

บทที่ 5

การอภิปรายผลการทดลอง

สามารถวิเคราะห์ปรากฏการณ์ต่าง ๆ ซึ่งสามารถนำมาอธิบายถึงผลที่เกิดขึ้นจากการทดลองได้ดังนี้

5.1 การที่ชิ้นงานที่ผลิตจากผงโลหะด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,250 °C และผ่านการทำ SHT แล้ว มีค่า UTS และ 0.2 % Proof Stress ที่อุณหภูมิ 650 °C สูงกว่าชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) เนื่องจาก

5.1.1 ชิ้นงานที่ผลิตจากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนจะพบคาร์ไบด์กระจายตัวเป็นจำนวนมาก ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้จะพบในโครงสร้างพื้นของชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) น้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งคาร์ไบด์ที่กระจายตัวในเนื้อโครงสร้างพื้นเช่นนี้จะเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของ Dislocation ทำให้เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ได้ความแข็งแรงที่สูงขึ้นสำหรับชิ้นงานที่ผลิตจากผงโลหะ ซึ่งสามารถอ้างอิงได้จาก Orowan Theory⁽²³⁾ ดังนี้

$$\Gamma_y = \frac{2 \alpha Gb}{\lambda} + \Gamma_a$$

เมื่อให้	G	=	Shear Modulus ของโครงสร้างพื้น
	b	=	Burgers Vector ของ Glide Dislocation
	Γ_a	=	Yield Strength ของโครงสร้างพื้นที่ปราศจาก Precipitates
	λ	=	ระยะทางที่ใกล้ที่สุดระหว่าง Obstacles
	α	=	เป็น Factor ที่ถูกคำนวณจาก "Line Tension" ของ Dislocation โดย $\alpha = T/Gb^2$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเป็นชิ้นงานที่ผลิตจากผงโลหะ ค่าที่ต่างจากชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) คือ λ จะมีค่าน้อยกว่า เนื่องจากมี Obstacles มากกว่า ทำให้ได้ค่า Γ_y ซึ่งจะให้ Yield Strength ที่สูงกว่าชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)

สาเหตุที่การกระจายตัวของคาร์โบไนด์ในโครงสร้างพื้นจะพบในชิ้นงานที่ผลิตจากผงโลหะมากกว่าชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) เพราะว่ในกระบวนการผลิตผงโลหะจะเป็นขั้นตอนแบบ Rapid Solidification คือเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในเม็ดน้ำโลหะ ทำให้เกิดสภาวะไม่สมดุล (Non-equilibrium) ขึ้นภายในเนื้อโลหะ และธาตุต่าง ๆ ยังคงเป็นการอึดตัวที่ยังยวดของสารละลายของแข็ง (Supersaturated Solid Solution) ในโครงสร้างพื้นดังรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าในโครงสร้างพื้นของผงโลหะไม่พบคาร์โบไนด์จนกว่าจะผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนจึงจะพบคาร์โบไนด์ในโครงสร้างพื้น ที่เป็นเช่นนี้สืบเนื่องจากธาตุต่าง ๆ ยังคงละลายอยู่ภายในโครงสร้างพื้นเป็นธาตุอิสระและเป็นแบบกึ่งเสถียร (Metastable) เมื่อให้พลังงานแก่ชิ้นงานระยะเวลาหนึ่งจึงทำให้ธาตุอิสระเหล่านี้เกิดการเคลื่อนที่จับตัวเป็นคาร์โบไนด์ ซึ่งจะเสถียรกว่าที่จะแยกเป็นธาตุอิสระภายในโครงสร้างพื้น นอกจากนี้ยังพบว่า การอบชุบด้วยความร้อนทำให้คาร์โบไนด์ที่ขอบเกรนเกิดการเปลี่ยนแปลงจากแถบหนาเป็นเม็ดเรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่องกัน คาดว่าเนื่องมาจากมีการแพร่ธาตุบางธาตุออกมาจากแถบคาร์โบไนด์เข้ามาในเกรน

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านแรงดึงที่อุณหภูมิสูงของชิ้นงานที่ผลิตจากกระบวนการอื่น ๆ เทียบกับกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนสามารถแสดงผลดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติของการผลิต INCONEL 718 ด้วยกระบวนการต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 650 °C

ชิ้นงานที่	Condition การผลิต	UTS (MPa)	0.2 % YS (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
1	SAE AMS 5662E	1,000	862	12	15
2	ชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)❶	796	499.8	26	34.22
3	Spray Formed + Forged 55 %	1,153 - 1,197	1,033 - 1,081	14 - 16	25 - 28
4	SPF; Aged	1,201	1,116	22	-
5	Hot Press❷	985.68	813.4	4	2.89

❶ และ ❷ จากการทดสอบจริงในงานวิจัย

จะเห็นได้ว่า การผลิตโดยใช้ผงโลหะอื่น ๆ รวมทั้งจากมาตรฐาน SAE AMS 5662E จะได้ค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าการผลิตด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน อย่างไรก็ตาม การผลิตด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนก็ยังคงให้ค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) แต่พบว่า ค่า Reduction of Area และ Elongation ลดลงมาก เนื่องจากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานมีความแตกต่างกัน

5.1.2 ขนาดเกรนที่ได้จากการอัดขึ้นรูปร้อนจะละเอียดกว่าชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 จะเห็นว่า ขนาดเกรนของชิ้นงานที่ผลิตจากผงโลหะมีขนาดประมาณ 12 μm . ทำให้ชิ้นงานที่ผลิตจากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนได้ค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) ที่มีขนาดประมาณ 15 μm . ซึ่งสามารถอ้างอิงได้จาก Hall-Petch Equation⁽²⁴⁾ ดังนี้

$$\delta_0 = \delta_i + K_D^{-1/2}$$

เมื่อ	δ_0	=	Yield Stress
	δ_i	=	Friction Stress
	K	=	Locking Parameter
	D	=	Grain Diameter

5.2 จากผลการตรวจสอบหา Precipitate Phase ทั้งในชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) และแบบที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านปรากฏว่า พบเพียง γ' เท่านั้น ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกันคือประมาณ 5 - 9 μm . ดังแสดงในรูปที่ 4.12 แต่ไม่สามารถตรวจพบ γ'' ได้เนื่องจากมีขนาดเล็กเกินกว่ากำลังขยายของกล้องที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ ซึ่งจากผลการวิจัยของ John F. Radavich and G. E. Korth⁽²⁵⁾ ได้กล่าวถึงการโตขึ้นของ γ'' ไว้คือ เมื่อทำการคองอุณหภูมิไว้ที่ 649 °C เป็นเวลานาน 1,000 และ 5,000 ชม. จะพบ γ'' ขนาด 10 และ 80 nm. ตามลำดับ และหากคองอุณหภูมิไว้ที่ 704 °C นาน 1,000 ชม. จะพบ γ'' ขนาด 30 nm. แต่สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ใช้อุณหภูมิและเวลาในการทำ SHT 720 °C/8 ชม. และ 620 °C/8 ชม. จึงคาดว่าจะทำให้ได้ γ'' ที่มีขนาดเล็กมาก

5.3 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ผลิตด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ และ/หรือ Holding Time ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของการ Sintering คือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะได้ Sintering Rate ที่สูงขึ้น เพราะ Kinetics ของการ Diffusion สูงขึ้น

5.4 จากผลของการวัดค่าความแข็งดังตารางที่ 4.5 พบว่า ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น ภายหลังการอบชุบด้วยความร้อนของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน เนื่องจากการเกิด Precipitate Phase (γ') กระจายอยู่ในเนื้อโครงสร้างพื้นดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ซึ่งโดยปกติแล้ว Precipitate Phase จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าโครงสร้างพื้น และ Precipitate Phase นี้เป็น Coherence Phase กับโครงสร้างพื้น

5.5 จากผลการทดลองเรื่องการกระจายตัวของรูพรุนตลอดชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,225 °C และ 1,250 °C ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าจำนวนของรูพรุนที่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงานจะมีมากกว่าบริเวณขอบชิ้นงาน เนื่องจากบริเวณขอบชิ้นงาน นอกจากจะมีแรงเนื่องจากแรงดันที่กดลงมาแล้ว ยังมีแรงเสียดทานจากผิวของแม่พิมพ์เข้ามาเสริมด้วย และพบว่าจำนวนรูพรุนที่บริเวณภายในชิ้นงานจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะห่างจากหัวกดเพิ่มขึ้น และสามารถอิงได้จาก Thomson Model⁽²⁶⁾ ซึ่งเป็นสมการที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่กระจายตัว ณ จุดต่างๆ ใน Powder Compact เมื่อให้ความดันกระทำต่อชิ้นงาน โดยที่ความดันในการอัดนี้จะมีผลต่อปริมาณรูพรุนที่กระจายตัวอยู่ในชิ้นงานในลักษณะที่แปรผกผันกัน กล่าวคือ จะพบว่าในบริเวณที่มีความดันสูงจะมีรูพรุนน้อย และในบริเวณที่มีความดันต่ำจะมีรูพรุนมาก ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sigma_z/P_0 = ((2-C/P_0) \cdot r^2/R^2) \cdot e^{(-8\alpha\mu \cdot L/D) \cdot (1-(z/l))} + ((C/P_0) \cdot (1 - r^2/R^2))$$

โดยที่ σ_z = Axial Normal Compaction Stress (MPa)

α = Fluidity ของ Powder

R = Compact Radius (m.)

r = Radial Distance from the Compact Axis (m.)

μ = Powder/Die Wall Coefficient of Friction

L = Compact Length (m.)

D = Compact Diameter (m.)

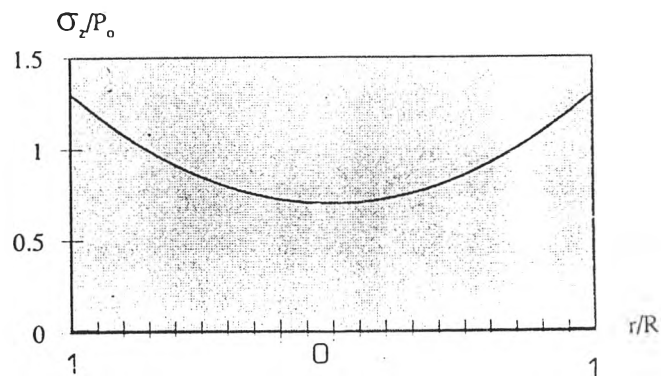
C = Compact Centerline Pressure (MPa)

P_0 = Average Compaction Pressure at the Punch Face ; $F/\pi R^2$ (MPa)

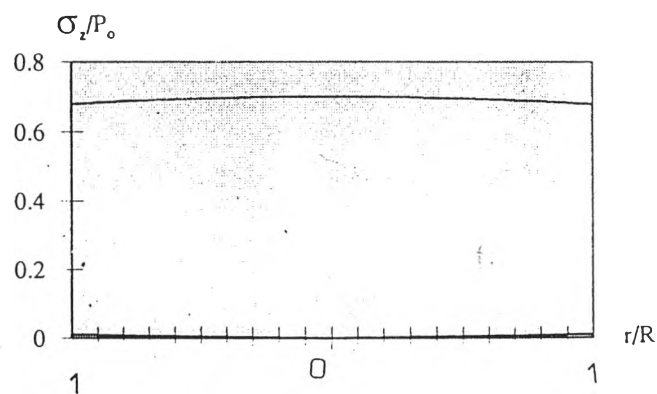
ทำให้บริเวณที่เกิดแรงกระทำมากกว่าเกิดอัตราการ Sintering สูงกว่า ทำให้ได้ความหนาแน่นที่สูงกว่าด้วย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังแผนภูมิที่ 5.1 - 5.3 เมื่อให้ $L/D = 3.25$ และการกระจายตัวของรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,225 และ 1,250 °C มีความแตกต่างกัน ซึ่งสาเหตุเหล่านี้สามารถกล่าวได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.5.1 ในกรณีชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 1,225 °C/1 ซม. จะได้ผลการกระจายตัวของความดันดังรูปที่ 5.1 - 5.3 ซึ่งผลที่ได้นี้จะสอดคล้องกับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.13 สืบเนื่องมาจากการ Sintering ที่ไม่สมบูรณ์ เพราะฉะนั้นลักษณะของ Compact จึงยังคงมีลักษณะคล้ายผงโลหะอยู่ ซึ่งอาจสมมติค่า $\mu = 0.2$ และ $\alpha = 0.25$ ถ้านำค่าเหล่านี้ไปใส่ในสมการของ Thompson Model จะได้แผนภูมิของการกระจายตัวของความดัน ณ จุดต่างๆ ดังรูปที่ 5.1 - 5.3 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

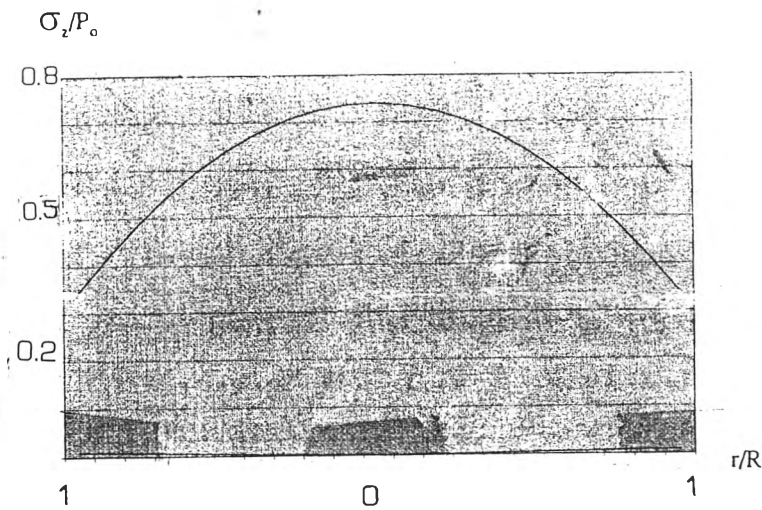
- รูปที่ 5.1 แสดงบริเวณส่วนบนของชิ้นงาน ซึ่งจะเห็นได้ว่าความดันที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานจะมีค่าน้อยกว่าที่บริเวณขอบชิ้นงาน ทำให้พบรูพรุนที่กึ่งกลางชิ้นงาน มากกว่าที่บริเวณขอบชิ้นงาน
- รูปที่ 5.2 แสดงบริเวณกลางชิ้นงาน ซึ่งความดัน ณ จุดต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันทำให้มีจำนวนรูพรุนใกล้เคียงกัน
- รูปที่ 5.3 แสดงบริเวณส่วนล่างของชิ้นงาน ซึ่งความดันที่บริเวณ กึ่งกลางจะมากกว่าบริเวณขอบชิ้นงาน ทำให้พบรูพรุนที่บริเวณขอบชิ้นงานมากกว่า



รูปที่ 5.1 แสดงการกระจายตัวของความดัน ณ จุดต่างๆ ที่บริเวณส่วนบนชิ้นงาน ($Z = L$)



รูปที่ 5.2 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของความดัน ณ จุดต่างๆ ที่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน ($Z = L/2$)



รูปที่ 5.3 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของความดัน ณ จุดต่าง ๆ ที่บริเวณส่วนล่างของชิ้นงาน ($Z = 0$)

5.5.2 ในกรณีชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ $1,250\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{ ซม.}$ พิจารณาได้ว่าเนื่องจากผงเกิดการ Sintering ที่สมบูรณ์ เพราะฉะนั้นจึงมีความหนาแน่นสูงมาก จึงมีพฤติกรรมการอัด (Compact Behavior) คล้ายของแข็ง ซึ่งจะมีค่าของ α เข้าใกล้ 0 และจะทำให้ค่าของ $-8\alpha\mu L/D$ เข้าใกล้ 0 ด้วย รวมถึงทำให้ค่า C/P_0 มีค่าเข้าสู่ 1 จึงสามารถเขียนสมการ Thompson Model ได้เป็น $\sigma_2/P_0 = 1$ แสดงให้เห็นว่า ค่าการกระจายตัวของความดันไม่ขึ้นอยู่กับค่า r และ Z จึงกล่าวได้ว่าตลอดชิ้นงานจะได้รับความดันเท่ากันตลอดทุกจุด ซึ่งผลที่ได้นี้จะสอดคล้องกับผลการทดลองดังรูปที่ 4.14

5.6 สาเหตุการแตกหักแบบเปราะของชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเนื่องจากในโครงสร้างพื้นมีการกระจายตัวของคาร์ไบด์ซึ่งพบน้อยมากในโครงสร้างพื้นของชิ้นงานจากบริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) และอาจเกิดจากความแตกต่างของ γ' และ γ'' ซึ่งไม่ได้ทำการวิเคราะห์รายละเอียดในการวิจัยครั้งนี้