บทที่ 4
สรุปและข้อแสนอแนะ

4.1 สรุป

4.1.1 อิทธิพลของความดันในการขึ้นรูปชิ้นงาน

การเพิ่มความดันในการขึ้นรูปชิ้นงานช่วยให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคแน่นขึ้น ทำให้การนำความร้อนดีขึ้น ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ของปฏิกิริยาระหว่างนิกเกิลกับไทเทเนียมสูงขึ้นส่งผลให้สมบัติของชิ้นงาน เช่น ความแข็งแรงกดมีค่าสูงแต่ความเครียดมีค่าต่ำ (ภายในชิ้นงานเกิดเป็นรูพรุนทั่วทั้งชิ้น) เมื่อทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่ได้ลดลง ขนาดรูพรุนที่ได้เล็กลง ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เฟส NiTi ลดลง เฟส Ni_4Ti_3 เพิ่มขึ้น ส่วนเฟส $NiTi_2$ เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

4.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิในการอุ่น

การเพิ่มอุณหภูมิในการอุ่นทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้เพิ่มขึ้นด้วย การเพิ่มอุณหภูมิในการอุ่นส่งผลให้ ความเร็วของการเกิดคลื่นความร้อนสูงขึ้น ทำให้ร่อง (Channel) เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการเรียงตัวที่ตั้งฉากกับทิศทางการเกิดคลื่นความร้อนที่อุณหภูมิต่ำไปเป็นการเรียงตัวที่ขนานกับทิศทางการเกิดคลื่นความร้อนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนลดลง ขนาดรูพรุนที่ได้เล็กลง ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงกดที่ได้มีค่าสูงแต่ความเครียดมีค่าต่ำ เฟส NiTi ลดลง เฟส Ni_4Ti_3 เพิ่มขึ้น ส่วนเฟส $NiTi_2$ เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

4.1.3 อิทธิพลของความดันก๊าซอาร์กอน

สำหรับการทดลองนี้ ความดันก๊าซอาร์กอนไม่มีผลต่อสมบัติของชิ้นงาน แต่การเพิ่มความดันก๊าซอาร์กอนทำให้การจุดระเบิดของชิ้นงานเกิดได้เร็วขึ้น จากการทดลองถ้าใช้ความดันในการขึ้นรูปชิ้นงาน 8MPa สมบัติทางกลของชิ้นงานคือการรับแรงอัดไม่ดี โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงกดและเปอร์เซ็นต์ความเครียดที่ได้ต่ำมาก เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนในชิ้นงานมากเกินไป ในทางกลับกันถ้าใช้ความดันในการขึ้นรูปชิ้นงานสูงเกินไป(64MPa) จะทำให้สมบัติทางกลของชิ้นงานคือการรับแรงอัดมีขนาดสูงเกินไป ซึ่งไม่เหมาะสำหรับนำมาทำเป็นกระดูกเทียม จากงานวิจัยนี้พบว่าชิ้นงานที่มีสมบัติใกล้เคียงกับกระดูกมนุษย์มากที่สุดคือ ชิ้นงานที่ใช้ความดันในการขึ้นรูป 16MPa

เนื่องจากความดันก๊าซอาร์กอนระหว่าง 138 kPa และ 201 kPa ให้ผลการทดลองที่ไม่ต่างกันจึงเลือกที่ 138 kPa เพราะจะประหยัดก๊าซได้มากกว่า จากการทดลองอุณหภูมิการอุ่นที่

เหมาะสมคือ 250°C จะได้สมบัติต่างๆดังนี้ ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน 46.5% อุณหภูมิการเผาไหม้ 796°C ค่าความแข็ง 461HV ค่าความแข็งแรงกด 242MPa ค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียด 9.78% ขนาดรูพรุน 432 μm

4.1.4 สมบัติการจำรูปของชิ้นงาน

เพื่อปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานหลังจากกระบวนการ SHS โดยเฉพาะการทำให้อุณหภูมิการเกิดโครงสร้างออสเทนไนต์เริ่มต้น (A_s) ออสเทนไนต์สิ้นสุด (A_f) มาร์เทนไซต์เริ่มต้น (M_s) และมาร์เทนไซต์สิ้นสุด (M_f) อยู่ในช่วงที่เหมาะกับการนำไปใช้ในร่างกาย โดยการนำชิ้นงานมาผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังจากนั้นวิเคราะห์ผลด้วย Differential scanning calorimeter (DSC) สรุปดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสหลังจาก SHS และหลังจากกระบวนการทางความร้อน

Condition	Cooling (°C)		(J/g)	Heating (°C)		(J/g)
	M_s	M_f	ΔH	A_s	A_f	ΔH
After SHS	-	-	-	116.9	161.5	6.5
After solution treatment and Aging	10.3	-24.5	-3.1	31.2	46.1	5.8
อุณหภูมิที่ใช้ในร่างกาย*	-	>5	-	-	< 37	-

*http://herkules.oulu.fi/

การสังเคราะห์ด้วยวิธี SHS นั้นเป็นเรื่องธรรมดาสำหรับการเกิดเกิดเฟสที่หลากหลาย เนื่องจากโอกาสที่นิกเกิลจะจับกับไทเทเนียมแบบหนึ่งต่อหนึ่งขณะทำการบดผสมมีโอกาสน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการจับตัวแบบอื่น หรือขนาดอนุภาคของสารตั้งต้นที่แตกต่างกันมาก ทำให้สัดส่วนการผสมไม่เป็นอัตราส่วนหนึ่งต่อหนึ่ง จากการทดลองพบเฟสที่เกิดดังนี้ NiTi (B2) NiTi(B19') Ni_4Ti_3 และ $NiTi_2$ หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนพบว่าเฟส NiTi และ Ni_4Ti_3 ลดลง เฟส $NiTi_2$ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนเฟส Ni_3Ti เกิดที่อุณหภูมิสูงมาจากการสลายตัวของ Ni_4Ti_3, NiTi และ TiO เป็นเฟสที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน

4.2 ข้อเสนอแนะ

4.2.1 ขั้นตอนการบดผสมและการเตรียมชิ้นงาน

4.2.1.1 ในขั้นตอนการบดผสมระหว่างนิกเกิลกับไทเทเนียมจะต้องใส่ Stearic acid เพื่อป้องกันผงโลหะติดหม้อบดและผงโลหะติดไฟขณะทำการบด

4.2.1.2 เมื่อเตรียมชิ้นงานเสร็จแล้ว ควรเก็บชิ้นงานในหม้อดูดความชื้น เพื่อป้องกันไอน้ำมาเกาะที่ผิวชิ้นงาน ทุกขั้นตอนควรอยู่ในระบบปิดหรือบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน

4.2.2 ขั้นตอนการ SHS

4.2.2.1 จะต้องตรวจสอบยางกันรั่ว (O-ring seal) ที่อยู่ในหม้อทำปฏิกิริยาอยู่ตลอด เพื่อป้องกันก๊าซออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับชิ้นงานขณะทำการจุดระเบิด

4.2.2.2 ขณะเกิดปฏิกิริยาไม่ควรมองด้วยตาเปล่า ควรมองผ่านหน้ากากเชื่อม เพราะความสว่างที่เปล่งออกมาขณะเกิดปฏิกิริยาอาจทำให้เป็นอันตรายแก่สายตาได้

4.2.2.3 การวัดอุณหภูมิการเผาไหม้ขณะเกิดปฏิกิริยาระหว่างนิกเกิลกับไทเทเนียม ควรใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด R (Fin-wire thermocouple, Pt/Pt-13%Rh) ฝังเข้าไปในเนื้อชิ้นงาน เพื่อให้การวัดอุณหภูมิการเผาไหม้ขณะเกิดปฏิกิริยามีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น นอกจากนี้เทอร์โมคัปเปิลชนิด R มีความไวในการตอบสนองดีกว่าชนิด K

4.2.3 แนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต

4.2.3.1 ศึกษาวิธีการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนคืออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ซึ่งเป็นการปรับสภาพเพื่อให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิการเกิดโครงสร้างออสเทนไนต์เริ่มต้น (A_s) ออสเทนไนต์สิ้นสุด (A_f) มาร์เทนไซต์เริ่มต้น (M_s) และมาร์เทนไซต์สิ้นสุด (M_f) อยู่ในช่วงการทำงานภายในร่างกาย

4.2.3.2 ศึกษาวิธีการฝึกสอน (Training) โลหะจำรูปแบบความจำทิศทางเดียว ให้มีความจำเพิ่มขึ้น โดยกระบวนการฝึกสอนให้โลหะจำรูปมีความจำแบบสองทิศทาง ซึ่งเป็นกระบวนการเชิงกล-ความร้อน (Thermo-mechanical treatment) เพื่อให้อุณหภูมิการเกิดโครงสร้างออสเทนไนต์เริ่มต้น (A_s) ออสเทนไนต์สิ้นสุด (A_f) มาร์เทนไซต์เริ่มต้น (M_s) และมาร์เทนไซต์สิ้นสุด (M_f) มีค่าคงที่

4.2.3.3 ศึกษาตัวแปรความดันก๊าซอาร์กอนเพิ่มเติม โดยการเพิ่มความดันก๊าซอาร์กอนให้สูงขึ้น