หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

2.1 ความรู้พื้นฐานของ INCONEL 718

INCONEL 718 เป็นนิกเกิลเบสซุปเปอร์อัลลอยด์อีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอากาศยาน ซึ่งมีส่วนผสมดังตารางที่ 2.1 และมีคุณสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของ INCONEL 718 [9]

Element	Ni	Cr	Fe	Co	Mo	Nb	Ti	Al	C	Mn	Si	B	Cu
wt %	50 - 55	17 - 21	19	1	2.8 - 3.3	4.7 - 5.5	0.65 - 1.15	0.2 - 0.8	0.08	0.35	0.35	0.006	0.3

ตารางที่ 2.2 ค่าคุณสมบัติทางกายภาพของ INCONEL 718 [9]

Density (g/cm^3)	Melting Point/Range (°C)	Specific Heat (J/Kg.K)	Average Coefficient of Thermal Expansion (μm/m.K)	Thermal Conductivity (w/m.K)	Electrical Resistivity (nΩ.m)
8.19	1,260 - 1,336	435	14.06	13.50	1,148

จากตารางที่ 2.1 สามารถกล่าวได้ว่าธาตุต่าง ๆ ที่ผสมใน INCONEL 718 มีผลต่อคุณสมบัติดังต่อไปนี้

นิกเกิล — เป็นส่วนของโครงสร้างพื้น ทำให้เกิด FCC Austenite เป็น Base ที่ทนความร้อน

โครเมียม — เพิ่มการต้านการเกิดสนิมและการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง โดยที่โครเมียมจะทำให้เกิด Protective Oxide (Cr_2O_3) ขึ้น นอกจากนั้นโครเมียมยังเป็นธาตุที่ก่อให้เกิด Solid Solution Hardening ซึ่งจะทำให้ซุปเปอร์อัลลอยด์มีความแข็งแรงมากขึ้น และโครเมียมนี้ยังก่อให้เกิดพวกคาร์ไบด์ที่ขอบเกรน ทำให้เกิดความแข็งแรงที่ขอบเกรน

อลูมิเนียม — เพิ่มความต้านทานการเกิดสนิมเนื่องจากอลูมิเนียมจะก่อตัวเป็น Protective Oxide (Al_2O_3) หากมีอยู่มากเกินไปจะทำให้เกิด Oxide Film และ Segregation ทำให้การขึ้นรูปทำได้ยาก

ไททาเนียม	เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง ถ้ามีมากเกินไปจะมีผลเช่นเดียวกับอลูมิเนียม
โมลิบดินั่ม	ธาตุนี้ทำให้เกิด Solid Solution และก่อให้เกิดคาร์ไบด์ขึ้นที่ขอบเกรนทำให้ความแข็งแรงของซุปเปอร์อัลลอยด์ดีขึ้น
ไนโอเบียม	ทำให้เกิดการก่อตัวของ Precipitate Phase ได้แก่ γ' และ γ'' ใน INCONEL 718 ซึ่งจะทำให้แข็งแรงขึ้น
เหล็ก	ช่วยทำให้โครงสร้างพื้นเป็น FCC Austenetic และช่วยเพิ่มความหนาแน่น
คาร์บอน	เป็นส่วนประกอบของคาร์ไบด์ โดยการก่อตัวของโครเมียม โมลิบดินั่ม และไททาเนียม สำหรับใน INCONEL 718 จะก่อตัวเป็น Mc และ M_6C
โคบอลต์	ช่วยเพิ่ม γ' Solvus Temperature และปรับปรุง Temperature Capability
ซิลิกอนและซัลเฟอร์	มีประโยชน์ในกระบวนการหล่อ ทำให้หล่อได้ง่าย แต่ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้เกิดการแตกหักแบบเปราะ

เมื่อผสมธาตุประกอบต่าง ๆ อย่างเหมาะสมตามสัดส่วน จนกระทั่งได้วัสดุที่เป็นนิกเกิลเบสซุปเปอร์อัลลอยด์เกรด INCONEL 718 แล้ว พบว่า INCONEL 718 มีคุณสมบัติที่สำคัญคือ ไม่เหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Nonmagnetic) มีความต้านทานการเกิดสนิมและการกัดกร่อน สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงในช่วง -217 ถึง 700 °C เนื่องจาก Dislocation จะเคลื่อนที่ผ่านผิวสัมผัสของ γ'/γ ได้ยาก ซึ่ง γ' และ γ'' จะเกิดขึ้นในโครงสร้างพื้นของอัลลอยด์ 718 ที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนใน Standard Precipitation Strengthening Condition[3]

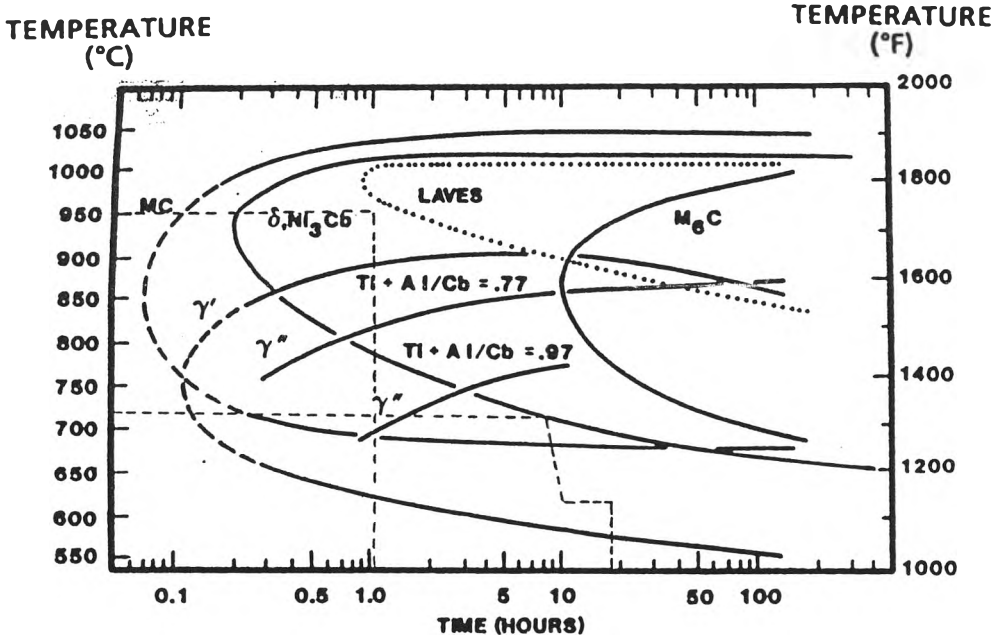
เมื่อทำ SHT แล้ว γ' ซึ่งมีส่วนประกอบคือ Ni_3Nb และมีโครงสร้างแบบ Order FCC จะพบในขนาด 7.5 - 30 nm. และจะพบทั้งแบบกลม (Spherical) และแบบแผ่นกลม (Disklike)[10] นอกจากนี้ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงของ INCONEL 718 ยังเกิดจาก Solid Solution และการ Precipitate ของ γ'' ซึ่งมีส่วนประกอบคือ Ni_3Nb ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบ Order BCT เพราะ γ'' จะเกิด Coherent กับโครงสร้างพื้น และมี Coherent Strains มากกว่า γ' มีผลให้ γ'' มี Coherency Strain Field รอบตัวสูงกว่า γ' ดังนั้น γ'' จึงเป็น Precipitate ที่ให้ความแข็งแรงหลักใน INCONEL 718

การเกิดคาร์ไบด์ตามขอบเกรนมีความสำคัญต่อความแข็งแรงของ INCONEL 718 โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดและรูปร่าง รวมทั้งการกระจายตัวของคาร์ไบด์ด้วย หากรูปร่างของคาร์ไบด์เป็นแบบก้อน (Blockly) และมีการกระจายตัวแบบไม่ต่อเนื่องที่ขอบเกรน จึงมีประโยชน์ในการต้านการเลื่อนของขอบเกรน ซึ่งใน INCONEL 718 จะพบคาร์ไบด์ 2 ชนิด คือ MC และ M_6C โดยที่ MC จะพบทั้งแบบทรงกลมและแบบไม่มีรูปทรงที่แน่นอนที่ขอบเกรน ส่วน M_6C จะพบเป็นคาร์ไบด์ที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (Randomly Distrubuted Carbide)

โดยทั่วไปแล้ว การผสมธาตุต่าง ๆ เข้าด้วยกันก็เพื่อจะทำให้วัสดุมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ สำหรับการที่จะปรับปรุงค่าความแข็งแรงทางกลของซุปเปอร์อัลลอยด์นั้น สามารถกำหนดได้โดยปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้คือ

1. ควบคุมจำนวนและขนาดของ Precipitate Hardening คือ γ' และ γ''
2. ควบคุมการกระจายตัว, รูปร่าง และขนาดของคาร์ไบด์

การเกิดเฟสต่าง ๆ เหล่านี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากการอบซุบด้วยความร้อน และในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน โดยทั่วไปการอบซุบด้วยความร้อนก็เพื่อทำให้เกิดเฟสที่มีคุณประโยชน์ทางกลขึ้น สำหรับการอบซุบด้วยความร้อนของ INCONEL 718 จะมีหลายแบบ ที่นิยมใช้คือ AMS 5597A[11] AMS 5596C[11] รวมทั้ง AMS 5662E[12] และ AMS 5663D[13] ในทางการค้าการอบซุบด้วยความร้อนโดยทั่ว ๆ ไปมักจะใช้ขั้นตอนดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 TTP Diagram แสดงการอบซุบด้วยความร้อนของ INCONEL 718 แบบ Hot-Rolled Bar[14]

2.2 ผลของความดันต่ออัตราการ Sintering (หรือ Densification)[15]

ความดันมีผลต่อการจัดเรียงตัวของผงและ Plastic Flow ในการ Sintering นอกจากนี้ ประโยชน์ที่ได้รับจากการให้ความดันคือ การเพิ่มอัตราการ Sintering และลดเวลาที่ใช้ในการ Sintering ลงได้มาก ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลของความดันที่ทำกับอัตราการเคลื่อนที่ของ Closed Pore ในระยะสุดท้ายของ Densification ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการสำหรับ Normal Sintering ได้ดังต่อไปนี้

❶ สำหรับการ Sintering

$$(dD/dt)_S = 3/2(4\pi/3)^{1/3}(\gamma/\eta \cdot n^{1/3})(1-D)^{2/3} D^{1/3} - (3\sqrt{2}/4)(T_c/\eta)(1-D) \cdot \ln 1/(1-D)$$

❷ สำหรับกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

$$(dD/dt)_{HP} = 3/2(4\pi/3)^{1/3}(\gamma/\eta)(n^{1/3})(1-D)^{2/3}D^{1/3} - (3\sqrt{2}/4)(T_c/\eta)(1-D)(\ln 1/(1-D)+(3/4)P/\eta(1-D)$$

ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{(dD/dt)_{HP}}{(dD/dt)_S} = \text{Constant} * P$$

เมื่อ
- D = ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density) ที่เวลา t
- γ = แรงตึงผิว (Surface Tension) ของวัสดุ (Dynes/cm.)
- n = จำนวนของรูต่อลูกบาศก์เซนติเมตรของ Solid Material
- η = ความหนืดที่ Infinite Rate of Shear (Poises)
- a = $\sqrt{2}\,(3/4)^{1/3}\,T_c/2\gamma\eta^{1/3}$
- T_c = Yield Stress
- $(dD/dt)_{HP}$ = ค่าความหนาแน่นเทียบกับเวลาสำหรับชิ้นงานที่ผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน
- $(dD/dt)_S$ = ค่าความหนาแน่นเทียบกับเวลาสำหรับชิ้นงานที่ผลิตแบบ Sintering
- P = ความดัน (Dynes/cm.^{2})

จากสมการข้างต้นจะพบว่า ความดันมีผลต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นที่ได้จากการผลิตโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเทียบกับการผลิตแบบ Sintering เมื่อให้เงื่อนไขต่าง ๆ มีค่าเท่ากัน

2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการขึ้นรูป INCONEL 718

INCONEL 718 เป็นอัลลอยด์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางจึงได้มีการทดลองหาคุณสมบัติที่อุณหภูมิสูงของอัลลอยด์ชนิดนี้ โดย M. S. Lewandowski, et al.[16] ทำการทดสอบ INCONEL 718 แบบ Cast โดยใช้ Hot Compressing Testing ที่อุณหภูมิ 950 °C 1,000 °C และ 1,050 °C โดยใช้ Strain Rates ต่าง ๆ พบว่า เมื่อเพิ่ม Strain Rates และลดอุณหภูมิ จะได้ Flow Stress เพิ่มขึ้น และ The Engineering Resource for Advancing Mobility ได้แสดงผลของคุณสมบัติแรงดึง[12] ที่อุณหภูมิ 650 °C ของ INCONEL 718 แบบ Wrought ที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนได้ผลดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าการทดสอบคุณสมบัติแรงดึงที่อุณหภูมิ 650 °C ของ INCONEL 718 แบบ Wrought[12]

Specimen Orientation	Tensile Strength (MPa, min)	Yield Strength at 0.2 % Offset (MPa, min)	Elongation in 4D (%, min)	Reduction of Area (%, min)
Longitudinal	1,000	862	12	15
Long-Transverse (Forgings)	965	862	10	12
Transverse (Bars)	965	862	6	8

เมื่อมีความต้องการที่จะปรับปรุงคุณภาพของ INCONEL 718 จึงได้มีการคิดค้นกรรมวิธีการผลิตแบบต่าง ๆ ขึ้น ซึ่ง M. G. Benz, et al.[17] ทำการทดลองพ่นหยด INCONEL 718 หลอมเหลวไปเกาะที่ตัว Collector ทำเป็น Preform แล้วนำไปทำการอบชุบด้วยความร้อน เมื่อทำการทดสอบหาคุณสมบัติแรงดึงของอัลลอยด์ 718 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วย Spray Formed + Forged 55 % ได้ผลดังตารางที่ 2.4 รวมทั้งศึกษาพบว่า วิธีการ Spray Forming ยังให้ค่าความพรุนที่ต่ำ และปราศจาก Ceramic Inclusions และ Uniform Grain Size อีกด้วย

ตารางที่ 2.4 Mechanical Properties Observed for Alloy 718 Spray Formed + Forged 55 %[17]

Property	Room Temperature	650 °C
Tensile		
0.2 % YS, MPa (ksi)	1,292 - 1,342 (190 - 198)	1,033 - 1,081 (152 - 159)
UTS, MPa (ksi)	1,434 - 1,475 (211 - 217)	1,153 - 1,197 (174 - 176)
Elongation, (%)	11 - 13	14 - 16
RA, (%)	20 - 22	25 - 28

Gaylord D. Smith and H. Lee Flower[6] ทำการศึกษาคุณสมบัติแรงดึงของอัลลอยด์ 718 ที่ผ่านการผลิตแบบ Superplastic Forming (SPF) ซึ่งมีคุณสมบัติไม่เกิดการเพิ่มขนาดของเกรนที่อุณหภูมิสูง โดยผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 649 °C พบว่า 718 SPF จะมีค่า 0.2 % YS และ UTS 1,116 และ 1,201 MPa ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดของเกรนจะมีขนาด ASTM#10 หรือละเอียดกว่า

การใช้เทคโนโลยีโลหะผงมีข้อดีคือ มีโครงสร้างที่ละเอียด มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง และมีความเป็นรูปแบบเดียวกันสูง จึงมีผู้สนใจผลิตชิ้นงานด้วยการใช้เทคโนโลยีโลหะผง ดังเช่น

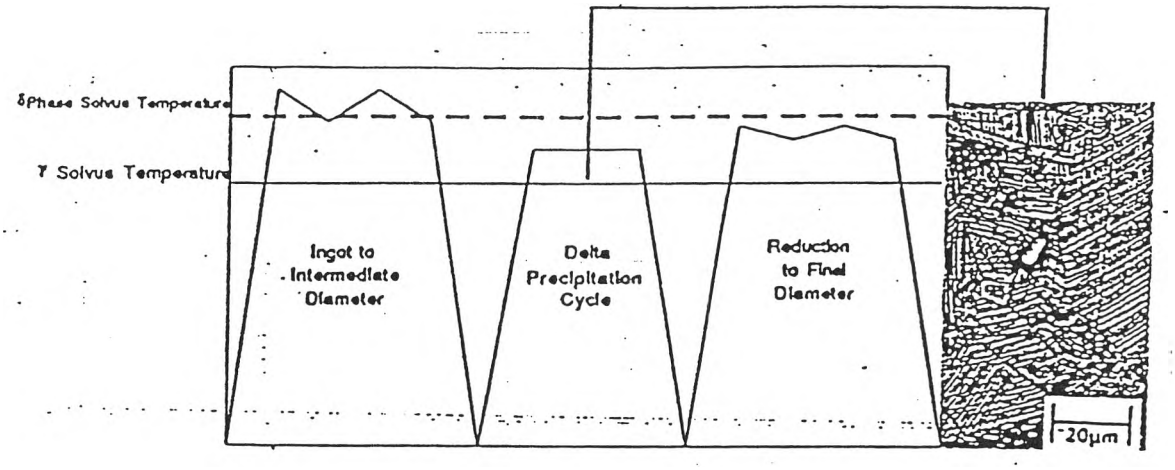
J. J. Valencia, et al.[7] ทำการทดสอบการขึ้นรูป INCONEL 718 โดยใช้ผงโลหะที่ผ่านการทำ Powder Injection Molding แล้วทำการ Sintering ในเตาสุญญากาศ และในเตาบรรยากาศไฮโดรเจน จากนั้นนำชิ้นงานมาทำการทดสอบคุณสมบัติแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง ปรากฏว่า 0.2 % YS, UTS และ Ductility ที่ได้รับจากกระบวนการนี้ที่ 1,275 °C จะให้ค่าที่ดีที่สุดคือ 972 MPa 1,119 MPa และ 17.4 % ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 1,250 °C จะให้ค่า UTS สูงที่สุดคือ 1,218 MPa โดยมี 0.2 % YS และ Ductility น้อยกว่าที่ 1,275 °C คือ 963 MPa และ 11.3 % ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบอีกว่า การ Sintering ในสุญญากาศให้ความหนาแน่นสูงกว่าในบรรยากาศไฮโดรเจนและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและ Holding Times ของการ Sintering ก็จะได้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเช่นกัน

C. G. Goetzel[8] ทำการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดความหนา 0.2 นิ้ว และ Dia = 0.25 นิ้ว จากผงโลหะด้วยกระบวนการ Spark Sintering ในบรรยากาศอาร์กอน โดยใช้กระแสไฟฟ้าผ่านแท่งกราไฟต์เพื่อให้เกิดความร้อน 2,100 °F ถึง 2,250 °F ภายใต้ความดัน 500 - 2500 psi (3 - 17 MPa) เป็นระยะเวลา 450 ถึง 600 วินาที แล้วนำมาทำการอบชุบด้วยความร้อน พบว่า โครงสร้างเกรนของชิ้นงานมีความเป็นรูปแบบเดียวกันและพบ γ' ที่ละเอียดมาก และความหนาแน่นมากกว่า 99 % ของความหนาแน่นตามทฤษฎี สามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำวิจัยครั้งนี้อยู่ในช่วง 2,200 - 2,220 °F (1,190 - 1,210 °C) และเนื่องจากใช้เวลาน้อยจึงไม่พบการโตขึ้นของเกรน (Grain Coarsening) และสำหรับผงที่มีรูปร่างไม่แน่นอนแล้วผงที่เล็กกว่าจะให้ผลผลิตที่ดีที่สุด

นอกจากมีความพยายามพัฒนารูปแบบการขึ้นรูป INCONEL 718 เพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงสูงขึ้นแล้ว ยังมีความพยายามเปลี่ยนกรรมวิธีการอบชุบด้วยความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงอีกด้วย ดังเช่น

J. Benson, et al.[18] ศึกษา INCONEL 718 แบบ Wrought ที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนในเตาสุญญากาศ แล้วทำการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 650 °C เปรียบเทียบกับแบบ As-Received จะได้คุณสมบัติแรงดึงที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนดีกว่าแบบ As-Received

Carlos Ruiy, et al.[5] ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมทางกลของ INCONEL 718 ที่ใช้กรรมวิธีการอบชุบด้วยความร้อนแบบ Delta Process (DP) ในการผลิต Billet และ Bar ให้มี Uniform Fine Grain ซึ่งมีการอบชุบด้วยความร้อนดังรูปที่ 2.2 ทำให้เกิด Delta Phase Precipitate และทำการทดสอบคุณสมบัติแรงดึงที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า DP 718 มีค่า UTS สูงกว่า INCONEL 718 ทั่ว ๆ ไปประมาณ 4 % ซึ่งสามารถนำไปผลิต Bar Stock ให้มีความแข็งแรงสูง



รูปที่ 2.2 Graphical Repersentation of the Delta Process

M. Chang, et al.[19] ทำการทดลองเปลี่ยนเงื่อนไขการอบชุบด้วยความร้อนดังตารางที่ 2.5 เพื่อทำการทดสอบ INCONEL แบบแท่งและแบบแผ่น พบว่า ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนแบบโมดิฟายด์ (Modified Heat Treatment : MHT) มีค่าน้อยกว่าการอบชุบด้วยความร้อนแบบมาตรฐาน (Standard Heat Treatment : SHT) ดังตารางที่ 2.6 นอกจากนี้ยังพบว่า การทำ MHT ทำให้เกิดการโตขึ้นของเกรน (Coarser Grain Size) เมื่อเทียบกับการทำ SHT ทำให้ทราบว่าจนกระทั่งปัจจุบันนี้การทำ SHT ยังคงเป็นการอบชุบด้วยความร้อนที่เหมาะสมสำหรับ INCONEL 718

ตารางที่ 2.5 Heat Treatment Schedules Used on Experimental Alloy 718 Materials

Heat Treatment	Heat Treatment Schedule	Average Grain Size ASTM #	Grain Boundary Morphology
SHT	955 °C/1 hr./AC + 718 °C/8 hr./FC ⟶ 1 °C/min. ⟶ 621 °C/8 hr./AC	8 (Plate) 10 (Bar)	Planar
MHT	1,032 °C/1 hr./FC ⟶ 3 °C/min. ⟶ 843 °C/4hr./AC + 926 °C/1 hr./FC ⟶ 3 °C/min. ⟶ 718 °C/8 hr./FC ⟶ 1.6 °C/min. ⟶ 621 °C/8 hr./AC	4 (Plate) 3 (Bar)	Serated

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางกลของอัลลอยด์ 718 ซึ่งผ่านกระบวนการอบชุบด้วยความร้อนที่ต่างกัน

Temperature		Hardness (Rc)	σ_{ys} (MPa)	E (MPa)
RT	SHT	46.5	1,204	198 x 10^3
	MHT	44.5	1,036	199 x 10^3
525 °C	SHT		1,066	173 x 10^3
	MHT		876	172 x 10^3
650 °C [3]	SHT		970	168 x 10^3
	MHT		827	168 x 10^3

กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเป็นการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคนิคเทคโนโลยีโลหะผงอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในวัสดุจำพวกเซรามิกและวัสดุทนความร้อน (Refractory Material) หลายชนิด เช่น การขึ้นรูป Titanium Aluminides[20] ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าการทำ Sintering ในการขึ้นรูป รวมถึงขนาดของเกรนจะมีขนาดเล็กกว่า และความแข็งแรงของชิ้นงานจะสูงกว่าการทำ Sintering แบบธรรมดา[21] อุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูปสำหรับกระบวนการนี้สามารถใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 0.5 Tm ถึง 0.8 Tm[22]

จึงสามารถกล่าวได้ว่า กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเป็นกระบวนการที่น่าจะสามารถนำไปใช้ผลิต INCONEL 718 เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ ประกอบกับค่าใช้จ่ายในการผลิตด้วยกระบวนการนี้จะต่ำกว่ากระบวนการ Hot Isostatic Pressing (HIP) และคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพดีกว่าการ Sintering แบบธรรมดา จึงเป็นเหตุจูงใจให้เกิดการศึกษาเพื่อใช้เป็นข้อมูลทางเทคนิคเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต