บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้มีการเตรียมวัสดุผสมเพื่อนำไปขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ โดยได้เตรียมจากวิธีการโลหะผสมเชิงกล 2 วิธี โดยได้ทำการเตรียมวัสดุผสมระหว่างผงโลหะทองแดง 90% ผงโลหะดีบุก 10% โดยน้ำหนักและผงทัลคัม และ วัสดุผสมระหว่างผงโลหะบรอนซ์ดีบุก 10% กับผงทัลคัม

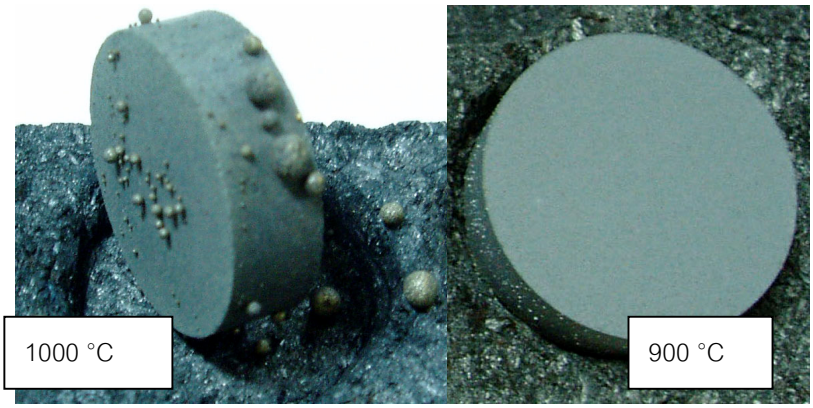
โดยมีการกำหนดตัวแปรสำหรับงานวิจัยนี้ 2 ตัวแปรคือ ปริมาณผงทัลคัมกับเวลาที่ใช้ในการบดผสม

- ปริมาณการเติมผงทัลคัม มี 5 ค่า ในการทดลองนี้คือ 0%, 2%, 5%, 10% และ 15%
- เวลาที่ใช้ในการบด มี 8 เวลา ได้แก่ 30, 60, 90,120,150, 360, 1440 และ 2880 นาทีตามลำดับ

รวม 80 ภาวะการเตรียมชิ้นงานทดสอบ โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างทดสอบ 2 ชิ้นต่อ 1 ภาวะ

4.1 ผลการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบที่เตรียมจากวัสดุผสมทั้ง 2 วิธี จะมีรูปร่างลักษณะเป็นทรงกระบอกเพื่อจะนำไปทดสอบหาค่าอัตราการการสึกหรอและหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานตามลักษณะวิธีการวิจัยของ Hirotaka Kato (รูปที่2.2) จะต้องผ่านขั้นตอนเดียวกันคือ หลังจากผ่านกระบวนการเตรียมโดยวิธีโลหะผสมเชิงกลแล้วนั้น จะนำไปอัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่อง Thermo Press Machine และจะต้องผ่านกระบวนการทดสอบความแข็งก่อนจะนำไปทำการเผาอบผนึก ในการอบผนึกได้ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิต่างๆ พบว่าถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป (800-870°C) ชิ้นงานที่ได้จะเปราะเนื่องจากไม่เกิดการยึดเกาะกันภายในเนื้อชิ้นงานแต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไป (950-1150°C) จะส่งผลให้เกิดการบีบอัดของอนุภาคภายในที่เกิดการหลอมเหลวออกมาภายนอกผิวชิ้นงานและจะมีลักษณะเป็นก้อนทรงกลม ตามรูปที่ 4.1 ดังนั้นอุณหภูมิการอบผนึกที่เหมาะสมคือ 900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีอัตราการให้ความร้อน 10°C/นาทีคงที่ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เมื่อได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์แล้วจึงนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 4.1 ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการเผาอบผนึก 1000 °C และ 900 °C

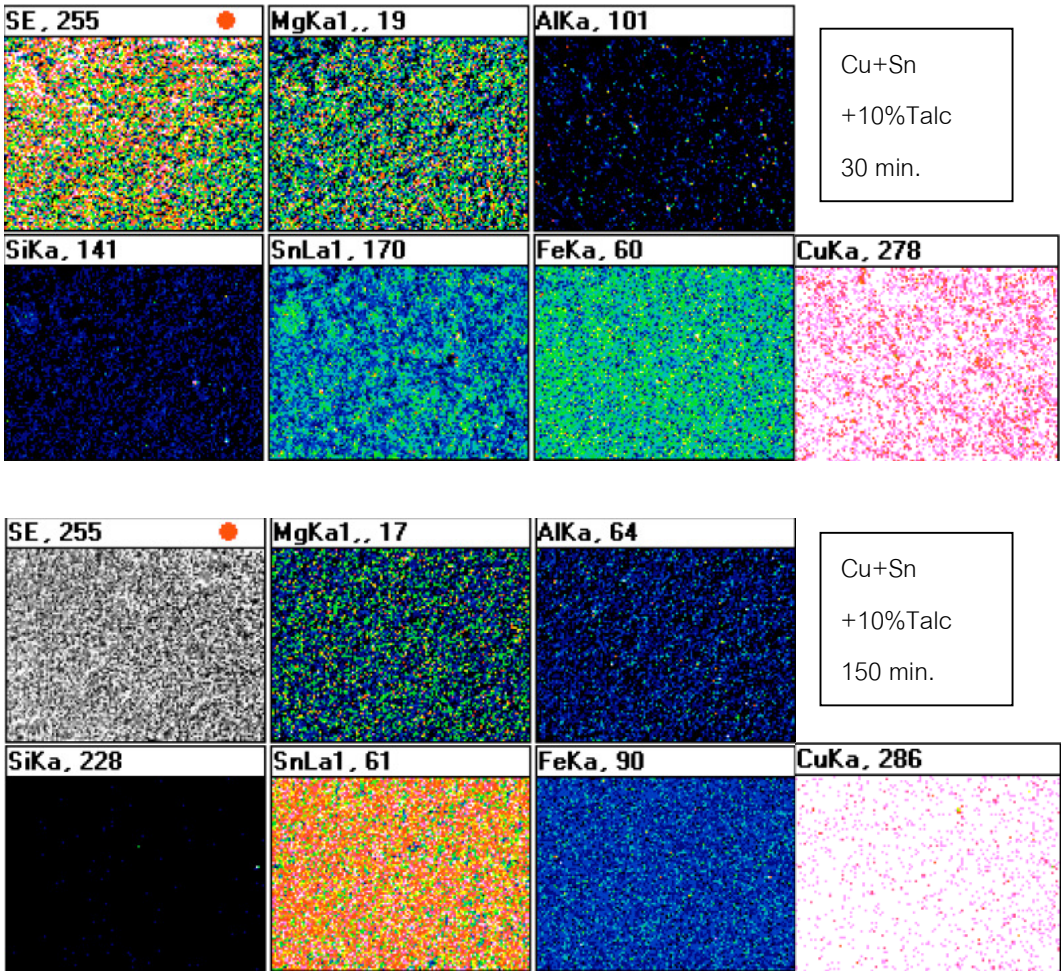
4.2 ผลการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

4.2.1 สมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

1) ความแข็ง (Hardness Test)

การวัดค่าความแข็งของชิ้นงานจะวัดจากชิ้นงานก่อนและหลังการอบผนึก ซึ่งอิทธิพลของปริมาณผงทัลคัมและเวลาที่ใช้ในการบดต่อสมบัติความแข็งของชิ้นงาน สามารถอธิบายได้ดังนี้ ค่าความแข็งจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบดแต่จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณทัลคัม เนื่องมาจากอนุภาคที่ผ่านการบดผสมเป็นเวลานานจะส่งผลให้เกิดการกระจายตัวและฝังประของผงทัลคัมในเนื้อโลหะได้ดีกว่า (รูปที่4.2) โดยปกติผงทัลคัมจะมีความแข็งต่ำมาก (มีความแข็ง =1 ตาม Moh's scale) เมื่อกระจายตัวไม่ดีทำให้ค่าที่วัดด้วยเครื่อง Vicker Microhardness Tester ตรงบริเวณที่มีทัลคัมกระจุกตัวอยู่ก็มีค่าต่ำ ในขณะเดียวกันที่เวลาการบดผสมน้อย ผงโลหะก็ยังผสมกันไม่ดี ส่วนที่เป็นเนื้อโลหะดีบุกหรือทองแดงล้วนๆก็จะมีความแข็งต่ำเช่นเดียวกันทำให้ค่าความแข็งเฉลี่ยที่เวลาน้อยๆมีค่าต่ำกว่าที่เวลานาน สำหรับปริมาณของผงทัลคัมที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความแข็งของชิ้นงานลดต่ำลง เนื่องจากมีเนื้อผงทัลคัมซึ่งความแข็งต่ำกระจายตัวทั่วๆไปในเนื้อของบรอนซ์มากขึ้น แนวโน้มค่าความแข็งของชิ้นงานที่เตรียมจากผงโลหะบรอนซ์ดีบุกและทัลคัมจะสูงกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากผงโลหะทองแดงดีบุกและทัลคัมโดยตรงของทุกภาวะการทดลอง โดยสังเกตผลจากตารางที่ 4.1-4.2 และรูปที่ 4.3-4.4 เพราะเนื่องจากเนื้อของโลหะบรอนซ์โดยปกติมีความแข็งประมาณ HRB55 (100HV) ซึ่งแข็งกว่าทองแดง (HRB40-45) ดีบุก (HRB5) (คู่มือการเลือกใช้วัสดุ, 2521) และทัลคัม (Brinell Number<5) (Callister, 1993) เพราะในเนื้อของบรอนซ์มีโครงสร้าง Cu_3Sn ซึ่งมีความแข็งสูง (รูปที่ 4.8และ 4.10)

และการเตรียมโลหะผสมโดยตรงจากผงทองแดง ดีบุกและทัลคัมโดยบดผสมในช่วงเวลาสั้นๆ(<150 นาที) ยังไม่ทำให้เกิดเป็นโลหะบรอนซ์ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองบดผสมในช่วงเวลาที่นานขึ้นถึง 2880 นาที และได้ทำการทดลองเฉพาะที่ผสมทัลคัม 2% และไม่ผสมทัลคัมของตัวอย่างที่เตรียมจากการผสมผงทองแดง ผงดีบุกและทัลคัม กับ ผงโลหะบรอนซ์ดีบุกและทัลคัม ที่เลือกทดลองที่ 2% เพราะเมื่อผสมทัลคัมมากขึ้นก็จะทำให้อัตราการสึกหรอของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น (ตารางที่ 4.5)



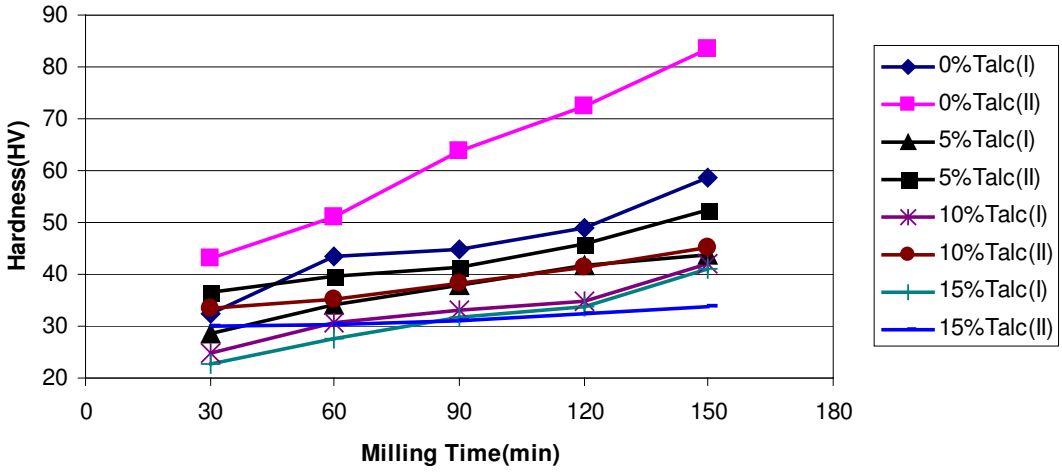
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายการกระจายตัวของผงโลหะหลังการบดเป็นเวลา 30 นาทีและ 150 นาที โดยใช้วิธี X-Ray Mapping

ตารางที่ 4.1 ผลทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ได้จากการบดผสมที่เวลาต่างๆก่อนการอบผนึก

Hardness (HV)									
Milling Time (min) / % Talc	30	60	90	120	150	360	1440	2880	Remark
0% (I)	33.8	43.4	44.8	49.1	58.7	47.9	49.3	50.6	
(II)	43.6	51.0	63.8	72.5	83.4	90.5	97.3	99.0	(I) คือ
2% (I)	32.3	-	-	-	-	43.4	45.9	48.3	Cu+Sn
(II)	39.1	-	-	-	-	84.6	92.5	97.8	+Talc
5% (I)	28.6	34.2	38.0	41.6	43.9	-	-	-	
(II)	36.7	39.8	41.5	45.8	52.3	-	-	-	(II) คือ
10% (I)	24.9	30.7	33.2	34.8	42.2	-	-	-	Tin
(II)	33.3	35.1	38.2	41.3	45.1	-	-	-	bronze
15% (I)	22.9	27.5	31.7	33.8	40.9	-	-	-	+Talc
(II)	30.0	30.5	31.2	32.3	33.7	-	-	-	

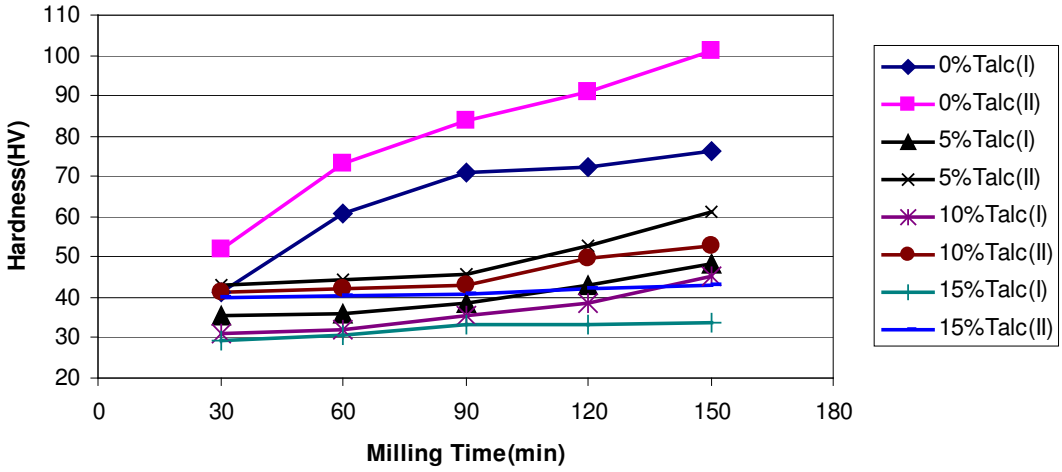
ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ได้จากการบดผสมที่เวลาต่างๆหลังการเผาอบผนึกที่อุณหภูมิ 900°Cเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Hardness Test(HV)									
Milling Time (min) / % Talc	30	60	90	120	150	360	1440	2880	Remark
0% (I)	43.2	61.0	70.8	72.4	76.1	77.8	90.4	92.0	
(II)	52.7	73.4	83.7	91.0	101.3	111.2	123.6	144.0	(I) คือ
2% (I)	42.0	-	-	-	-	72.0	88.4	91.8	Cu+Sn
(II)	48.6	-	-	-	-	102.6	117.6	140.4	+Talc
5% (I)	35.5	36.1	38.7	43.0	48.4	-	-	-	
(II)	43.0	44.6	45.9	52.8	61.3	-	-	-	(II) คือ
10% (I)	31.2	32.0	35.7	38.4	45.1	-	-	-	Tin
(II)	41.2	42.0	43.1	49.8	53.0	-	-	-	bronze
15% (I)	29.2	30.5	33.4	33.4	33.6	-	-	-	+Talc
(II)	40.0	40.4	41.0	42.1	43.0	-	-	-	



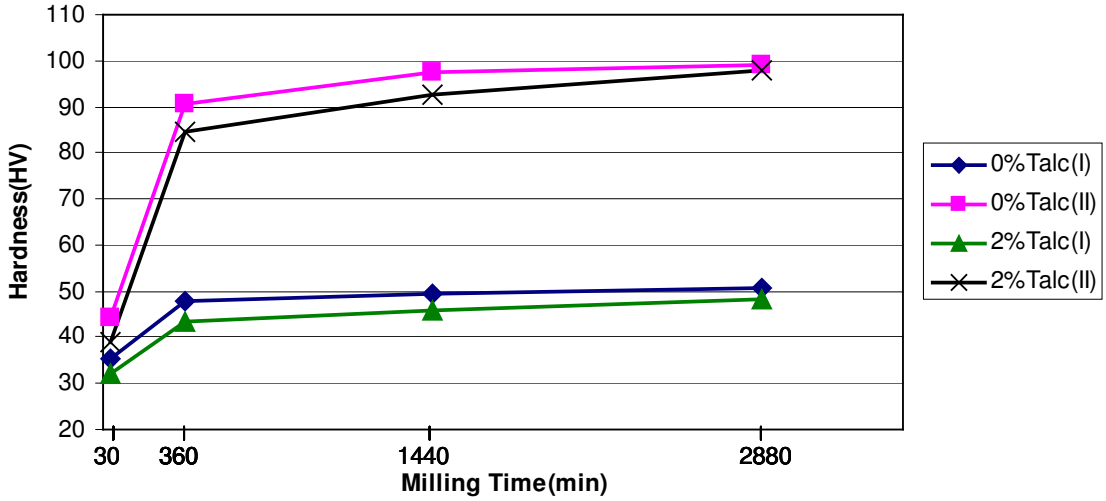
รูปที่ 4.3 ความแข็งของชิ้นงานก่อนการเผาอบผนึกที่เวลาต่างๆ โดยที่สัญลักษณ์
(I) คือ ผงโลหะทองแดง ผงดีบุกและผงทัลคัม (II) คือ ผงโลหะบรอนซ์ดีบุกและผงทัลคัม

พบว่าเมื่อบดเป็นเวลานานขึ้นถึง 2880 นาทีค่าความแข็งของชิ้นงานของทุกกรณีจะมีค่าสูงขึ้นทั้งนี้เพราะเวลาบดที่นานขึ้นก็จะทำให้การกระจายตัวของทัลคัมสม่ำเสมอดีขึ้นกว่าเดิม (ตารางที่ 4.1-4.2 และรูปที่ 4.5-4.6) และหลังการอบผนึกชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าของชิ้นงานที่เตรียมจากการบดผงโลหะทองแดง ดีบุกและทัลคัม มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดทั้งนี้เนื่องจากเกิดโครงสร้าง Cu_6Sn_5 และมีความเป็นบรอนซ์มากขึ้น (รูปที่ 4.7-4.8) อย่างไรก็ตามเมื่อเติมทัลคัมเข้าไป 2% จะทำให้ค่าความแข็งต่ำกว่ากรณีไม่ใส่ทัลคัมแต่เมื่อเวลาบดนานขึ้นค่าความแข็งของทั้งผสมและไม่ผสมทัลคัมมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากเวลาบดนานขึ้นการกระจายตัวของทัลคัมในเนื้อโลหะดีขึ้นและเป็นเนื้อเดียวกัน (ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.6) และพบว่าความแข็งของชิ้นงานที่เตรียมจากผงโลหะบรอนซ์ผสมกับทัลคัม 2% มีค่าสูงกว่าชิ้นงานจากการเตรียมโดยบดผงโลหะทองแดง ดีบุกผสมกับทัลคัม 2% ซึ่งเนื่องจากเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



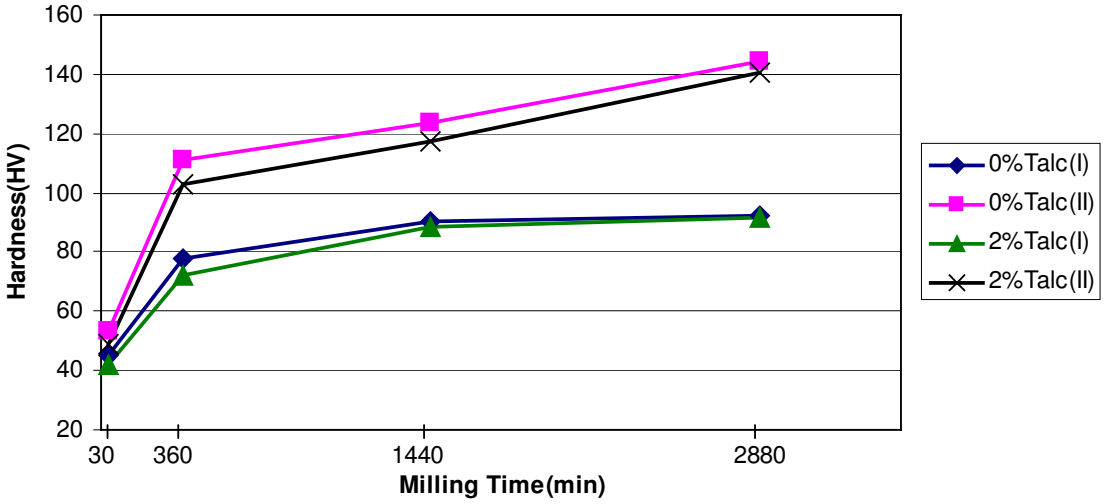
รูปที่ 4.4 ค่าความแข็งของชิ้นงานหลังการอบผนึกที่เวลาต่างๆ โดยที่สัญลักษณ์

(I) คือ ผงโลหะทองแดง ผงดีบุกและผงทัลคัม (II) คือ ผงโลหะบรอนซ์ดีบุกและผงทัลคัม



รูปที่ 4.5 ความแข็งของชิ้นงานเมื่อบดผสมในช่วงเวลาที่นานขึ้นก่อนการเผาอบ ผนึกโดยที่สัญลักษณ์

(I) คือ ผงโลหะทองแดง ผงดีบุกและผงทัลคัม (II) คือ ผงโลหะบรอนซ์ดีบุกและผงทัลคัม



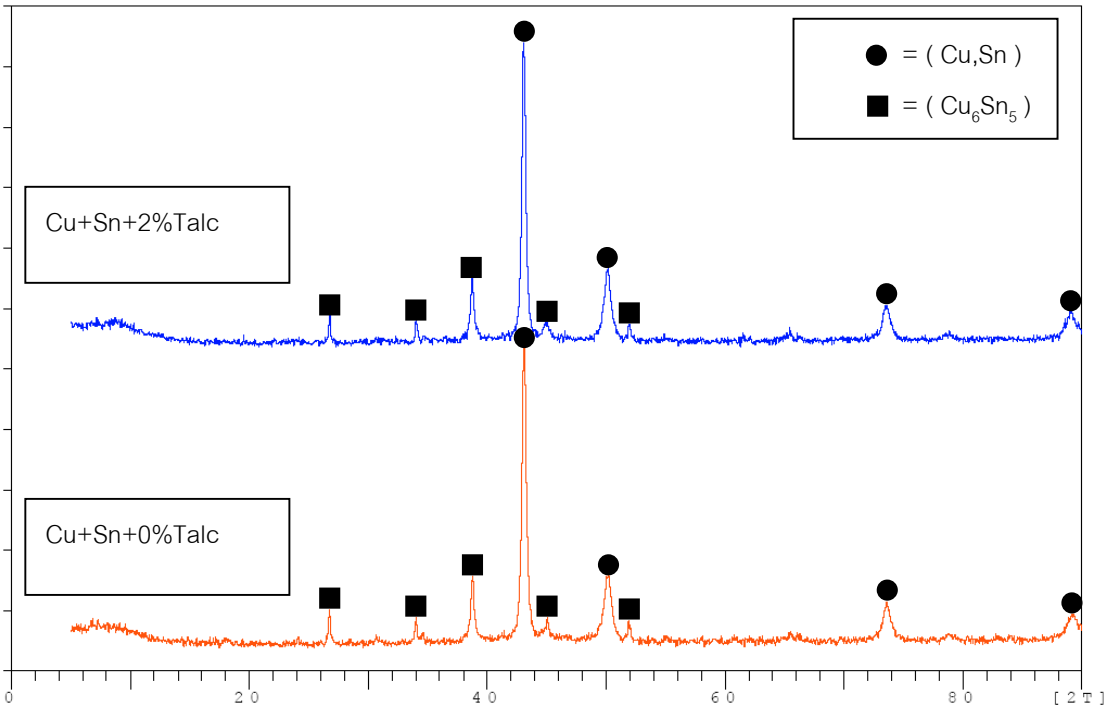
รูปที่ 4.6 ความแข็งของชิ้นงานเมื่อบดผสมในช่วงเวลาที่นานขึ้นหลังการเผาอบผนึกโดยที่สัญลักษณ์ (I) คือ ผงโลหะทองแดง ผงดีบุกและผงทัลคัม (II) คือ ผงโลหะบรอนซ์ดีบุกและผงทัลคัม

2) ความแข็งแรงดึง (Tension Test)

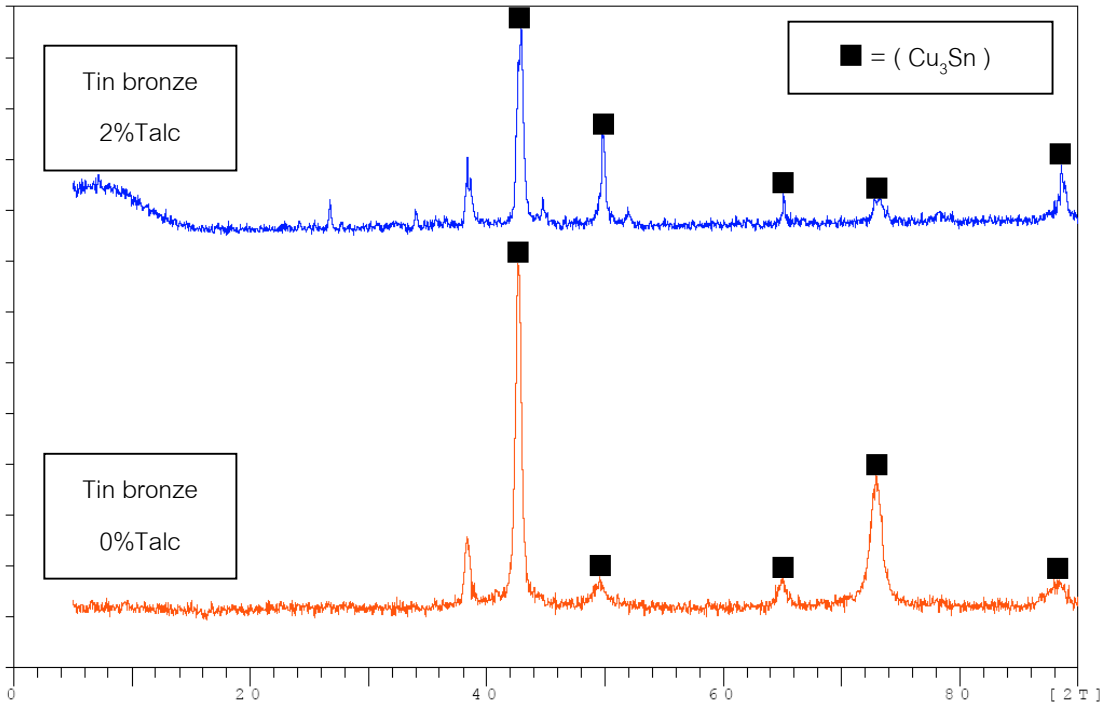
ผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงพบว่าชิ้นงานที่เตรียมจากผงโลหะบรอนซ์ดีบุกผสมทัลคัมสามารถต้านแรงดึงได้สูงกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากผงโลหะทองแดงและดีบุกผสมทัลคัม (ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.9) เนื่องจากเตรียมโลหะผสมโดยตรงจากผงโลหะทองแดงและดีบุกผสมทัลคัมนั้น ผงทัลคัมจะไปขัดขวางการแพร่ของโลหะดีบุกในโลหะทองแดงและการทำปฏิกิริยาโลหะทองแดงเป็นสารประกอบระหว่างโลหะ ตามแผนภาพของเฟสระหว่างทองแดงและดีบุก (รูปที่ 4.10) นอกจากนั้นทัลคัมยังไปขัดขวางการอบผนึกด้วย ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานที่อบผนึกไม่แข็งแรงเท่ากับ ชิ้นงานที่เตรียมจากผงโลหะบรอนซ์ผสมทัลคัม ซึ่งโดยปกติความแข็งแรงดึงของโลหะบรอนซ์จะมีค่ามากกว่าโลหะทองแดงและดีบุกบริสุทธิ์ แนวโน้มของการต้านแรงดึงจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงทัลคัม เนื่องจากว่าผงทัลคัมจะเข้าไปขัดขวางการกระจายในเนื้อชิ้นงานขณะการอบผนึก แต่เมื่อเวลาบดเพิ่มขึ้นการกระจายของทัลคัมจะเข้าไปฝังในเนื้อโลหะดีขึ้นจึงทำให้แข็งแรงขึ้น

ตารางที่ 4.3 สมบัติการต้านแรงดึงของชิ้นงานที่เตรียมจากการบดหลังการอบผนึกที่อุณหภูมิ 900° เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

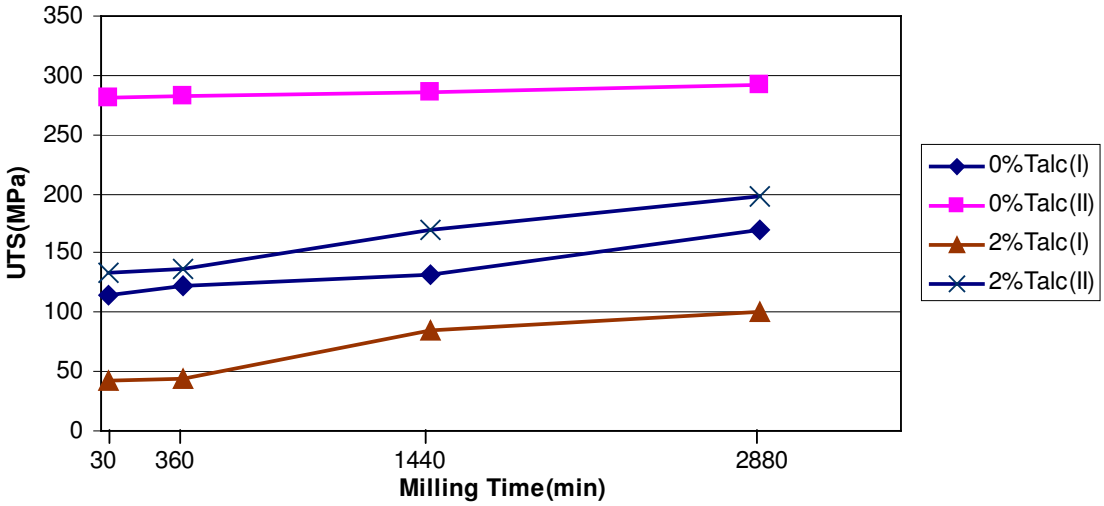
Tensile Strength (MPa)					
Milling Time (min)	30	360	1440	2880	Remark
0% (I)	115	122	132	170	(I) คือ Cu+Sn+Talc
(II)	281	283	285	292	
2% (I)	42	44	85	100	(II) คือ Tin bronze+Talc
(II)	134	136	170	197	



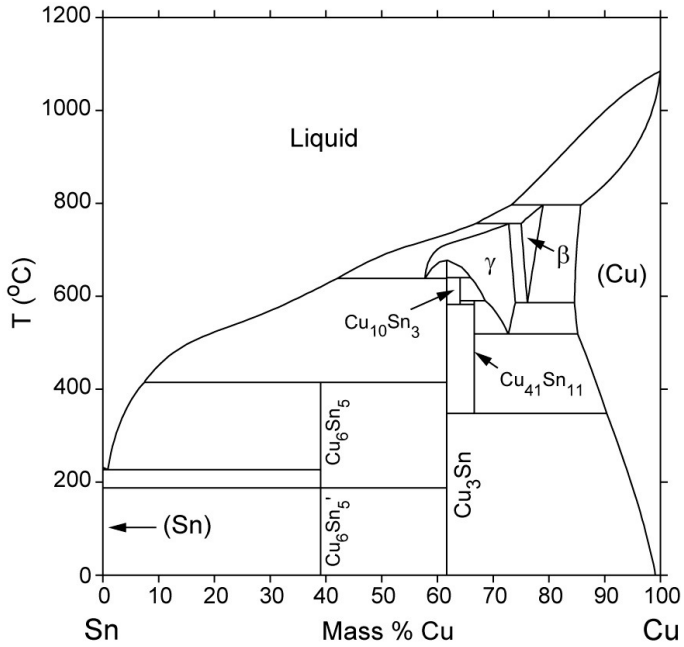
รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการบดที่เวลา 2880 นาทีที่มีส่วนผสมของผงโลหะทองแดง ผงโลหะดีบุกและทัลคัม



รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการบดที่เวลา 2880 นาทีที่มีส่วนผสมของผงโลหะบรอนซ์ดีบุกและทัลคัม



รูปที่ 4.9 ความแข็งแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่เตรียมจากการบดด้วยเวลาต่างๆหลังการอบผนึกที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.10 แผนภาพของเฟสระหว่างทองแดงและดีบุก (www.astm.com)

จะเห็นว่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการบดทั้งในกรณีที่ไม่ผสมหรือผสมทัลคัม (ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.9) ทั้งนี้เพราะการบดที่เวลานานขึ้นทำให้ขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็กลง เมื่อนำมาอัดขึ้นรูปแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงนั้นอนุภาคที่เล็กกว่าก็จะมีพื้นที่ผิวที่มากกว่าที่จะทำให้เกิดการอบผนึกง่ายกว่าและได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นและแข็งแรงมากกว่า

4.2.2 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอของชิ้นงาน

1) สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณทัลคัมและเพิ่มระยะเวลาในการบด (ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.11-4.12) จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.11 พบว่าแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณทัลคัมและเพิ่มระยะเวลาในการบดในช่วงการบดสั้นๆ เนื่องจากว่าผงทัลคัมมีสมบัติเด่นทางด้านความลื่นเมื่อนำมาผสมเข้าไปในชิ้นงานจึงส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงและเมื่อเพิ่มเวลาบดให้นานขึ้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานค่อนข้างคงที่และลดลงเป็นค่าเท่ากับ 0.16 เมื่อเตรียมตัวอย่างโดยการบดเป็นเวลา 1440 นาที (รูปที่ 4.12) แต่การเพิ่มปริมาณทัลคัม 2% จะไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเมื่อบดผสมตัวอย่างในเวลานานขึ้น ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอจะเท่ากัน (รูปที่ 4.14) แต่การเติม

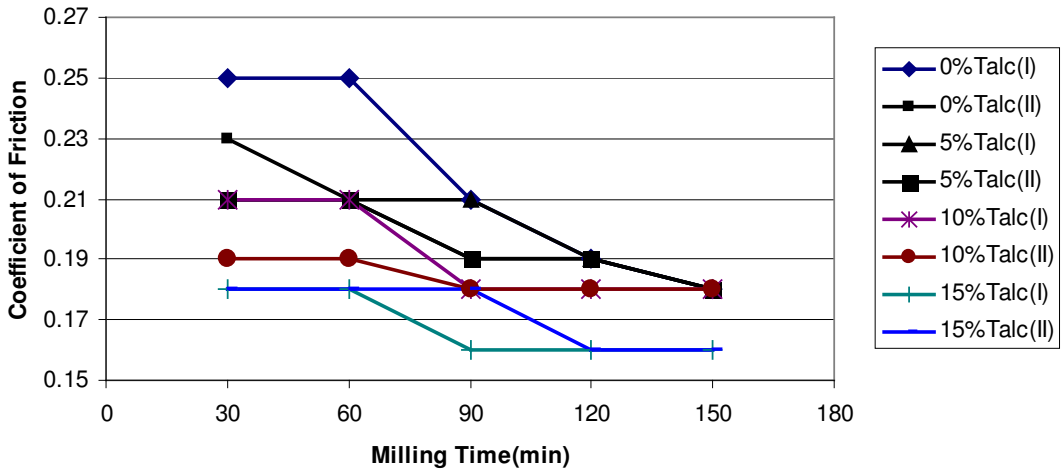
ทัลคัมจะมีข้อดีกว่าคือผิวของชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบการสึกหรอจะมีความเรียบกว่า (รูปที่ 4.19-4.20) และชิ้นงานที่ไม่ผสมทัลคัมจะมีความร้อนสูงมากกว่าโดยสังเกตจากตอนนำชิ้นงานออกจากหัวจับ แต่ถ้าใช้เวลาบดมากกว่านี้ขนาดอนุภาคอาจโตขึ้นเนื่องจากการเกิดการจับตัวเป็นก้อน (Agglomeration) อาจทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้นได้

2) อัตราการสึกหรอ

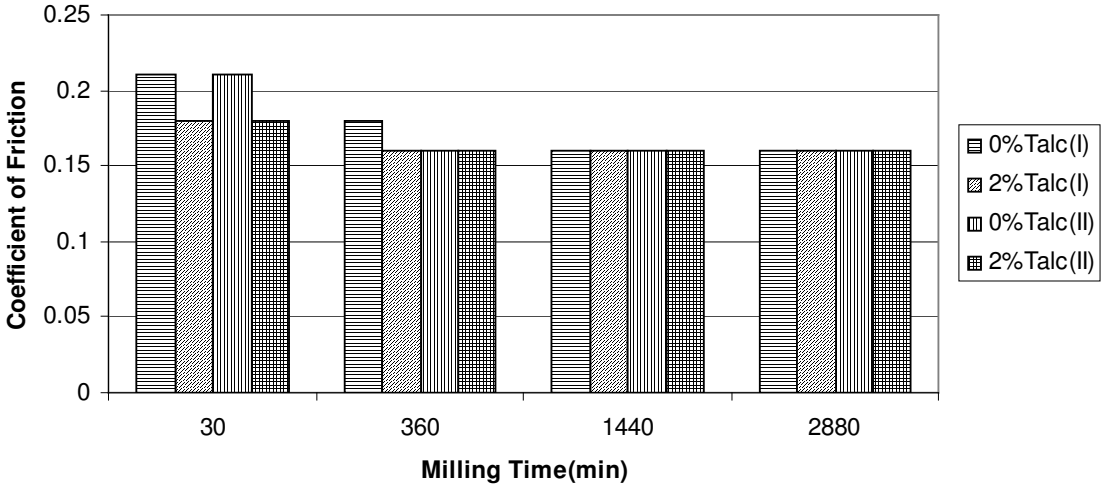
จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณผงทัลคัมและเวลาที่ใช้ในการบดต่อค่าอัตราการสึกหรอของชิ้นงาน พบว่าแนวโน้มของอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณผงทัลคัม เนื่องจากว่าผงทัลคัมจะเข้าไปขัดขวางการกระจายตัวในเนื้อชิ้นงานระหว่างการอบผนึกและส่งผลให้ชิ้นงานไม่แข็งแรง ไม่สามารถทนต่อแรงกดอัดขณะทำการทดสอบการขัดได้และการกระจายของผงทัลคัมในเนื้อโลหะยังไม่ดีพอ จึงทำให้ผงทัลคัมหลุดออกจากเนื้อโลหะได้ง่าย ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูป 4.13-4.14 แต่เมื่อบดเป็นเวลานานมากขึ้น ทำให้ผงทัลคัมกระจายตัวอยู่ในเนื้อโลหะอย่างสม่ำเสมอมากขึ้นจะทำให้อัตราการสึกหรอลดลง นอกจากนั้นยังพบว่าชิ้นงานที่เตรียมจากผงโลหะบรอนซ์ดีบุกและทัลคัม มีอัตราการสึกหรอน้อยกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากผงโลหะทองแดง ดีบุกและทัลคัม ตามตารางที่ 4.5 เพราะเนื่องจากเนื้อของโลหะบรอนซ์โดยปกติมีความแข็งประมาณ HRB55 (100HV) ซึ่งแข็งกว่าทองแดง (HRB40-45) ดีบุก (HRB5) (คู่มือการเลือกใช้วัสดุ, 2521) และทัลคัม (Brinell Number<5) (Callister, 1993) และการเตรียมโลหะผสมโดยตรงจากผงทองแดง ดีบุกและทัลคัมโดยบดผสมในช่วงเวลาสั้นๆ (<150นาที) ยังไม่ทำให้เกิดเป็นโลหะบรอนซ์ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองบดผสมในช่วงเวลาที่นานขึ้นถึง 2880 นาที และได้ทำการทดลองเฉพาะที่ผสมทัลคัม 2% และไม่ผสมทัลคัมของตัวอย่างที่เตรียมจากการผสมผงทองแดง ผงดีบุกและทัลคัม กับ ผงโลหะบรอนซ์ดีบุกและทัลคัม ที่เลือกทดลองที่ 2% เพราะเมื่อผสมทัลคัมมากขึ้นก็จะทำให้อัตราการสึกหรอของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานที่เตรียมจากการบดเวลาต่างๆและอบผนึกที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Coefficient of Friction									
Milling Time (min) / % Talc	30	60	90	120	150	360	1440	2880	Remark
0% (I)	0.23	0.25	0.21	0.19	0.18	0.18	0.16	0.16	
(II)	0.22	0.21	0.19	0.19	0.18	0.16	0.16	0.16	
2% (I)	0.18	-	-	-	-	0.16	0.16	0.16	(I) คือ Cu+Sn +Talc
(II)	0.18	-	-	-	-	0.16	0.16	0.16	
5% (I)	0.25	0.25	0.21	0.19	0.18	-	-	-	
(II)	0.21	0.21	0.19	0.19	0.18	-	-	-	(II) คือ Tin bronze +Talc
10% (I)	0.21	0.21	0.18	0.18	0.18	-	-	-	
(II)	0.19	0.19	0.18	0.18	0.18	-	-	-	
15% (I)	0.18	0.18	0.16	0.16	0.16	-	-	-	
(II)	0.18	0.18	0.18	0.16	0.16	-	-	-	



รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์ของชิ้นงานที่เตรียมด้วยการบดเป็นเวลาสั้นๆหลังการอบผนึกที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

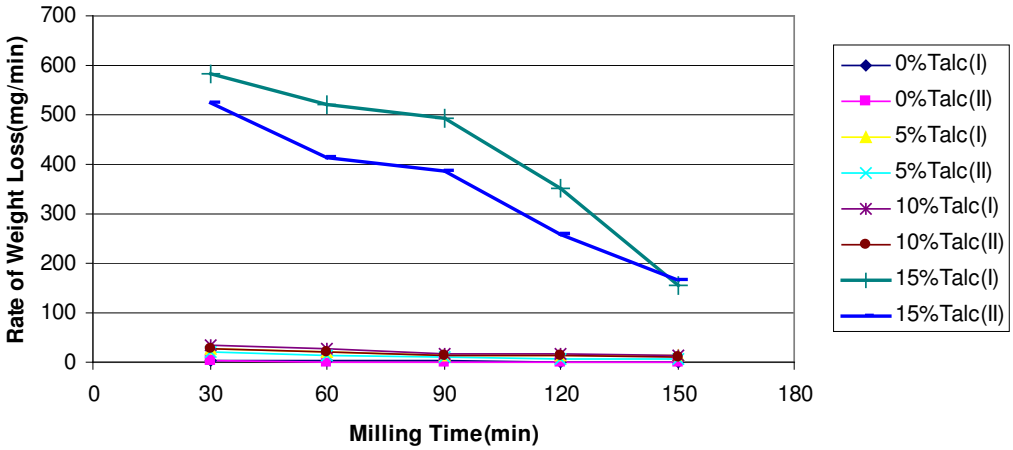


รูปที่ 4.12 สัมประสิทธิ์ของชิ้นงานที่เตรียมด้วยการบดเป็นเวลาที่นานขึ้นหลังการอบผนึกที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

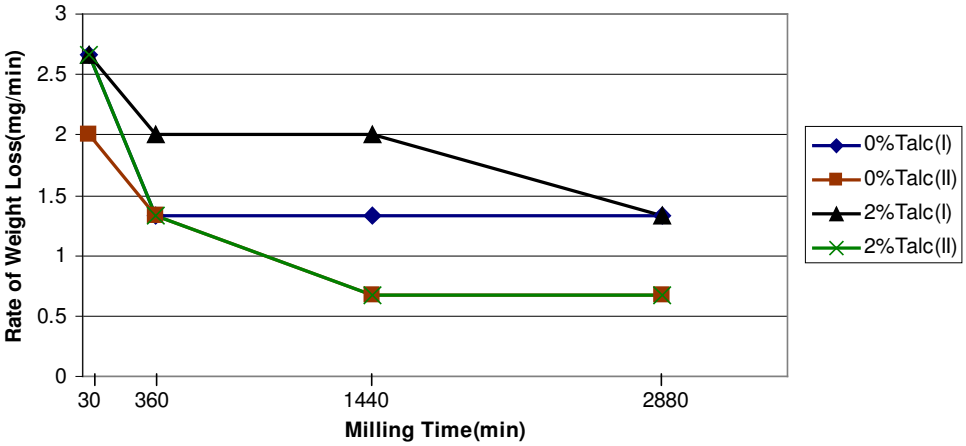
ตารางที่ 4.5 อัตราการสึกหรอของชิ้นงานที่เตรียมจากการบดเวลาต่างๆและอบผนึกที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Wear Rate (mg/min)									
Milling Time (min) / % Talc	30	60	90	120	150	360	1440	2880	Remark
0% (I)	2.7	2.7	2.0	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	
(II)	2.0	1.7	1.5	1.3	1.3	1.3	0.7	0.7	
2% (I)	2.7	-	-	-	-	2.0	2.0	1.3	(I) คือ Cu+Sn +Talc
(II)	2.7	-	-	-	-	1.3	0.7	0.7	
5% (I)	26.7	21.3	15.3	14.7	13.3	-	-	-	(II) คือ Tin bronze +Talc
(II)	20.0	15.3	10.0	8.0	6.7	-	-	-	
10% (I)	33.3	28.0	16.7	16.0	13.3	-	-	-	
(II)	26.7	21.3	14.0	13.3	10.0	-	-	-	
15% (I)	584.0	520.0	492.0	351.3	154.0	-	-	-	
(II)	523.3	413.3	386.7	260.0	166.7	-	-	-	

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.13 - 4.14 พบว่าแนวโน้มของอัตราการสึกหรอจะลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการบดและลดปริมาณผงทัลคัม เนื่องจากว่าผงทัลคัมจะเข้าไปขัดขวางการกระจายตัวในเนื้อชิ้นงานระหว่างการอบผนึกและส่งผลให้ชิ้นงานไม่แข็งแรง ไม่สามารถทนต่อแรงกดอัดขณะทำการทดสอบการขัดได้และการกระจายของผงทัลคัมในเนื้อโลหะยังไม่ดีพอ ชิ้นงานที่เตรียมจากผงโลหะบรอนซ์ดีบุกและทัลคัมมีอัตราการสึกหรอน้อยกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากผงโลหะทองแดง ดีบุกและ ทัลคัม ดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้ว

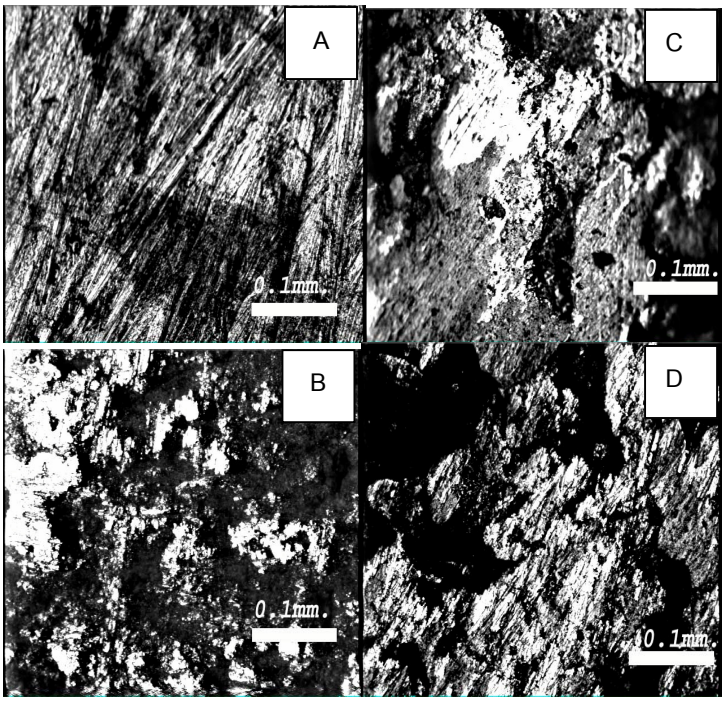


รูปที่ 4.13 อัตราการสึกหรอของชิ้นงานที่เตรียมจากการบดที่เวลาต่างๆหลังการอบผนึกที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.14 อัตราการสึกหรอของชิ้นงานที่เตรียมจากการบดที่เวลานานขึ้นหลังการอบผนึกที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

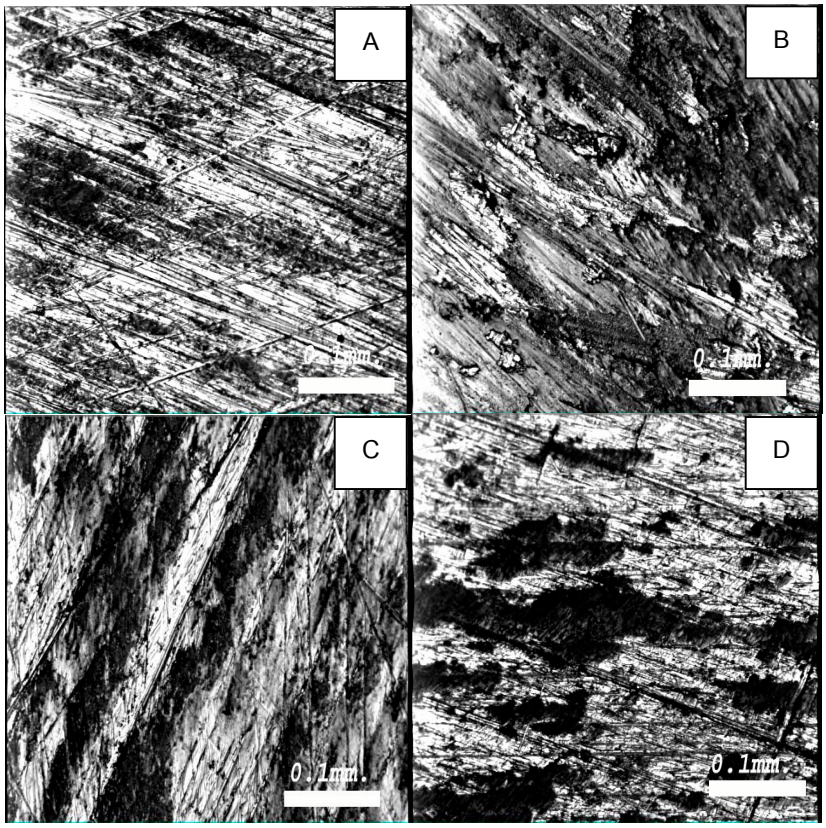
4.3 ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานหลังจากการทดสอบหาอัตราการสึกหรอ



รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะทองแดง ดีบุกและทัลคัมหลังผ่านการทดสอบการสึกหรอที่เวลาบด 150 นาที กำลังขยาย 200 เท่า; A = 0%Talc, B = 5%Talc, C = 10%Talc และ D = 15%Talc

จากรูปที่ 4.15 ลักษณะผิวของชิ้นงานหลังจากการทดสอบหาอัตราการสึกหรอของชิ้นตัวอย่างที่ได้จากการบดผสมโลหะทองแดงและดีบุกผสมกับผงทัลคัมเป็นเวลา 150 นาที พบว่า ลักษณะผิวของชิ้นงานเมื่อผสมทัลคัมเพิ่มขึ้น จะมีหลุม (สีดำ) ขนาดใหญ่ ซึ่งแสดงว่าหลังจากการทดสอบการสึกหรอทัลคัมที่กระจายตัวอยู่ตามจุดต่างๆในเนื้อโลหะบริเวณนั้นหลุดออกไป ลักษณะที่เป็นรอยใหญ่ๆ เนื่องจากผงทัลคัมยังกระจุกตัวและยังกระจายตัวไม่ดีเนื่องจากเวลาบดผสมยังไม่เพียงพอ ดังนั้นเมื่อเวลาบดนานขึ้นร่องรอยที่สังเกตได้จะมีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่เตรียมจากการบดผงโลหะบรอนซ์ดีบุกกับทัลคัมกับชิ้นงานที่เตรียมจากการบดผงโลหะทองแดงและดีบุกผสมกับทัลคัมที่เวลาบด 150 นาทีเท่ากัน พบว่าร่องรอยของการสึกหรอของชิ้นงานในกรณีแรก (รูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.17-4.18 ตามลำดับ) จะมีร่องรอยการสึกหรอน้อยกว่าและเล็กกว่ากรณีที่สอง (รูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.19-4.20 ตามลำดับ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจะมีการสึกหรอน้อยกว่ากรณีที่สอง เนื่องจากเนื้อของโลหะใน

กรณีแรกมีความแข็งและความแข็งแรงกว่าเนื้อของโลหะในกรณีที่สอง (ตารางที่ 4.2-4.3) นอกจากนั้นยังพบว่าผิวชิ้นงานหลังจากการทดสอบการสึกหรอของกรณีไม่ผสมทัลคัมจะเรียบกว่ากรณีที่ผสมทัลคัม (รูปที่ 4.15-4.16) เนื่อง จากเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้ว

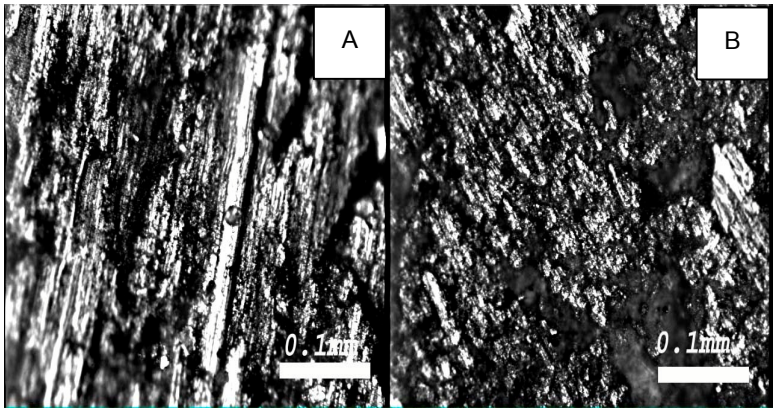


รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานบรอนซ์ดีบุกและทัลคัมที่เวลาบด 150 นาที หลังผ่านการทดสอบการสึกหรอ กำลังขยาย 200 เท่า; A = 0%Talc, B = 5%Talc, C = 10%Talc และ D = 15%Talc

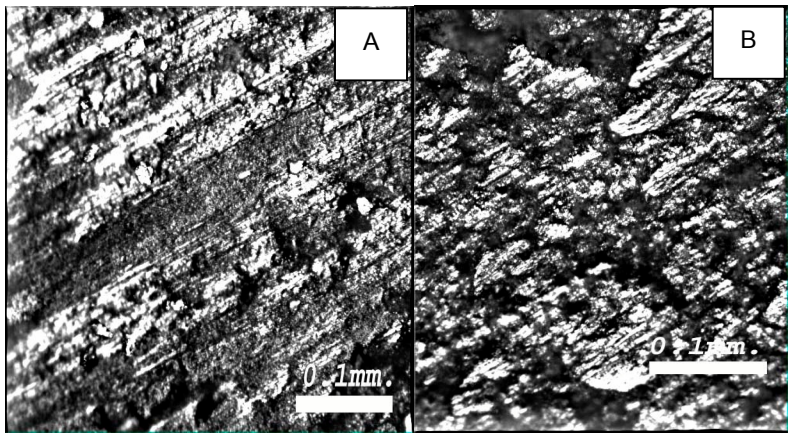
ภาพถ่ายของพื้นผิวชิ้นงานผงโลหะบรอนซ์ดีบุกและทัลคัมที่เวลาการบด 150 นาที หลังผ่านการทดสอบการสึกหรอ แสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าบริเวณพื้นที่สีดำจะพบมากในรูป C และ D เมื่อเทียบกับรูป A และ B พื้นที่สีดำคือบริเวณที่ถูกทำลายหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอบริเวณพื้นที่สีดำ ซึ่งเป็นลักษณะของหลุมที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากเกิดความเสียหายขณะทดสอบมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการบด ดังนั้นเมื่อเตรียมตัวอย่างโดยเพิ่มเวลาในการบดนานขึ้นเป็น 1440 และ 2880 นาทีและลดปริมาณทัลคัมเป็น 2% การสึกหรอจะกระจายสม่ำเสมอขึ้น (รูปที่ 4.17-4.20) และยัง

พบว่าชิ้นงานที่เตรียมจากการบดผสมผงโลหะบรอนซ์ผสมทัลคัม (รูปที่ 4.19-4.20) มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากการบดผสมผงโลหะทองแดงและดีบุกผสมทัลคัม (รูปที่ 4.17-4.18) และเมื่อลดปริมาณทัลคัมลงเหลือ 2% ลักษณะการสึกหรอจะน้อยกว่าและสม่ำเสมอกว่า

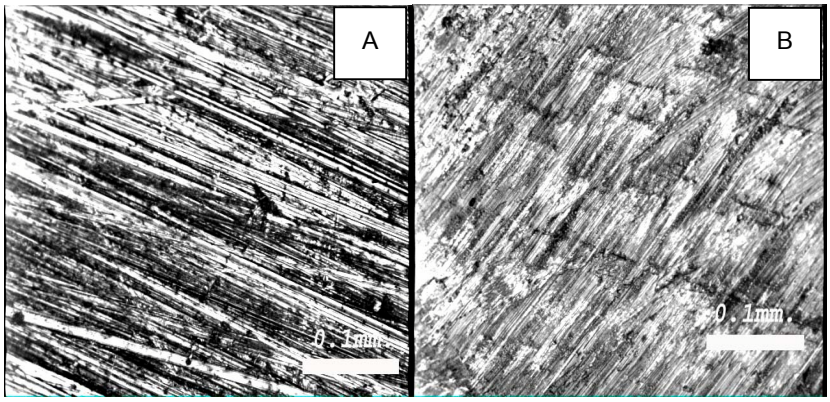
จากรูปที่ 4.21 จะพบว่าลักษณะพื้นผิวของแป้นขัดหลังผ่านการทดสอบการขัดจะมีพื้นที่สีดำลดลงเนื่องมาจาก เกิดการขัดสีระหว่างชิ้นงานกับแป้นขัดในลักษณะของแรงเฉือน และทำให้ผิวมีลักษณะเรียบขึ้นเนื่องจากการสึกหรอ



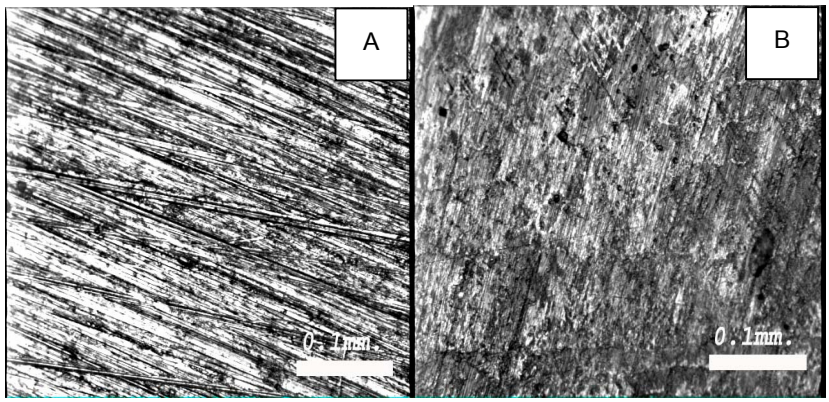
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะทองแดง ดีบุกและทัลคัมที่เวลาบด 1440 นาที หลังผ่านการทดสอบการสึกหรอ กำลังขยาย 200 เท่า; A = 0%Talc และ B = 2%Talc



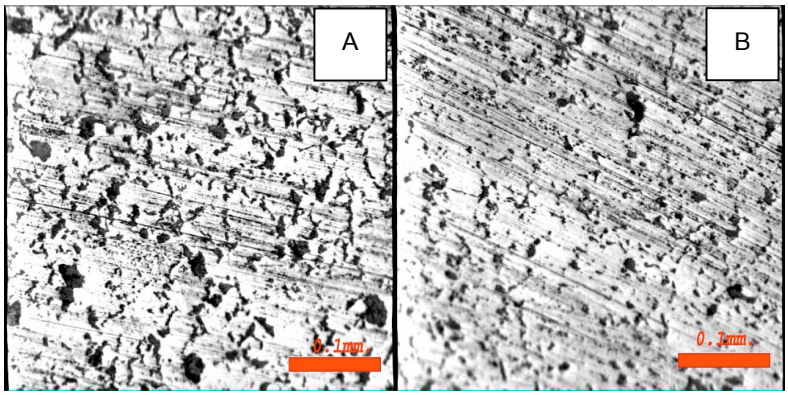
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะทองแดง ดีบุกและทัลคัมที่เวลาบด 2880 นาที หลังผ่านการทดสอบการสึกหรอ กำลังขยาย 200 เท่า; A = 0%Talc และ B = 2%Talc



รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะบรอนซ์ดีบุกและทัลคัมที่เวลาบด 1440 นาที หลังผ่านการทดสอบการสึกหรอ กำลังขยาย 200 เท่า; A = 0%Talc และ B = 2%Talc



รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะบรอนซ์ดีบุกและทัลคัมที่เวลาบด 2880 นาทีหลังผ่านการทดสอบการสึกหรอ กำลังขยาย 200 เท่า; A = 0%Talc และ B = 2%Talc



รูปที่ 4.21 ภาพพื้นผิวหน้าของแป้นขัดโดยที่ A = ก่อนขัด, B = หลังขัด

4.4 ค่าความขรุขระ (Roughness Test)

อิทธิพลของปริมาณการเติมผงทัลคัมและเวลาที่ใช้ในการบดต่อค่าความขรุขระของชิ้นงาน สามารถอธิบายได้ว่า แนวโน้มของค่าความขรุขระจะลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการบด เนื่องจากเมื่อเวลาบดนานขึ้นจะทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคและทัลคัมอย่างสม่ำเสมอและดีขึ้นและความขรุขระจะลดลงเมื่อปริมาณผงทัลคัมลดลง (ตารางที่ 4.6-4.7) เนื่องจากว่าผงทัลคัมจะเข้าไปขัดขวางการอบผนึกและเนื้อของชิ้นงานไม่มีความแข็งแรง

ตารางที่ 4.6 ค่าความขรุขระของโลหะทองแดงและดีบุกที่มีส่วนผสมของทัลคัม 0% และ 2% ที่เวลาในการบด 30, 360, 1440 และ 2880 นาที

ปริมาณทัลคัม (%Talc)	เวลาในการบด (นาที)	ค่าความขรุขระเฉลี่ย*ชิ้นงานก่อนการทดสอบการสึกหรอ(μm)	ค่าความขรุขระเฉลี่ย**ชิ้นงานหลังการทดสอบการสึกหรอ(μm)	หมายเหตุ
0%	30	2.3	1.1	*ค่าความขรุขระเฉลี่ยจากการวัดชิ้นงานก่อนการสึกหรอ ใช้ 2ชิ้นต่อ 1 ภาวะ **ค่าความขรุขระเฉลี่ยจากการวัดชิ้นงานหลังการสึกหรอ ใช้ 2ชิ้นต่อ 1 ภาวะ
	360	1.7	0.6	
	1440	1.7	0.5	
	2880	1.1	0.3	
2%	30	2.8	0.9	
	360	1.4	0.8	
	1440	1.6	0.4	
	2880	1.2	0.3	

นอกจากนั้นยังพบว่าแนวโน้มของค่าความขรุขระจะลดลงหลังจากการทดสอบการทดสอบการสึกหรอ (ตารางที่ 4.6-4.7) เนื่องจากลักษณะผิวของชิ้นงานหลังการทดสอบการสึกหรอจะเรียบกว่า (รูปที่ 4.13-4.18) เนื่องจากเกิดการขัดซ้ำๆกันหลายครั้งซึ่งสอดคล้องกันกับรูปถ่าย

เมื่อเทียบความเรียบของชิ้นงานที่เตรียมจากโลหะบรอนซ์ดีบุกผสมทัลคัมและที่เตรียมจากโลหะทองแดงและดีบุกผสมกับทัลคัมพบว่าผิวของชนิดแรกมีความเรียบมากกว่า เนื่องจากความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าชิ้นงานชนิดที่สองซึ่งการอบผนึกทำได้ยากกว่า

4.5 ความหนาแน่นก้อน (Bulk density)

แนวโน้มของค่าความหนาแน่นก้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการบดเพราะเวลาบดที่นานขึ้นทำให้ขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กลงเมื่อนำมาอัดขึ้นรูปแล้วอบผนึกจึงทำให้มีความหนาแน่นมาก

กว่าเพราะมีรูพรุนขนาดเล็กกว่าแต่ความหนาแน่นก้อนจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณทัลคัม เพราะว่าผงทัลคัมจะมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำดังนั้นเมื่อใส่เข้าไปในเนื้อชิ้นงานจะส่งผลโดยรวมให้น้ำหนักของชิ้นงานลดลง หมายถึงค่าความหนาแน่นก้อนก็จะลดลงด้วย ตามตารางที่ 4.8

และยังพบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมจากผงบรอนซ์บดผสมกับผงทัลคัมจะมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากการผงโลหะทองแดงและดีบุกกับผงทัลคัมเพราะเนื่องจากการอบผนึกของชนิดแรกจะง่ายกว่าชนิดที่สอง จึงทำให้มีความหนาแน่นสูงกว่าและแข็งแรงกว่า

ตารางที่ 4.7 ค่าความขรุขระของโลหะบรอนซ์ดีบุกที่มีส่วนผสมของทัลคัม 0% และ 2% ที่เวลาในการบด 30, 360, 1440 และ 2880 นาที

ปริมาณทัลคัม (%Talc)	เวลาในการบด (นาที)	ค่าความขรุขระเฉลี่ย*ชิ้นงานก่อนการทดสอบการสึกหรอ (μm)	ค่าความขรุขระเฉลี่ย**ชิ้นงานหลังการทดสอบการสึกหรอ(μm)	หมายเหตุ
0%	30	2.2	0.8	*ค่าความขรุขระเฉลี่ยชิ้นงานก่อนการสึกหรอคือค่าเฉลี่ยจากการวัดชิ้นงานก่อนการสึกหรอ ใช้ 2ชิ้นต่อ 1 ภาวะ **ค่าความขรุขระเฉลี่ยชิ้นงานหลังการสึกหรอคือค่าเฉลี่ยจากการวัดชิ้นงานหลังการสึกหรอ ใช้ 2ชิ้นต่อ 1 ภาวะ
	360	1.5	0.6	
	1440	1.3	0.3	
	2880	1.1	0.3	
2%	30	2.7	0.8	
	360	1.5	0.6	
	1440	1.2	0.3	
	2880	1.1	0.3	

ตารางที่ 4.8 ค่าความหนาแน่นก้อน (Bulk Density) (g/cm^3) ของชิ้นงานที่เตรียมจากการบดที่เวลาต่างๆ แล้วอบผนึกที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Milling Time (min) / %Talc	30	360	1440	2880	Remark
0% (I)	6.9	7.1	7.2	7.3	(I) คือ Cu+Sn+Talc
(II)	7.6	7.7	7.8	7.8	
2% (I)	6.5	6.6	6.7	6.9	(II) คือ Tinbronze+Talc
(II)	6.7	6.8	7	7.1	