

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ จะเป็นการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลในส่วนของการต้านแรงดึงที่อุณหภูมิสูงและความเค้นของ INCONEL 718 ที่ผลิตด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเปรียบเทียบกับชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) ที่ถูกผลิตขึ้นเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยในส่วนของผงโลหะจะศึกษาตั้งแต่ลักษณะเริ่มต้นของผงก่อนที่จะนำมาทำการขึ้นรูป กรรมวิธีการอบชุบด้วยความร้อน รวมถึงลักษณะการแตกหักหลังการทดสอบ เพื่อค้นหาประโยชน์ของชิ้นส่วนที่ผลิตจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน เมื่อผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิใช้งานเปรียบเทียบกับชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)

4.1 วัสดุ

ลักษณะของผง INCONEL 718 สามารถแบ่งได้ 3 ส่วน คือ การกระจายตัวของขนาดรูปร่าง และโครงสร้างจุลภาค

ผลการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 การกระจายตัวของขนาดของผง INCONEL 718

จากการทำ Sieve Analysis ได้ผลของการกระจายขนาดของผง INCONEL 718 ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การกระจายตัวของขนาดของผง INCONEL 718

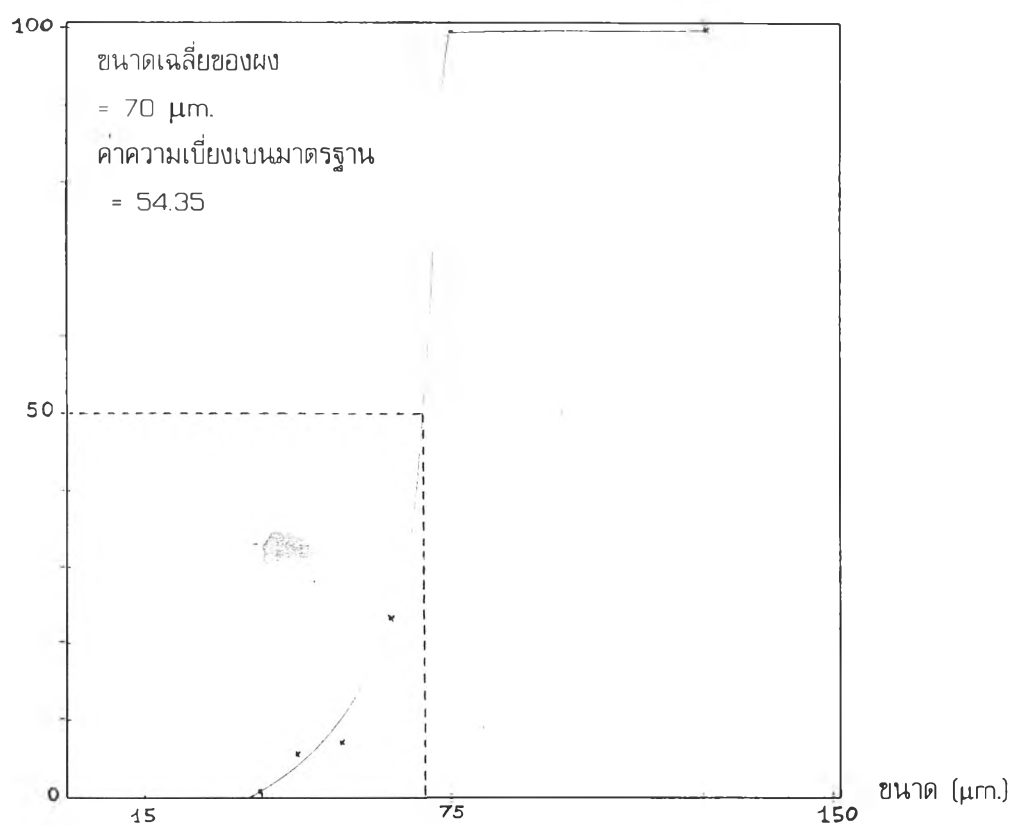
ขนาดของตะแกรง	น้ำหนัก (g.)	% น้ำหนัก
+ 45 (0.355 mm.)	-	-
+ 80 (180 μ m.)	-	-
+ 120 (125 μ m.)	0.25	0.025
-120 ถึง +200 (75 μ m.)	761.92	76.192
-200 ถึง +230 (63 μ m.)	161.35	16.135
-230 ถึง +270 (53 μ m.)	14.05	1.405
-270 ถึง +325 (45 μ m.)	53.90	5.390
-325 ถึง +400 (38 μ m.)	3.39	0.339
+400	0.19	0.019
รวม	995.05	99.505

ซึ่งสามารถใช้แผนภูมิการกระจายตัวของขนาด อธิบายได้และสามารถหาขนาดเฉลี่ยของผง INCONEL 718 ได้จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าของขนาด น้ำหนักสะสม และ % น้ำหนักสะสม ของผง INCONEL 718

ขนาด (μm)	น้ำหนักสะสม (g.)	% น้ำหนักสะสม (%)
< 38	0.19	0.019
38	3.58	0.358
45	57.48	5.748
53	71.53	7.153
63	232.88	23.288
75	994.80	99.480
125	995.05	99.505

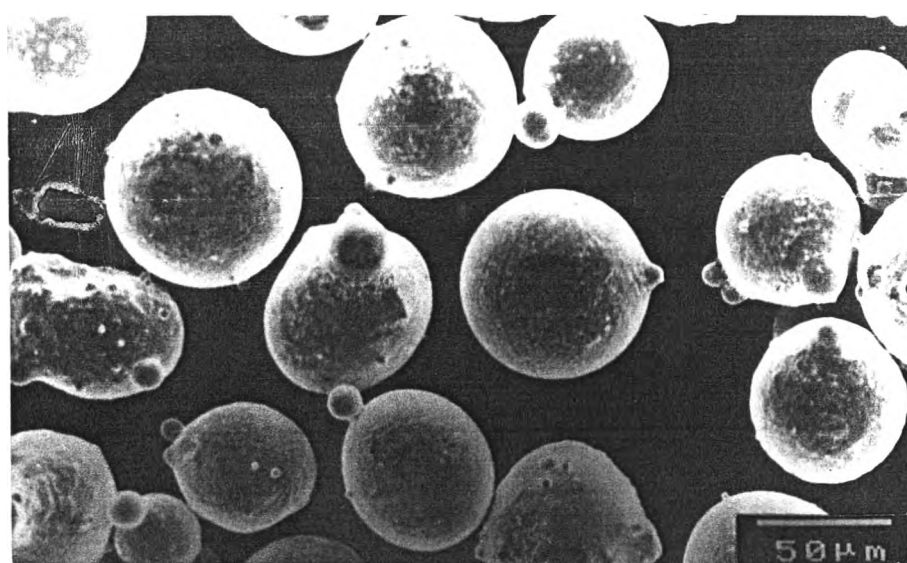
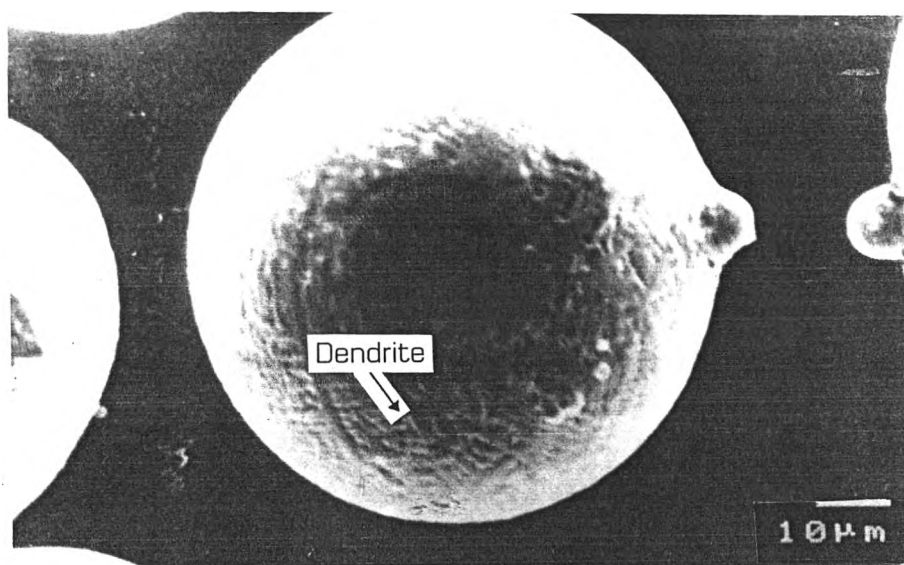
% น้ำหนักสะสม



รูปที่ 4.1 แผนภูมิการกระจายตัวของขนาดของผง INCONEL 718

4.1.2 รูปทรงของผง INCONEL 718

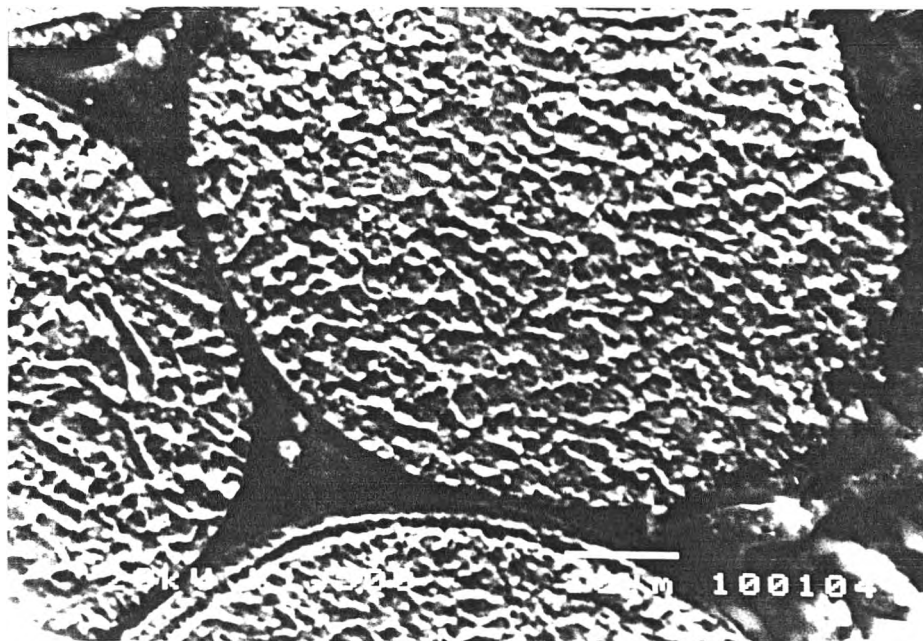
จากรูปที่ 4.2 แสดงถึงรูปทรงของผง INCONEL 718 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด บ่งชี้ให้เห็นลักษณะของผงที่มีรูปร่างกลมเป็นส่วนใหญ่ อันเนื่องมาจากกระบวนการผลิต รวมถึงลักษณะของพื้นผิวของผงส่วนหนึ่งจะสังเกตเห็นคล้าย Dendrite



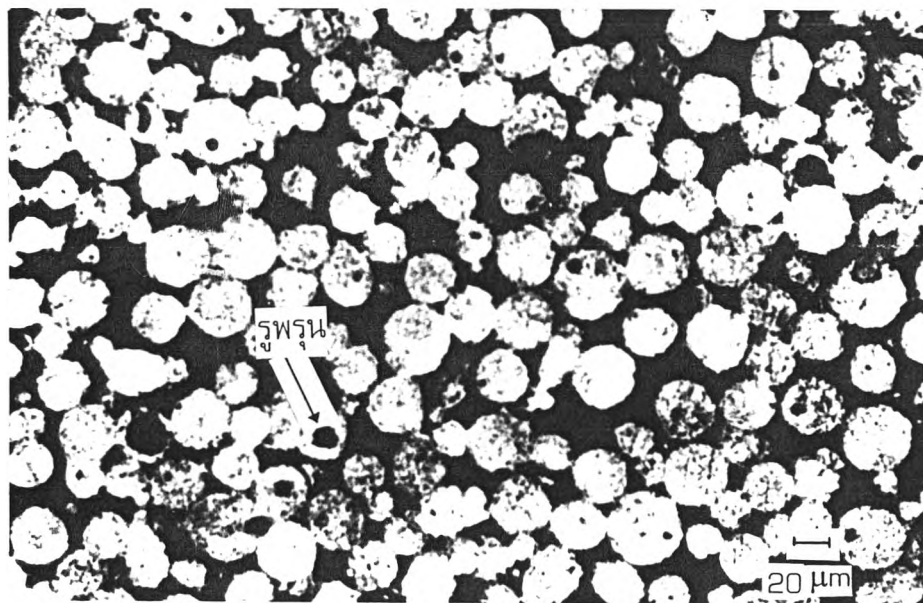
รูปที่ 4.2 ภาพ Scanning Electron Micrographs แสดงถึงรูปทรงของผง INCONEL 718

4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของผง INCONEL 718

รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคของผง INCONEL 718 ที่ได้จากการสังเกตผ่านกล้องจุลทรรศน์ จะพบโครงสร้างคล้ายลักษณะเกรนที่มีความละเอียดสูง (Ultra Fine Grain) ภายในโครงสร้างพื้นดังรูปที่ 4.3 (a) นอกจากนี้ยังพบว่า มีรูพรุนในผง INCONEL 718 เล็กน้อย ในขนาดที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.3 (b)



(a)



(b)

รูปที่ 4.3 ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อผง INCONEL 718

(a) กำลังขยาย x 1,500

(b) กำลังขยาย x 200

4.2 ผลของการขึ้นรูปผง INCONEL 718 โดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

4.2.1 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

พบว่า การแปรผันอุณหภูมิจากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนตั้งแต่ 1,100 - 1,250 °C เมื่อใช้การคงเวลา (Holding Time) ต่าง ๆ กันจะได้ True Density, Volume of Open Porosity, Bulk Density รวมถึง Volume Fraction of Open Porosity ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 แสดงผลของค่าความหนาแน่นเทียบกับเงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนแบบวัดเฉพาะส่วน

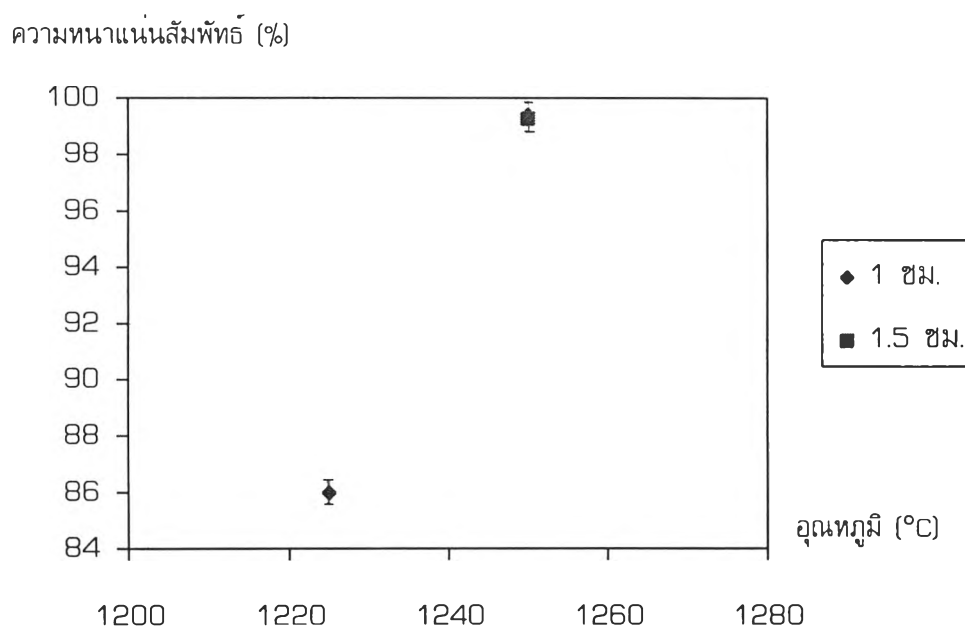
ชิ้น ที่	อุณหภูมิ (°C)	Holding Time (Hour)	Volume of Open Porosity (cm ³)	Vol. Frac. of Open Porosity	True Density (g/cm ³)	Bulk Density (g/cm ³)	Relative Theoretical Density (%)
1	1,100	1	0.3303	0.1669	7.27	6.05	73.78
2	1,125	1	0.0077	2.73×10^{-3}	8.01	7.99	97.44
3	1,125	3	0.0042	1.40×10^{-3}	8.17	8.16	99.51
4	1,150	2	0.0022	8.75×10^{-4}	8.12	8.11	98.90
5	1,200	2	0.0004	1.19×10^{-3}	8.08	8.07	98.41

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของค่าความหนาแน่นเทียบกับเงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนแบบวัดทั้งแท่ง

ชิ้น ที่	อุณหภูมิ (°C)	Holding Time (Hour)	Volume of Open Porosity (cm ³)	Vol. Frac. of Open Porosity	True Density (g/cm ³)	Bulk Density (g/cm ³)	Relative Theoretical Density (%)
1	1,225	1	0.52 ± 0.0801	0.09 ± 0.0298	7.93 ± 0.0570	7.05 ± 0.0770	85.97 ± 0.939
2	1,250	1	8.5×10^{-3} ± 6×10^{-4}	4.84×10^{-4} ± 0.2637×10^{-4}	8.16 ± 0.0080	8.15 ± 8.7×10^{-3}	99.39 ± 0.106
3	1,250	1.5	5.9×10^{-3} ± 2×10^{-4}	3.03×10^{-4} ± 0.0661×10^{-4}	8.14 ± 0.0026	8.14 ± 2.5×10^{-3}	99.27 ± 0.030
4	ชิ้นงานจาก บริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)	-	0.024 ± 3.8×10^{-3}	5.28×10^{-3} ± 1.3778×10^{-3}	8.19 ± 0.0098	8.13 ± 0.0156	99.14 ± 0.190

สำหรับผง INCONEL 718 ที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนพบว่า สามารถขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทำการวัดความหนาแน่นได้ที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 1,225 - 1,250 °C เท่านั้น เมื่อใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 1,225 °C พบว่า ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงเฉพาะหัวและท้าย ชิ้นงานเท่านั้น ตรงส่วนกลางมีความพรุนสูงมาก เนื่องจากเกิดการ Sintering ที่ไม่สมบูรณ์ จึงไม่สามารถนำไปทำการขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติด้านแรงดึงที่อุณหภูมิสูงได้ ดังนั้นจึงนำมาทดสอบความหนาแน่นเฉพาะส่วนได้เท่านั้น

จากรูปที่ 4.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเทียบกับค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนจะทำให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนาแน่นของชิ้นงานทั้งชิ้นที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

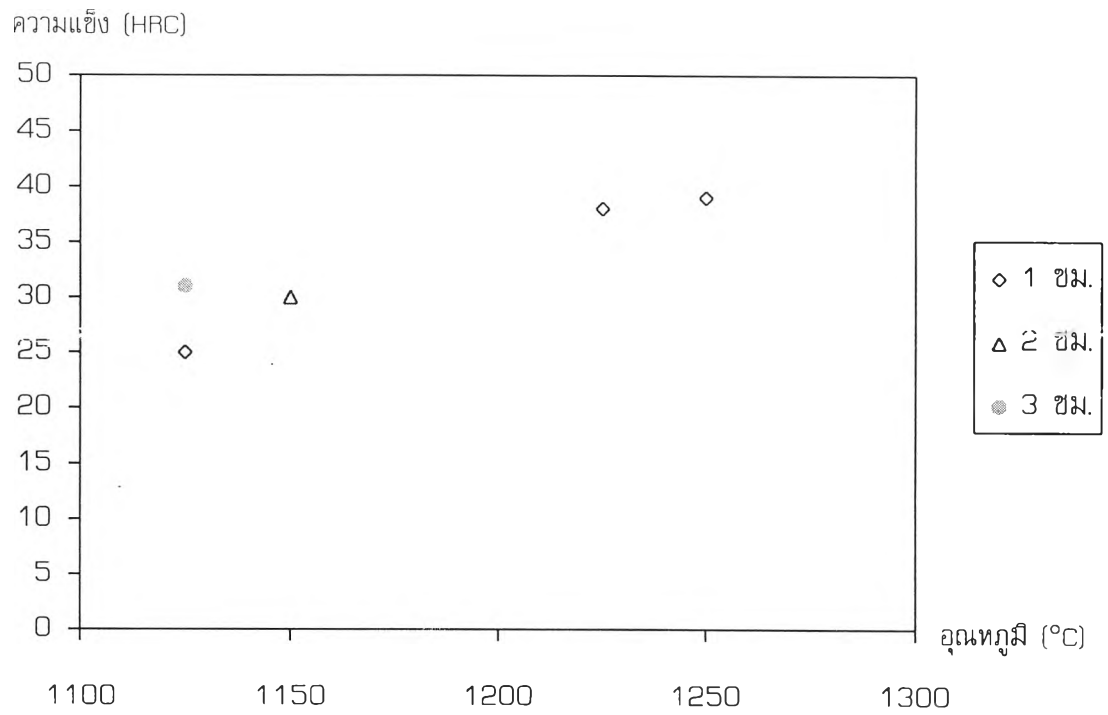
4.2.2 ค่าความแข็งของชิ้นงานก่อนและหลังการทำ SHT

สามารถแสดงผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างได้ดังตารางที่ 4.5

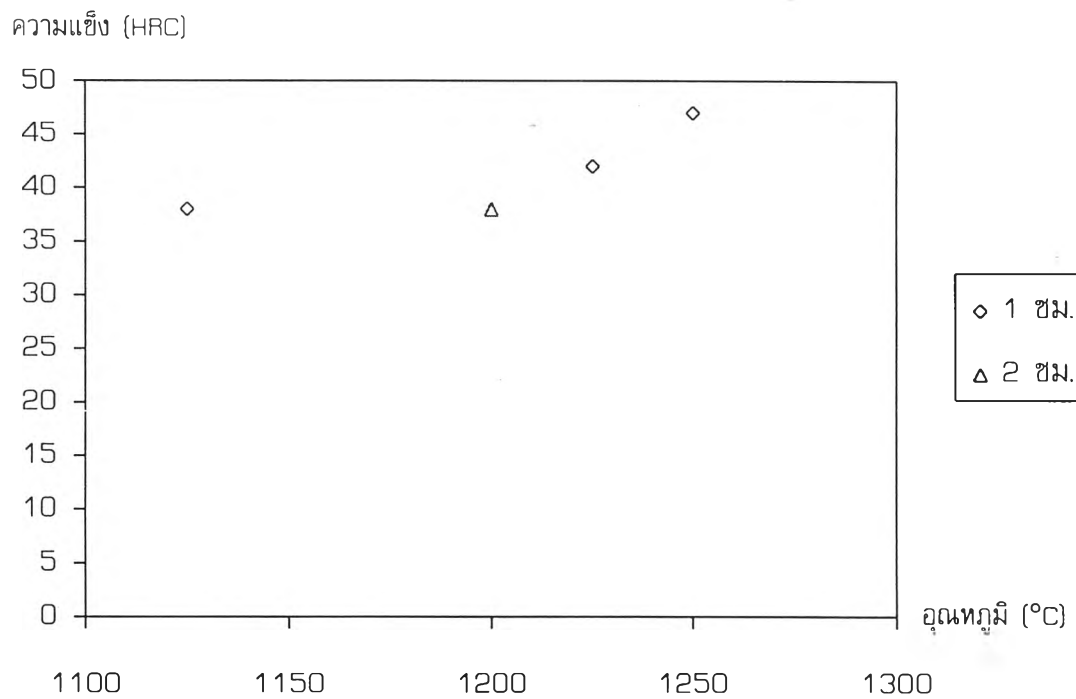
ตารางที่ 4.5 ค่าความแข็งของชิ้นงานก่อนและหลังการทำ SHT

ชิ้นงาน	อุณหภูมิ (°C)	เวลาที่คงไว้ (ชม.)	ความแข็งก่อนทำ SHT		ความแข็งหลังทำ SHT	
			(HV _{0.05})	HRC	(HV)	HRC
1	1,100	1	227	-	357	-
2	1,125	1	277	25	379	38
3	1,125	3	304	31	404	-
4	1,150	2	329	30	406	-
5	1,200	2	387	-	477	38
6	1,225	1	385	38	467	42.5
7	1,250	1	375	39	499	47
8	1,250	1.5	373	-	496	-
9	ชิ้นงานจาก บริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)	-	-	-	361	38

สามารถนำค่าในตารางที่ 4.5 มาทำเป็นแผนภูมิแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง ก่อนและหลังการทำ SHT กับอุณหภูมิในการ Sintering ได้ดังรูปที่ 4.5 และสามารถแสดงผลของความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Theoretical Density) เทียบกับความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนได้ดังรูปที่ 4.6 โดยที่ HV จะทำการวัดเฉพาะส่วนของโครงสร้างพื้นเท่านั้น

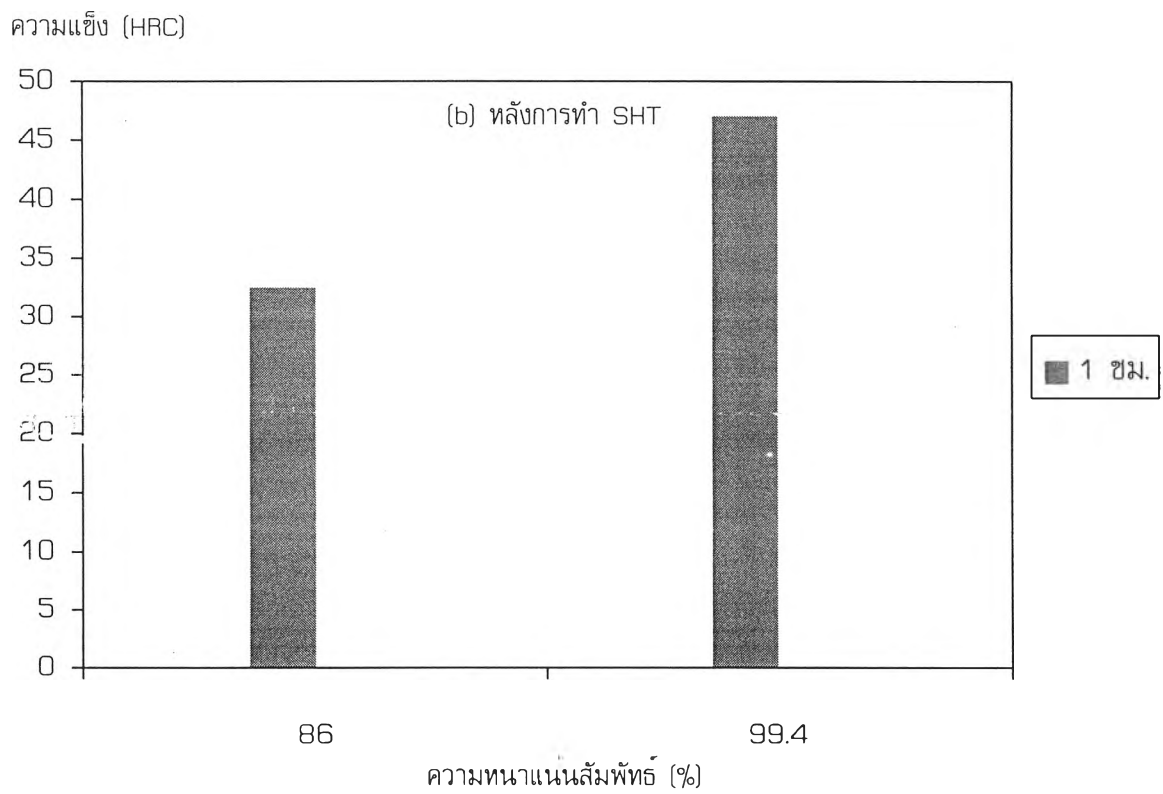
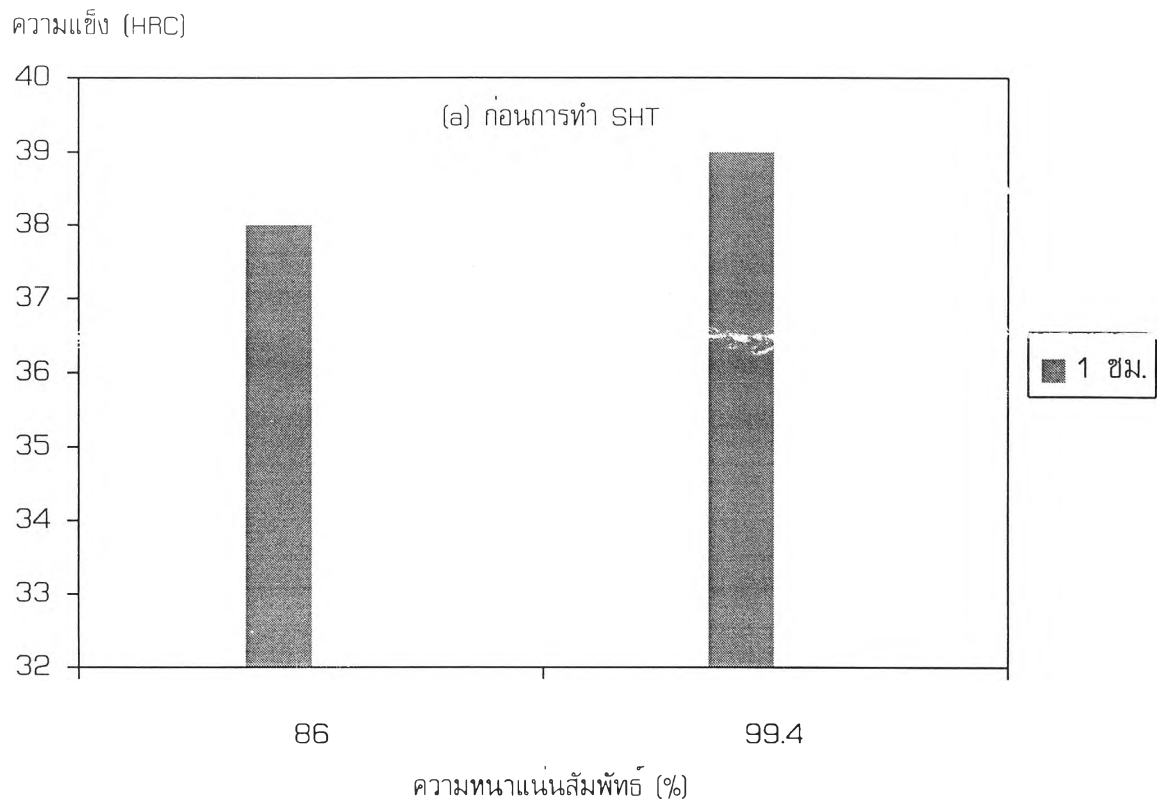


(a) ก่อนการทำ SHT



(b) หลังการทำ SHT

รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน



รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับความหนาแน่นสัมพัทธ์สำหรับชิ้นงานทั้งชิ้น

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 จะเห็นว่า ค่าความแข็งมีส่วนสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นและการทำ SHT กล่าวคือ เมื่อค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้น และชิ้นงานที่ผ่านการทำ SHT จะได้ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

4.3 ผลของโครงสร้างจุลภาค

จากผลของการขึ้นรูปผง INCONEL 718 สามารถใช้กล้องจุลทรรศน์ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนก่อนการทำ SHT ได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนการทำ SHT

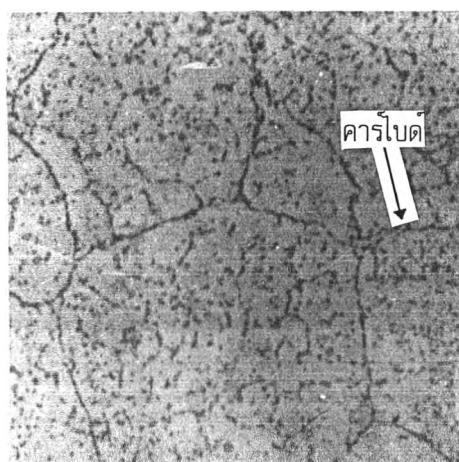
ชิ้นงาน	เงื่อนไข	รูพรุน	คาร์ไบด์ที่ขอบเกรน	คาร์ไบด์ในเกรน	แสดงในรูปที่	หมายเหตุ
1	1,125°C/1 ชม.	มีจำนวนมากและส่วนมากมีรูปร่างไม่แน่นอน	เป็นแผ่นบางยาวต่อเนื่อง	เป็นเม็ดขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่ว		คาร์ไบด์ที่ขอบเกรนและในเกรน คล้ายรูปที่ 4.8 (b)
2	1,125°C/3 ชม.	มีจำนวนปานกลาง	เป็นแผ่นบางยาวต่อเนื่อง	เป็นเม็ดขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่ว	4.8 (b)	
3	1,150°C/2 ชม.	มีจำนวนน้อย	เป็นแผ่นบางยาวต่อเนื่อง	เป็นเม็ดขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่ว		คาร์ไบด์ที่ขอบเกรนและในเกรน คล้ายรูปที่ 4.8 (b)
4	1,200°C/2 ชม.	มีจำนวนน้อยมาก และมีรูปร่างค่อนข้างกลม	เป็นแผ่นหนายาวต่อเนื่อง	เป็นเม็ดขนาดใหญ่ กระจายอยู่ทั่ว		คาร์ไบด์ที่ขอบเกรนและในเกรน คล้ายรูปที่ 4.9 (b)
5	1,225°C/1 ชม.	มีจำนวนน้อยส่วนมากและเป็นทรงกลม	เป็นแผ่นหนายาวต่อเนื่อง	เป็นเม็ดขนาดใหญ่ กระจายอยู่ทั่ว	4.9 (b)	
6	1,250°C/1 ชม.	มีจำนวนน้อยและเป็นทรงกลม	เป็นแผ่นหนายาวต่อเนื่อง	เป็นเม็ดขนาดใหญ่ กระจายอยู่ทั่ว	4.10 (b)	
7	1,250°C/1.5 ชม.	มีจำนวนน้อยมาก และเป็นทรงกลม	เป็นแผ่นหนายาวไม่ต่อเนื่อง	เป็นเม็ดขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่ว		คาร์ไบด์ในเกรน คล้ายรูปที่ 4.10 (b)

หลังจากการทำ SHT จะสามารถตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงานได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงผลของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการทำ SHT

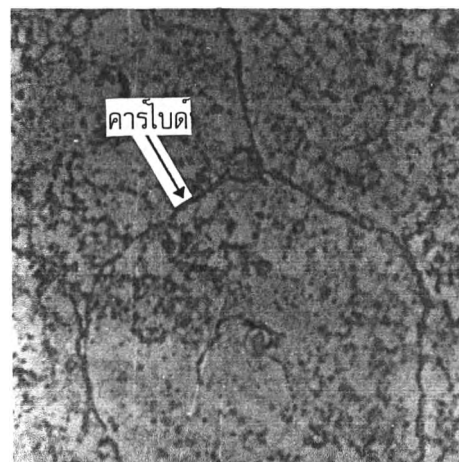
ชิ้นงาน	เงื่อนไข	รูปพรุน	คาร์ไบด์ที่ขอบเกรน	คาร์ไบด์ในเกรน	แสดงในรูปที่	หมายเหตุ
1	1,125°C/1 ชม.	มีจำนวนมากและส่วนมากมีรูปร่างไม่แน่นอน	เป็นเม็ดเรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่อง	มีการกระจายตัวมากกว่าก่อนทำ SHT		คาร์ไบด์ที่ขอบเกรนและในเกรน คล้ายรูปที่ 4.8 (a)
2	1,125°C/3 ชม.	พบจำนวนปานกลาง มีรูปร่างค่อนข้างกลม	เป็นเม็ดเรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่อง	มีการกระจายตัวมากกว่าก่อนทำ SHT	4.8 (a)	
3	1,150°C/2 ชม.	มีจำนวนน้อย	เป็นเม็ดเรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่อง	มีการกระจายตัวมากกว่าก่อนทำ SHT		คาร์ไบด์ที่ขอบเกรนและในเกรน คล้ายรูปที่ 4.9 (a)
4	1,200°C/2 ชม.	มีจำนวนน้อยมาก	เป็นเม็ดเรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่อง	เป็นเม็ดขนาดเล็ก มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ		คาร์ไบด์ที่ขอบเกรนและในเกรน คล้ายรูปที่ 4.9 (a)
5	1,225°C/1 ชม.	มีจำนวนน้อยมาก	เป็นเม็ดเรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่อง	เป็นเม็ดขนาดเล็ก มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ	4.9 (a)	
6	1,250°C/1 ชม.	มีจำนวนน้อยมาก และรูปร่างเป็นทรงกลม	เป็นเม็ดเรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่อง	เป็นเม็ดขนาดเล็ก มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ	4.10 (a)	เกรนมีขนาดประมาณ 12 μm .
7	1,250°C/1.5 ชม.	มีจำนวนน้อยมาก และรูปร่างเป็นทรงกลม	เป็นเม็ดเรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่อง	เป็นเม็ดขนาดเล็ก มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ		<ul style="list-style-type: none"> • เกรนมีขนาดประมาณ 12 μm. • คาร์ไบด์ที่ขอบเกรนและในเกรน คล้ายรูปที่ 4.10 (a)
8	ชิ้นงานจากการบินไทย จำกัด (มหาชน)	มีจำนวนน้อยมาก และเป็นทรงกลม	เป็นเม็ดเรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่อง	มีจำนวนน้อยมาก	4.14	เกรนมีขนาดประมาณ 15 μm .

และจากการตรวจสอบ Precipitate Phase ซึ่งได้แก่ γ' และ γ'' ทั้งชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) และจากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่ผ่านการทำ SHT ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่า ขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของ γ' ทั้งจากชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) และแบบผงโลหะจะมีลักษณะและขนาดใกล้เคียงกันคือ จะมีรูปร่างค่อนข้างกลม โดยมีขนาด 5 - 9 nm. กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโครงสร้างพื้น ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12



10 μm

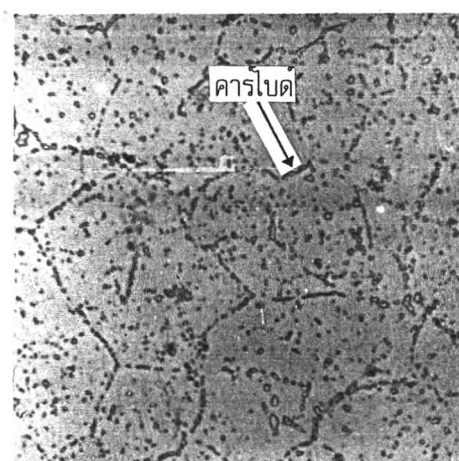
(a) 1,125 °C/3 ชม. SHT (x 500)



10 μm

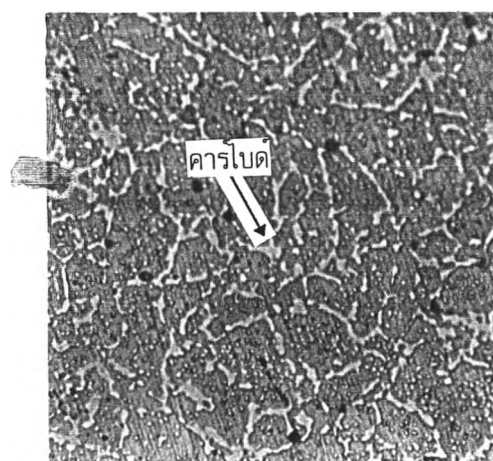
(b) 1,125 °C/3 ชม. Non SHT (x 500)

รูปที่ 4.7 ภาพของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,125 °C/3 ชม.



10 μm

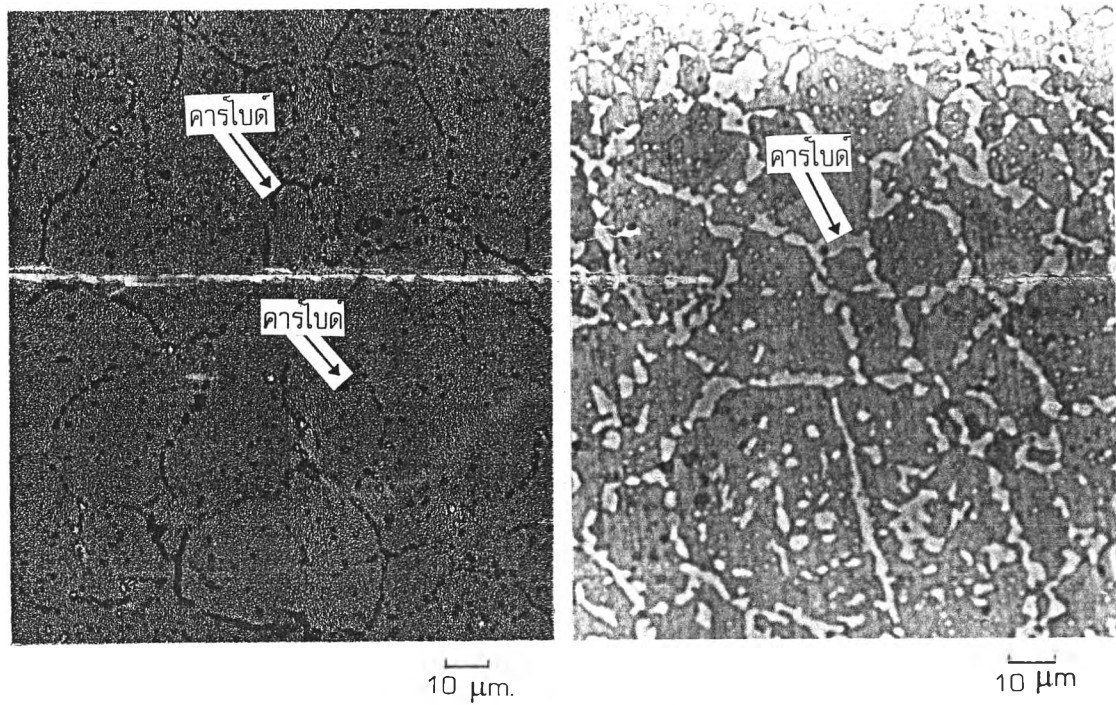
(a) 1,225 °C/1 ชม. SHT (x 500)



10 μm.

(b) 1,225 °C/1 ชม. Non SHT (x 500)

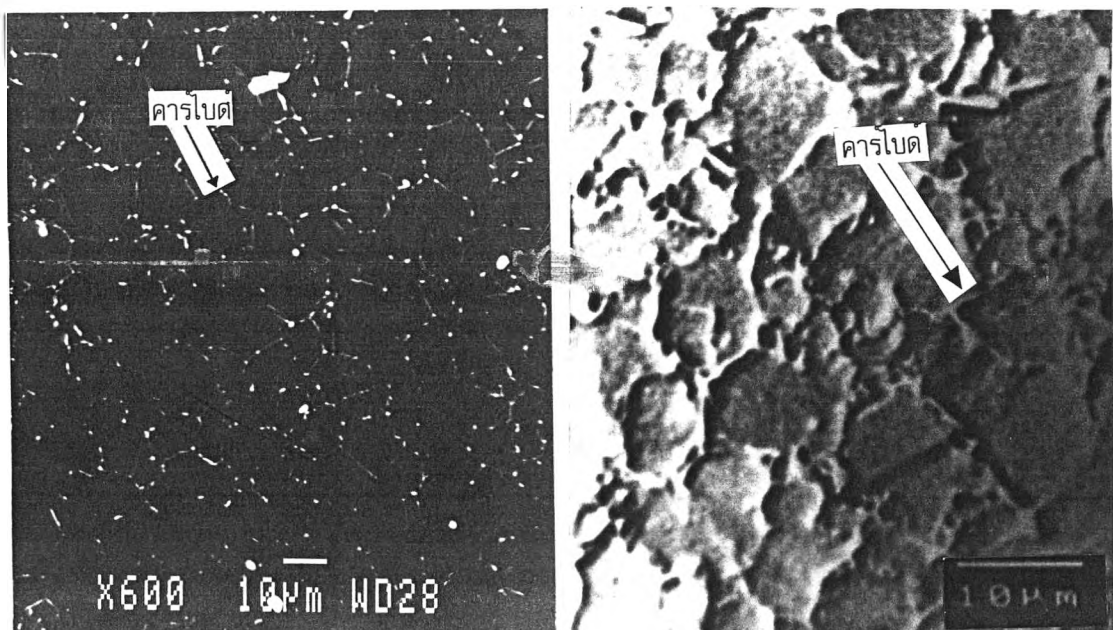
รูปที่ 4.8 ภาพของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1,225 °C/1 ชม.



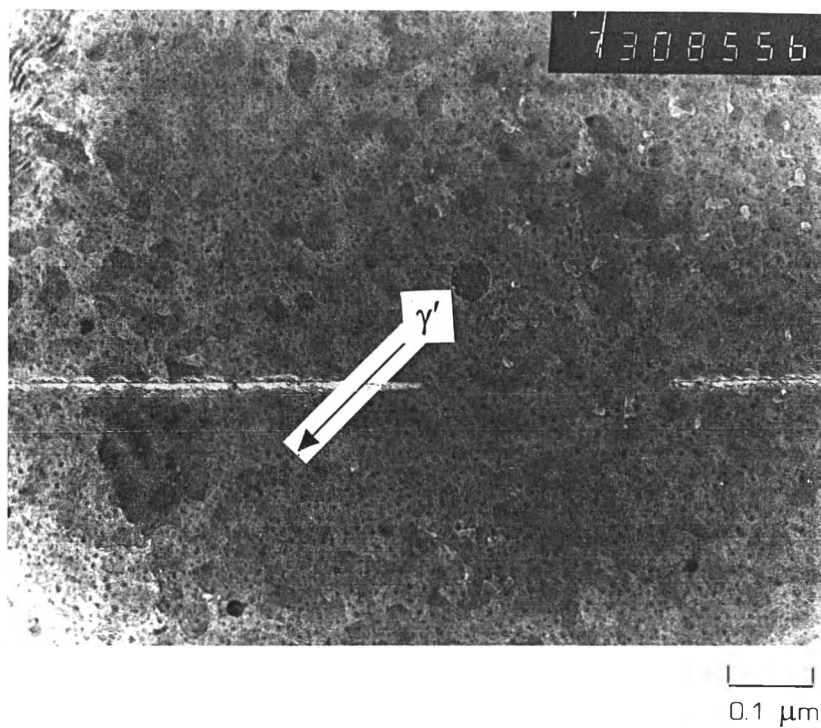
(a) 1,250 °C/1 ชม. SHT (x 600)

(b) 1,250 °C/1 ชม. Non SHT (x 500)

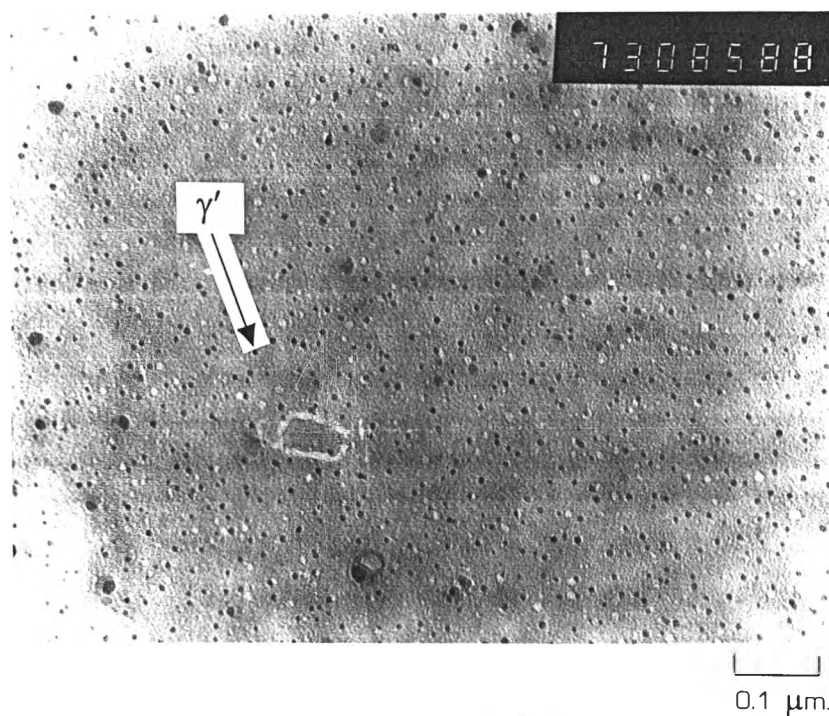
รูปที่ 4.9 ภาพของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,250 °C/1 ชม.



รูปที่ 4.10 ภาพของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 4.11 ภาพของ Precipitate Phase ในโครงสร้างพื้น
ของชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 4.12 ภาพของ Precipitate Phase ในโครงสร้างพื้นของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

4.4 การตรวจสอบความพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผงโลหะ

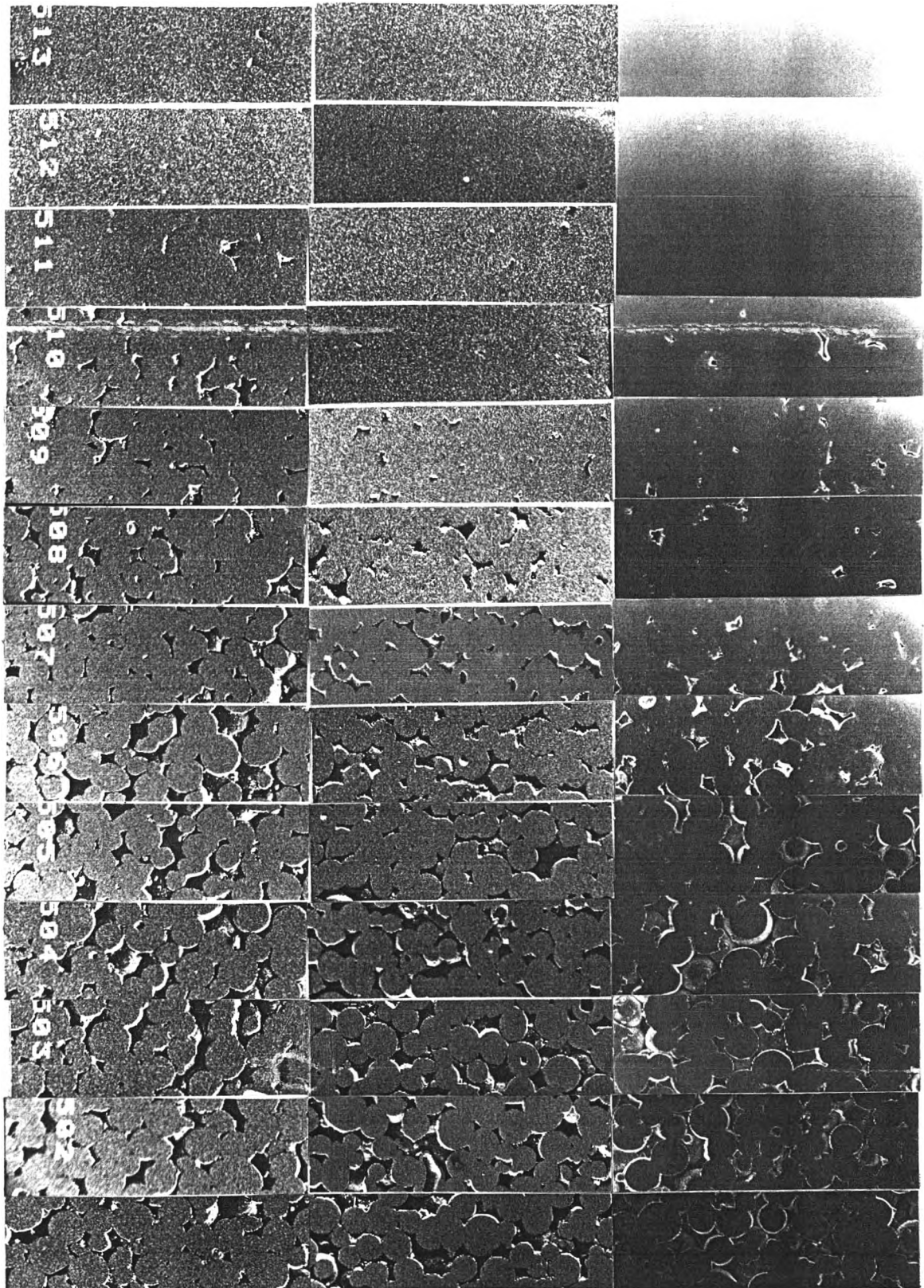
4.4.1 อุณหภูมิ 1,225 °C/1 ชม.

ทำการบันทึกภาพทุกระยะ 3 มม. พบว่า จำนวนของรูพรุนจะมากขึ้นอย่างชัดเจนที่ระยะ 12 มม. และจะมากขึ้นตามระยะห่างจากหัวชิ้นงาน โดยรูปร่างของรูพรุนจะมีลักษณะกลมที่ระยะแรกของแรงกด เมื่อระยะห่างจากหัวชิ้นงานมากขึ้นจะมีรูปร่างไม่แน่นอน จากรูปที่ 4.13 พบรูพรุนที่มีรูปร่างไม่แน่นอนที่ระยะ 12 มม. ห่างจากหัวชิ้นงาน นอกจากนี้ยังพบว่าจำนวนรูพรุนที่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงานเทียบกับบริเวณห่างจากกึ่งกลางชิ้นงานมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยปริมาณของรูพรุนที่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงานมีมากกว่า และส่วนมากมีรูปร่างไม่แน่นอน จนกระทั่งถึงระยะห่างจากหัวชิ้นงาน 24 มม. จึงพบว่า จำนวนและรูปร่างของรูพรุนในชิ้นงานมีขนาดใกล้เคียงกัน และเมื่อระยะห่างมากขึ้นพบว่า จำนวนรูพรุนที่บริเวณขอบชิ้นงานจะมากกว่าบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน ที่เกิดปรากฏการณ์เช่นนี้เนื่องจากความดันและแรงเสียดทานรวมทั้งการไหลตัวของผงมีส่วนอย่างมากต่อผลที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

4.4.2 อุณหภูมิ 1,250 °C/1 ชม.

ทำการบันทึกภาพทุกระยะ 3 มม. พบว่า จำนวนรูพรุนจะมากขึ้นที่ระยะ 18 มม. และจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามระยะห่างจากหัวชิ้นงาน โดยรูพรุนจะมีรูปร่างกลมที่ระยะแรกของหัวชิ้นงาน และจะเริ่มเปลี่ยนเป็นรูปร่างแบบไม่แน่นอนที่ระยะมากกว่า 18 มม. ในบางรูพรุน

จากรูปที่ 4.14 พบว่า รูพรุนที่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงานมีจำนวนมากกว่าบริเวณถัดจากกึ่งกลางชิ้นงาน แต่โดยรวมแล้วพบรูพรุนทั้งในจำนวน ขนาด และรูปร่างที่ต่างจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,225 °C โดยในส่วนของจำนวนจะพบว่า มีจำนวนน้อยกว่ามากอย่างเห็นได้ชัด ~~ซึ่ง~~ รูพรุนจะเล็กกว่ามาก และจะมีรูปร่างกลมเป็นส่วนมาก ที่จะพบเป็นรูปร่างแบบไม่แน่นอนมีจำนวนน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลต่อการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนมากที่สุด ดังจะเห็นได้จากค่าความหนาแน่นที่ได้ รวมทั้งจากการตรวจสอบรูพรุนตลอดชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนพบว่าการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,250 °C จะให้ค่าความหนาแน่นที่สูงกว่าที่อุณหภูมิ 1,225 °C และพบรูพรุนน้อยกว่าอย่างชัดเจน

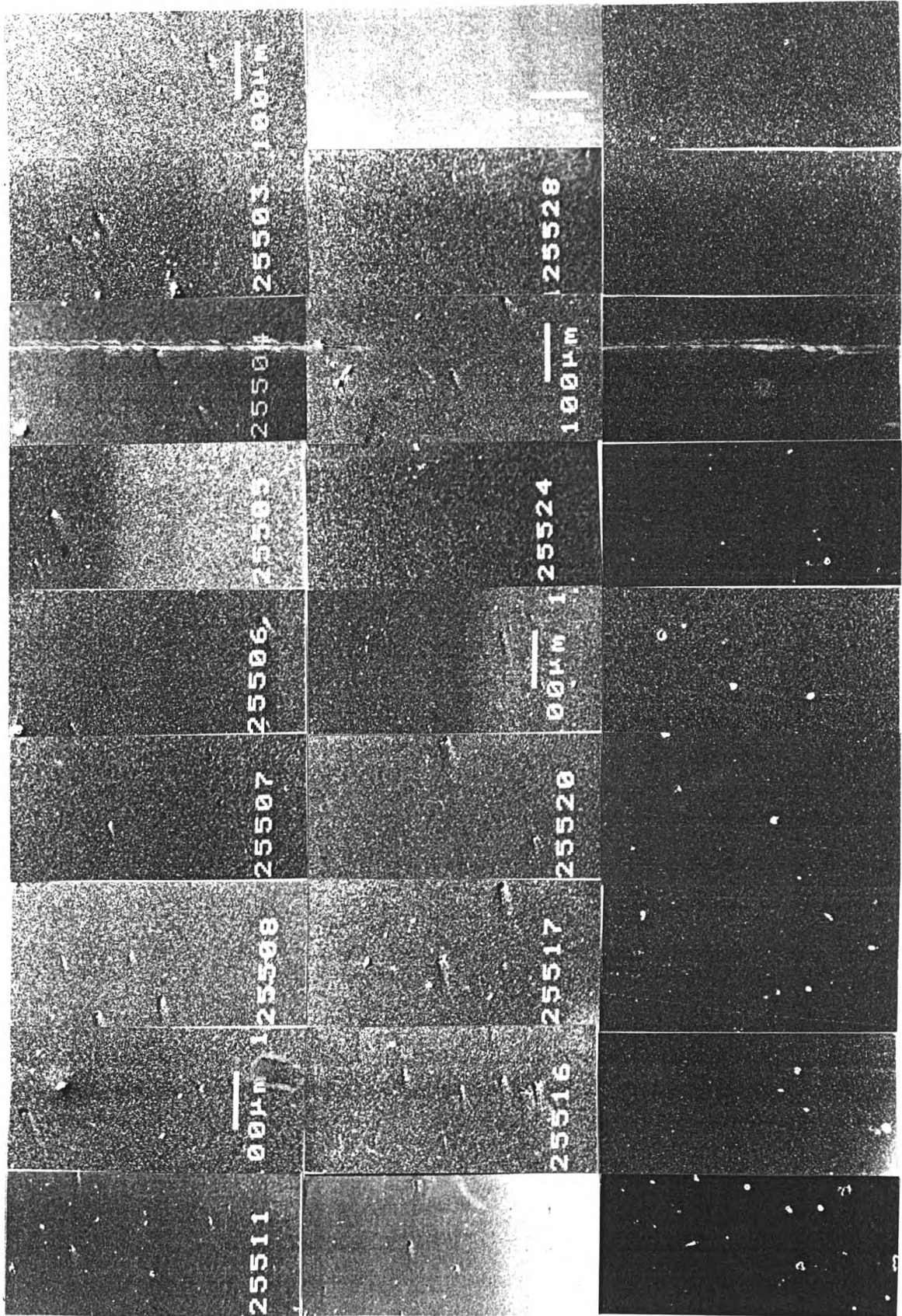


กึ่งกลางชิ้นงาน



ขอบชิ้นงาน

รูปที่ 4.13 แสดงจำนวนและรูปร่างของรูพรุนของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน
ที่อุณหภูมิ 1,225 °C/1 ชม. ฝาดตามยาว



กึ่งกลางชิ้นงาน



ขอบชิ้นงาน

รูปที่ 4.14 แสดงจำนวนและรูปร่างของรูพรุนของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ที่อุณหภูมิ 1,250 °C/1 ซม. ฝาดตามยาว

4.5 การทดสอบคุณสมบัติต้านแรงดึงที่อุณหภูมิสูง

จากการทดสอบค่าคุณสมบัติต้านแรงดึงที่อุณหภูมิ 650 °C จะได้ค่าต่าง ๆ ดังตารางที่

4.8

ตารางที่ 4.8 การแสดงผลของค่า UTS, 0.2 % Proof Stress, Elongation, Reduction of Area และ Young's Modulus ของการทดสอบชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผงโลหะ เทียบกับชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)

ชนิดของชิ้นงาน	UTS (MPa)	0.2 % Proof Stress (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Young's Modulus (GPa)
ชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)	817 ± 21.11	501 ± 1.40	34.56 ± 0.42	25.38 ± 1.275	47 ± 1.11
Powder 1,225°C/1 ซม.	102 ± 3.91	95 ± 2.88	$3.9 \times 10^{-1} \pm 0.1 \times 10^{-3}$	$2.8 \times 10^{-1} \pm 0.4 \times 10^{-3}$	-
Powder 1,250°C/1 ซม.	969 ± 16.46	806 ± 6.96	4.46 ± 0.66	2.94 ± 0.055	86.60 ± 1.40
Powder 1,250°C/1.5 ซม.	925 ± 3.77	738 ± 3.21	4.24 ± 0.72	3.16 ± 0.25	82 ± 3.59

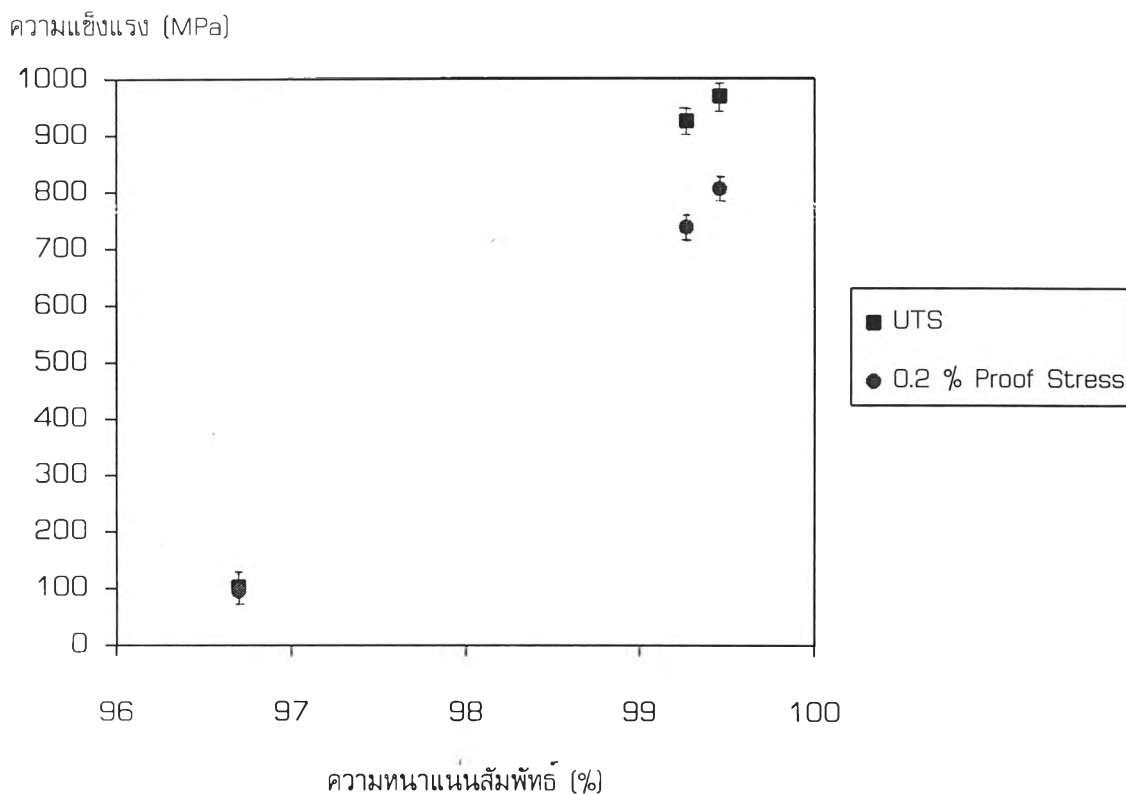
จากตารางที่ 4.8 จะเห็นว่า ชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) จะมีความเหนียวสูงกว่าชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนมาก แต่พบว่าชิ้นงานที่ผลิตจากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนจะมี UTS และ 0.2 % Proof Stress สูงกว่าชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) อย่างเห็นได้ชัด

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความหนาแน่นมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปจากผงโลหะโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงผลระหว่างความหนาแน่นเทียบกับความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิสูงของชิ้นงานทดสอบที่ผลิตจากผงโลหะเทียบกับชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)

ชิ้นงานที่	ชนิดของชิ้นงาน	Relative Theoretical Density (%)	UTS (MPa)	0.2 % Proof Stress (MPa)
1	ชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)	99.82 ± 0.190	817 ± 21.11	501 ± 1.40
2	Powder 1,225 °C; 1 ซม.	96.70 ± 0.939	102 ± 3.91	95 ± 2.88
3	Powder 1,250 °C; 1 ซม.	99.46 ± 0.106	969 ± 16.46	806 ± 6.96
4	Powder 1,250 °C; 1.5 ซม.	99.27 ± 0.030	925 ± 3.77	738 ± 3.21

สามารถแสดงเป็นแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับ UTS และ 0.2 % Proof Stress ได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับ UTS และ 0.2 % Proof Stress ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

จากแผนภูมิในรูปที่ 4.15 พบว่า ค่าคุณสมบัติทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ 650 °C ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเป็นหลัก กล่าวคือเมื่อค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่า UTS และ 0.2 % Proof Stress ของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น

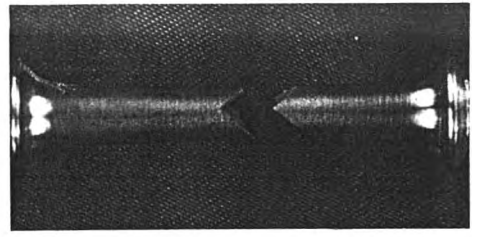
4.6 การแสดงผลการแตกหักของชิ้นงาน

4.6.1 การแตกหักของชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) จะมีส่วนที่เป็น Cup และ Cone และการยึดตัวของ Gauge Length จะมากบ่งบอกถึงการแตกหักแบบเหนียวอย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.16 เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูจะพบว่า การแตกหักเป็นแบบผ่านเกรน (Transgranular) ดังรูปที่ 4.17 (b) และเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาดส่องดูจะพบว่า เป็นการแตกหักแบบเหนียวที่เกิดจากการดึงที่อุณหภูมิสูง ดังรูปที่ 4.21

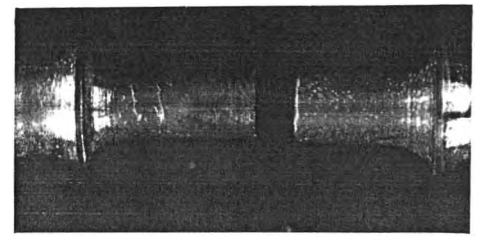
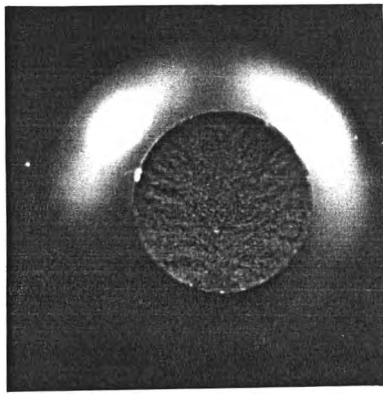
4.6.2 การแตกหักของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนพบว่า ที่อุณหภูมิ $1,225^{\circ}\text{C}/1$ ชม. จะพบการแตกหักเป็นแบบหน้าตัดเสมอกันทั้ง 2 ส่วนแสดงถึงการแตกหักแบบเปราะ และยังพบรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อชิ้นงานอย่างเห็นได้ชัดเจנדังรูปที่ 4.16 (c) ซึ่งสอดคล้องกับการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่จะพบรูพรุนจำนวนมาก และเป็นการแตกหักที่เกิดขึ้นที่ Neck ของผง แสดงให้เห็นว่าการ Sintering ในบริเวณนี้อยู่ในระยะ Initial Stage เท่านั้น ดังรูปที่ 4.17 (a) โดยจะเห็นได้ชัดเจนจากการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาดปรากฏการณ์เช่นนี้ทำให้ผลของความแข็งแรงที่ได้มีค่าต่ำ เนื่องจากมีพื้นที่รับแรงน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.18

4.6.3 การแตกหักของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนพบว่า ที่อุณหภูมิ $1,250^{\circ}\text{C}/1$ ชม. จะพบการแตกหักเป็นแบบหน้าตัดเสมอกันทั้ง 2 ส่วน และจะพบจุดเริ่มต้นการแตกหัก (Initial Crack) อย่างชัดเจน และจากจุดนี้จะเห็นร่องการขยายตัวของการแตกกระจายออกมาจากจุดเริ่มต้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (b) นอกจากนี้ยังพบว่าจากการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาดจะเห็นการแตกหักเป็นแบบตามเกรน (Intergranular) ดังแสดงในรูปที่ 4.19

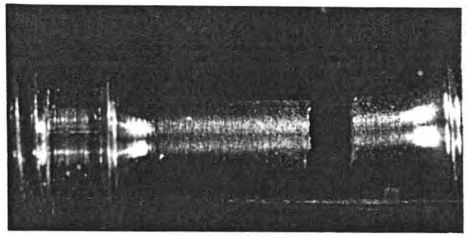
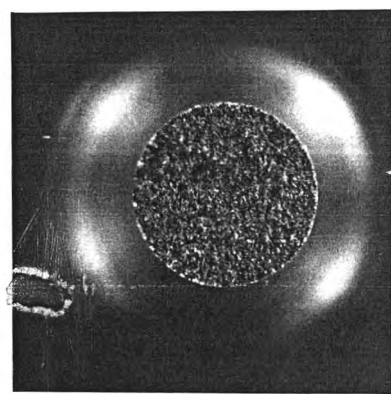
4.6.4 การแตกหักของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ $1,250^{\circ}\text{C}/1.5$ ชม. พบว่า จะคล้ายกับชิ้นงานที่ผลิตที่อุณหภูมิ $1,250^{\circ}\text{C}/1$ ชม. ดังแสดงในรูปที่ 4.20



(a) ชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)



(b) อัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,250 °C/1 ซม.



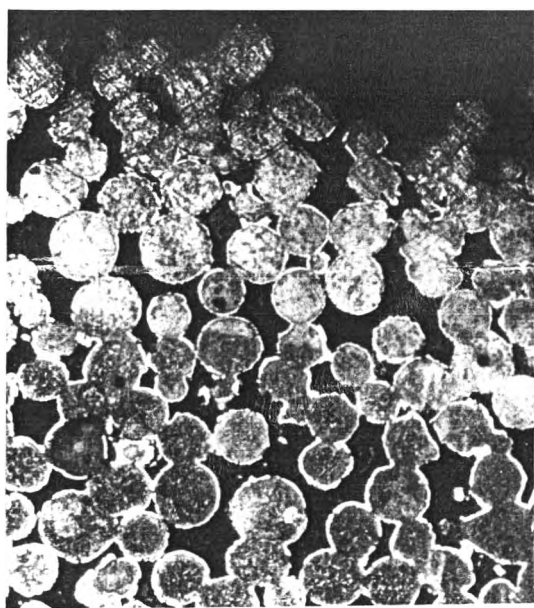
(c) อัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,225 °C/1 ซม.

ด้านหน้าชิ้นงาน

ด้านข้างชิ้นงาน

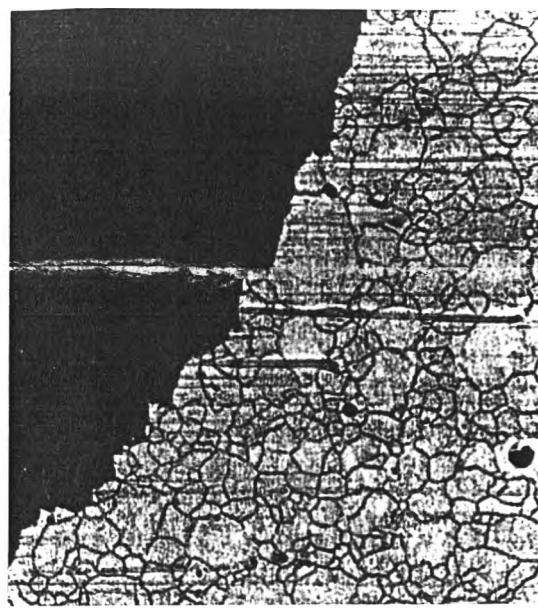
รูปที่ 4.16 ภาพการแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ 650 °C

ผลของการแตกหักแสดงด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์



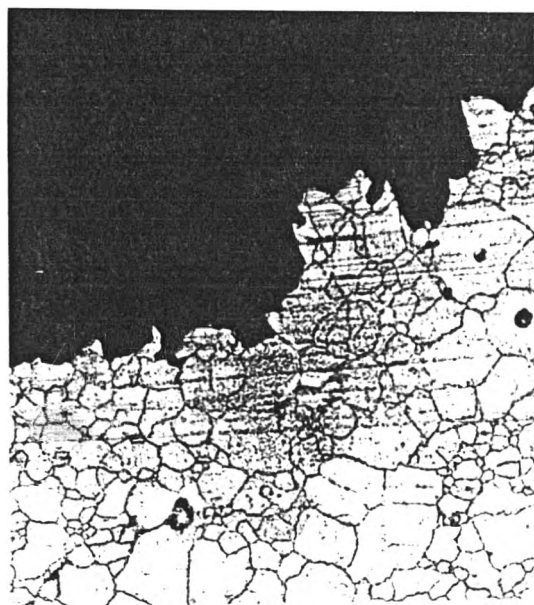
20 μm

(a) ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน
ที่อุณหภูมิ 1,225 °C/1 ซม.



20 μm

(b) ชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)



20 μm.

(c) ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน
ที่อุณหภูมิ 1,250 °C/1 ซม.

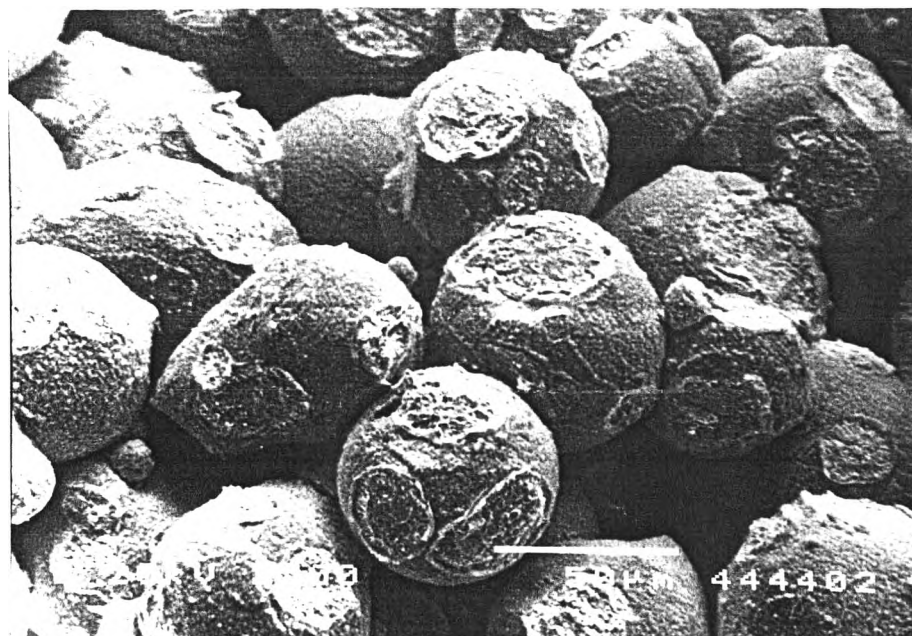
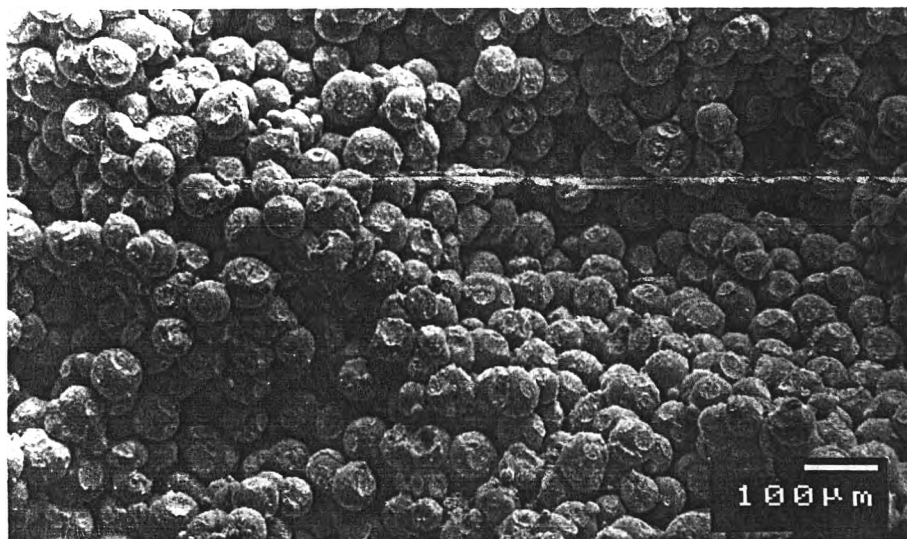


20 μm

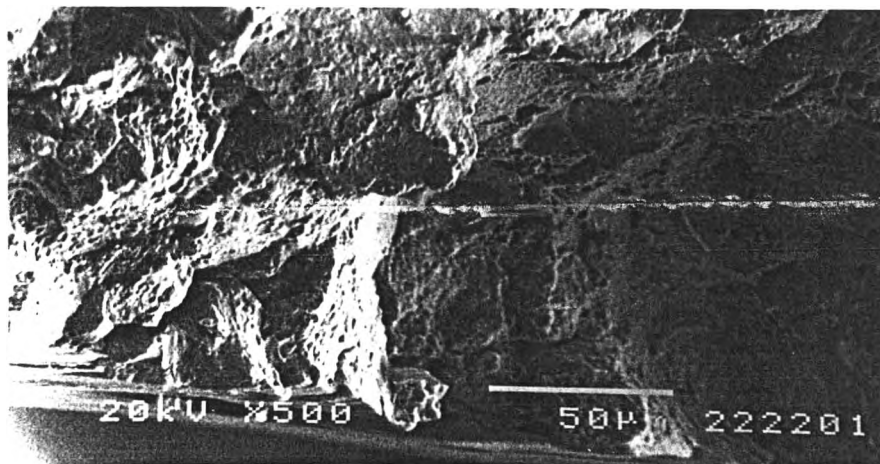
(d) ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน
ที่อุณหภูมิ 1,250 °C/1.5 ซม.

รูปที่ 4.17 ภาพแสดงบริเวณที่เกิดการแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการดึงที่อุณหภูมิ 650 °C

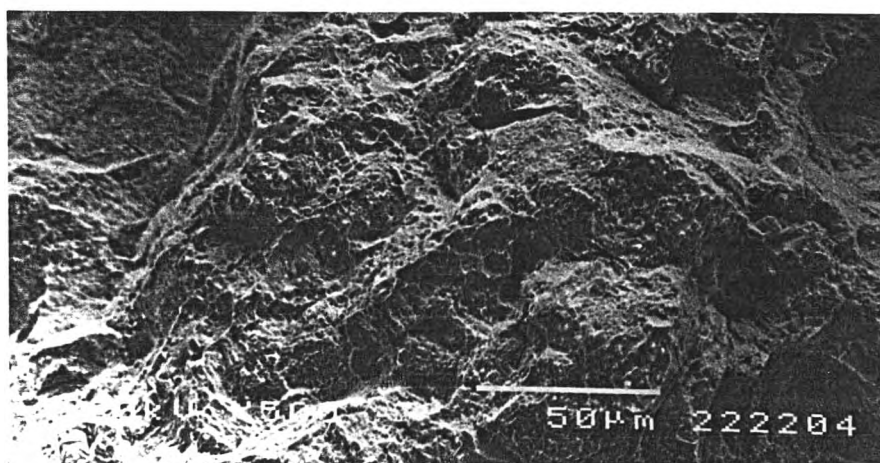
ผลของการแตกหักแสดงด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด



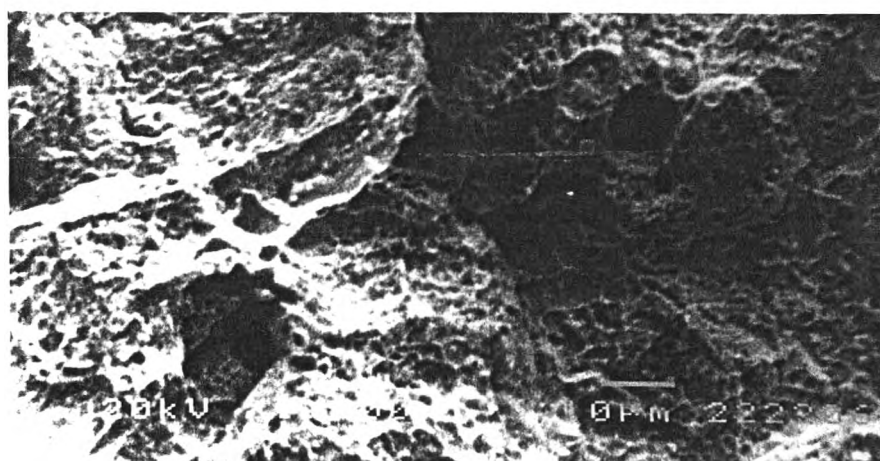
รูปที่ 4.18 ภาพแสดงพื้นผิวหน้าตัดของบริเวณที่เกิดการแตกหักที่อุณหภูมิ 650 °C ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,225 °C/1 ซม. ที่กำลังขยายต่ำและสูงตามลำดับ



(a)

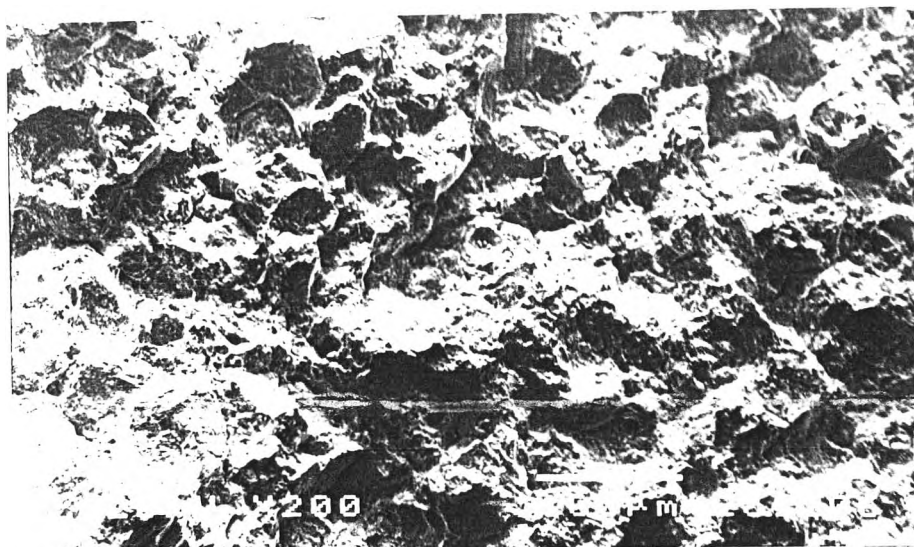


(b)

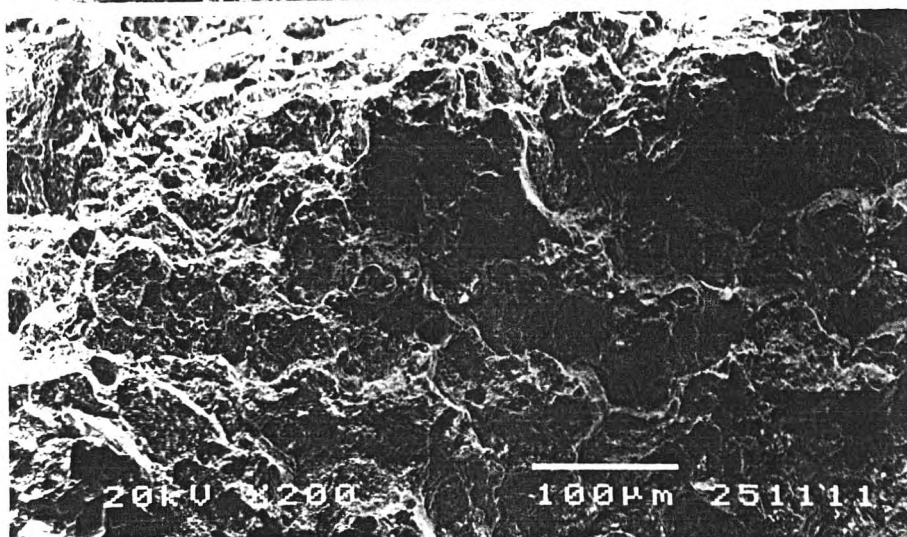


(c)

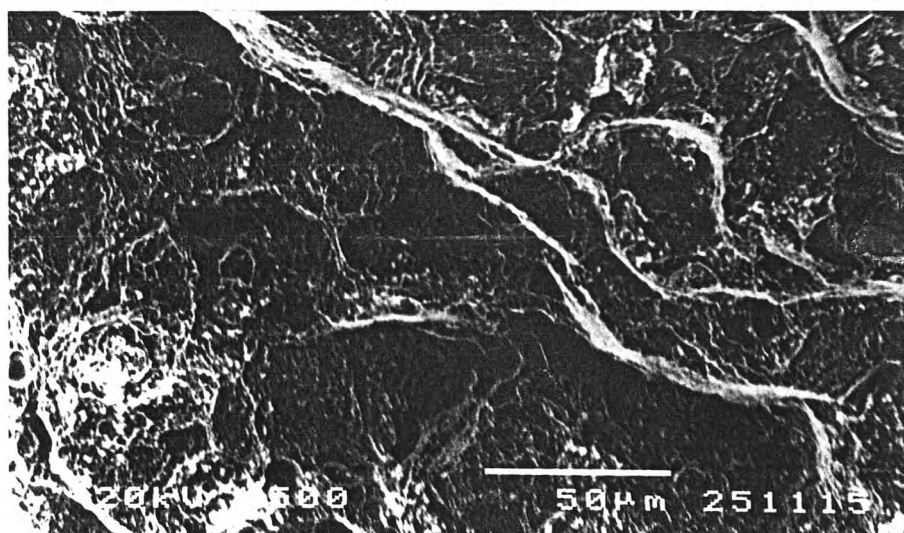
รูปที่ 4.19 ภาพแสดงพื้นผิวหน้าตัดของบริเวณที่เกิดการแตกหักที่อุณหภูมิ 650 °C ของชิ้นงาน
 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,250 °C/1 ซม.
 (a) บริเวณขอบ (b) บริเวณระหว่างขอบและกึ่งกลาง (c) บริเวณกึ่งกลาง



(a)

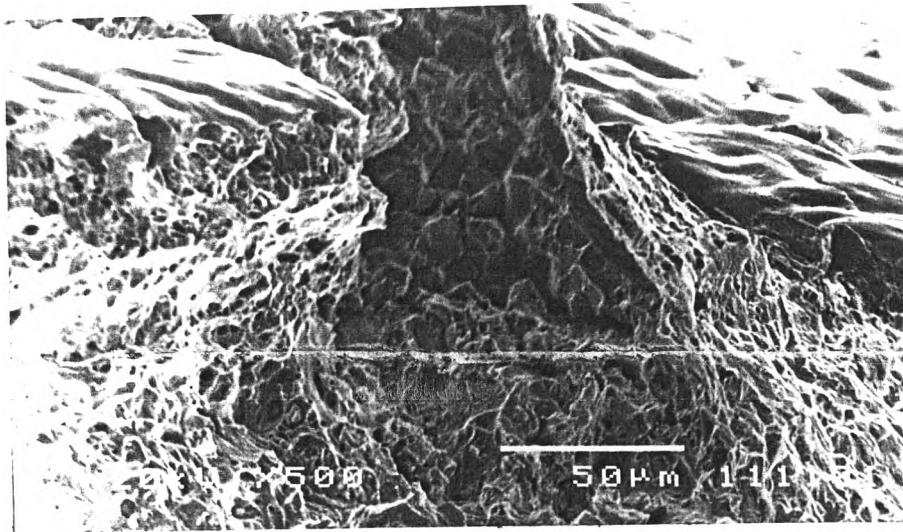


(b)

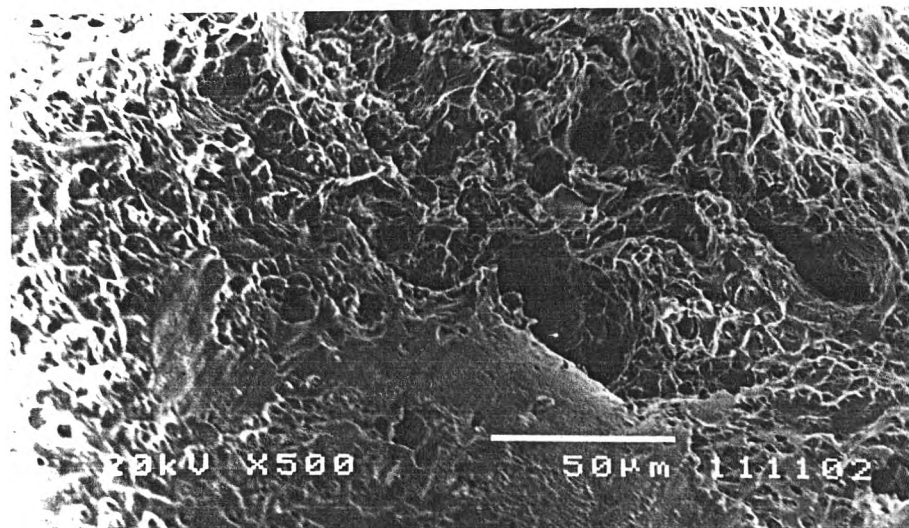


(c)

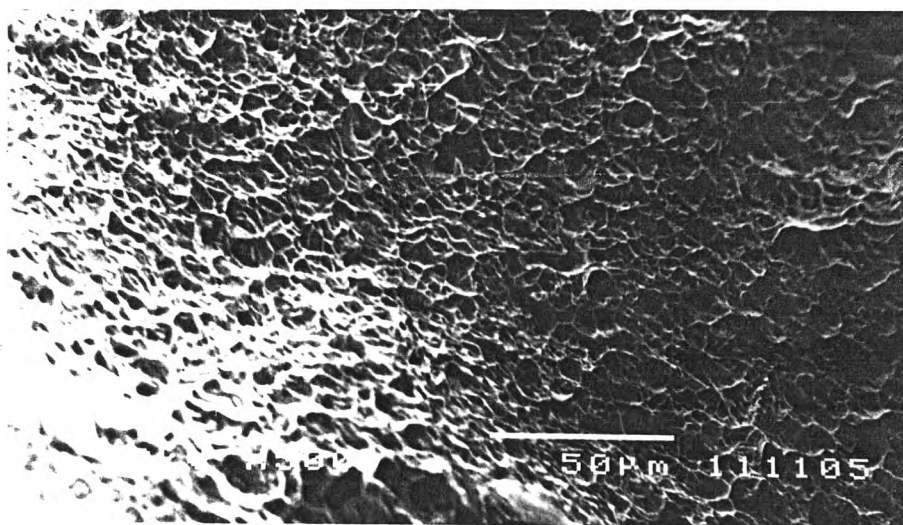
รูปที่ 4.20 ภาพแสดงพื้นผิวหน้าตัดของบริเวณที่เกิดการแตกหักที่อุณหภูมิ 650 °C ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,250 °C/1.5 ซม.
 (a) บริเวณขอบ (b) บริเวณระหว่างขอบและกึ่งกลาง (c) บริเวณกึ่งกลาง



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.21 ภาพแสดงพื้นผิวหน้าตัดของบริเวณที่เกิดการแตกหักที่อุณหภูมิ 650 °C ของชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)

(a) บริเวณขอบ (b) บริเวณระหว่างขอบและกึ่งกลาง (c) บริเวณกึ่งกลาง