาค θ อยู่บ้างตามบริเวณขอบเกรน ซึ่งเป็นผลมาจากการแยกตัวของอะตอมทองแดงมาจับตัวเป็นวัฏภาค θ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 548°C ลักษณะที่สำคัญของวัฏภาค K กับวัฏภาค θ มีผลต่อสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมทองแดงเป็นอย่างมาก ตามที่ทราบวัฏภาค K เป็นวัฏภาคที่มีความเหนียวสูง โดยที่วัฏภาค θ มีความแข็งแรงสูงแต่เปราะ ในกรณีเช่นนี้ถ้าวัฏภาค θ แม้จะมีอยู่

เพียงเล็กน้อย แต่ถ้าอยู่ในสภาพที่ต่อเนื่องจะมีผลให้โลหะผสมเปราะ ถ้าจะเปรียบก็เหมือนเอาเม็ดทรายผสมในซีเมนต์ ถ้าทรายใดที่ซีเมนต์ยังสามารถหุ้มเม็ดทรายได้หมด ก็จะยังคงรักษาความเป็นซีเมนต์ไว้ได้ แต่ถ้าซีเมนต์ไม่สามารถหุ้มเม็ดทรายอยู่ได้ก็จะขาดความเหนียวอย่างเห็นได้ชัด จากหลักความจริงนี้ อัตราการเย็นตัวของโลหะผสมจากสภาพหลอมเหลว จึงมีผลต่อลักษณะโครงสร้าง และสมบัติเชิงกลในที่สุด การทำให้วัฏภาค θ เกิดขึ้นในลักษณะฝังแทรกอยู่ในวัฏภาค K โดยไม่ต่อเนื่องกันจะทำให้สมบัติความเหนียวของโลหะผสมเพิ่มขึ้น

ในกรณีที่โลหะอะลูมิเนียม - ทองแดง มีประมาณทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 5 % ใกล้เคียง 33 % เข้าไปเท่าไร โครงสร้างของโลหะผสมก็จะยังมีวัฏภาค θ เกิดขึ้นในปริมาณสูง ยิ่งเป็นโลหะผสมประเภทไฮโปยูเทคติก (ทองแดง มากกว่า 33 %) ด้วยแล้วจะมีวัฏภาค θ ปริมาณมากกว่าวัฏภาค K โลหะผสมจะมีความเหนียวและความแข็งแรงน้อยมาก จนไม่มีคุณสมบัติประโยชน์ในการใช้งานด้านวิศวกรรม เมื่อพุดถึงลักษณะโครงสร้างไฮโปยูเทคติกที่ปรากฏวัฏภาค θ อยู่ในสภาพต่อเนื่องตามบริเวณขอบเกรน ซึ่งเป็นโครงสร้างของโลหะผสมที่ผ่านงานหล่อด้วยแบบทราย (sand casting) สามารถปรับปรุงคุณภาพความเหนียวได้ดีได้ด้วยการอบชุบความร้อน โดยการนำไปเผาที่อุณหภูมิ 544°C ใช้เวลาทิ้งไว้ประมาณ 48 ชั่วโมงให้วัฏภาค θ สลายตัว ก้อนอะตอมของทองแดงให้กลับไปเป็นสารละลายของแข็ง K หรือไม่ก็อาจปรับตัวให้เป็นเม็ดกลมกระจัดกระจายอยู่ทั่วไปขาดความต่อเนื่อง จากนั้นนำไปทำให้เย็นโดยรวดเร็ว โดยการชุบน้ำไม่เปิดโอกาสให้เกิดวัฏภาค θ ด้ทัน จะได้วัฏภาค K เป็นโครงสร้างพื้นฐานที่หุ้มวัฏภาค θ ไว้ได้เป็นส่วนใหญ่ โลหะผสมที่ผ่านการอบชุบความร้อนดังกล่าวนี้ จะมีทั้งความแข็งแรงและความเหนียวอยู่ในเกณฑ์

1.3 วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและสร้างเครื่องบดแอทไตรเตอร์
2. ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบ เวลา และจำนวนแกนของเพลลาขับที่มีผลต่อวัสดุผสม โดยกระบวนการผลิตผงโลหะผสมเชิงกลแบบเครื่องบดแอทไตรเตอร์

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างเครื่องบดแอทไตรเตอร์ ขนาดห้องปฏิบัติการ
2. ทดสอบสมรรถนะของเครื่องบดแอทไตรเตอร์ ที่สร้างขึ้นโดยการเตรียมผงโลหะผสมระหว่าง Al 33%wt Cu

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างเครื่องผลิตผงโลหะผสมเชิงกลชนิดแอทไตรเตอร์ ขนาดห้องปฏิบัติการ
2. ใช้เป็นเครื่องมือในการวิจัยการผลิตโลหะผสมหรือวัสดุผสมด้วยวิธีเชิงกล
3. เป็นพื้นฐานความรู้ที่จะพัฒนาเครื่องผลิตผงโลหะผสมเชิงกลต่อไป
4. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสู่ภาคการผลิตในระดับอุตสาหกรรมในอนาคต