# บทที่ 5

## สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการย่อยที่ 2 ในโครงการชุด **"การพัฒนาขาเทียมใต้เข่าคุณภาพสูงและราคาถูก"** ซึ่งประกอบไปด้วยโครงการย่อย 2 โครงการได้แก่

โครงการย่อยที่ 1: **การพัฒนาเท้าเทียมจากยางธรรมชาติ**

โครงการย่อยที่ 2: **การพัฒนากระบวนการผลิตชิ้นส่วนขาเทียมโลหะด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง**

โดยเป้าหมายหลักของโครงการนี้คือเพื่อพัฒนาชิ้นส่วนโลหะต้นแบบในขาเทียมใต้เข่าที่มีคุณภาพสูงและราคาไม่แพง ซึ่งจะช่วยลดมูลค่าการนำเข้าของประเทศ และจะช่วยให้ผู้พิการทุกคนเข้าถึงขาเทียมที่มีคุณภาพสูงได้ซึ่งจากการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

### 5.1 การขึ้นรูป

#### 5.1.1 การทุบขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็ง

1. กระบวนการทุบขึ้นรูปสามารถขึ้นรูปโลหะอลูมิเนียมเกรด 7075 ในสถานะกึ่งของแข็งได้
2. อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง คือ อุณหภูมิประมาณ 230-250°C และอุณหภูมิของหัวทุบอยู่ที่ 110-140°C ซึ่งอุณหภูมิของแม่พิมพ์และหัวทุบจะมีความสัมพันธ์กับเวลาในการปล่อยฟองแก๊สซึ่งมีผลต่อการแข็งตัวของน้ำโลหะ ถ้าอุณหภูมิแม่พิมพ์สูง แต่เวลาในการปล่อยฟองแก๊สน้อยจะทำให้น้ำโลหะเหลวเกินไป และมีผลต่อตอนทุบ จะเกิดการรั่วของน้ำโลหะออกนอกแม่พิมพ์ ในขณะเดียวกันถ้าเวลาในการปล่อยฟองแก๊สมาก ปริมาณสัดส่วนของแข็งมาก น้ำโลหะมีความหนืดสูง ดังนั้นอุณหภูมิของแม่พิมพ์จะช่วยให้น้ำโลหะไม่แข็งตัวเร็วก่อนจะทุบ
3. เวลาในการปล่อยฟองแก๊สจะบอกถึงปริมาณสัดส่วนของแข็งที่ได้ ถ้าเวลาปล่อยฟองแก๊สมากก็จะเกิดสัดส่วนของแข็งมากด้วย โดยสภาวะที่เหมาะสมสมารถทุบขึ้นรูปชิ้นงานนี้ได้ คือ เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส 15 วินาที และเวลาที่รอในถ้วยอีก 5 วินาที จะได้โครงสร้างที่มีเฟสของแข็งกระจายสม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน ในขณะเดียวกันถ้าเวลาที่รอในแก้วก่อนเทเป็น 10 วินาที โครงสร้างที่ได้จะมีขนาดของเกรนที่ขนาดใหญ่กว่ากรณีที่เวลารอในแก้วก่อนเทเป็น 5 วินาที ดังนั้นเวลาที่รอในแก้วก่อนเทนานกว่าจะมีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค คือมีขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากมีเวลาให้เกรนเติบโต
4. ปริมาณของน้ำโลหะควรมีปริมาณที่เหมาะสมกับเวลาในการปล่อยฟองแก๊ส เพราะหากปริมาณน้ำโลหะน้อยแต่เวลาในการจุ่มแท่งแกรไฟต์มากเกินไป ก็จะทำให้น้ำโลหะหนืดเกินไป ทำให้ยากต่อการเท เมื่อเทแล้วเกิดการไหลที่ไม่ราบรื่น และโลหะอาจเกิดการเย็นตัวก่อนการทุบ

5. ชิ้นงานที่ได้ต้องผ่านการตัด กลึง คว้าน ทำให้ไม่คุ้มค่าในการผลิตเพราะต้นทุนสูงกว่าการใช้ท่อสำเร็จรูปมาก งานวิจัยนี้จึงเป็นงานวิจัยที่ทำเพื่อดูความเป็นไปได้ในการทุบขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็งส่วนการนำไปใช้จริงเพื่อเป็นท่อขาเทียมทีมวิจัยเลือกที่จะสั่งซื้อท่อสำเร็จรูปอะลูมิเนียมเกรด6061ที่เป็นเกรดที่มีความแข็งแรงถึงแม้จะน้อยกว่าเกรด7075แต่ก็สามารถผ่านการทดสอบตามมาตรฐานได้และยังมีราคาถูกกว่าด้วย

**5.1.2 การอัดรีดขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็ง**

1. โครงสร้างของชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปด้วยความเร็วต่ำกว่ามีแนวโน้มที่เกรนก้อนกลมจะมีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานที่ใช้ความเร็วในการอัดสูงกว่าเนื่องจากมีเวลาให้เกรนเกิดการเติบโตได้ระหว่างการไหลออกจากแม่พิมพ์

2. โครงสร้างจุลภาคจากแต่ละบริเวณตามความยาวของชิ้นงานมีลักษณะใกล้เคียงกันในทุกกรณี

3. การทดลองนี้เป็นเพียงการศึกษาความเป็นไปได้ในการอัดรีดในสภาวะกึ่งของแข็ง ที่มีสัดส่วนของแข็งต่ำ ผลสรุปว่ามีความเป็นไปได้ที่จะทำการพัฒนาต่อไป

**5.1.3 การฉีดขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็ง**

1. สภาวะที่ดีที่สุดในการฉีดขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็งของชิ้นงานข้อเท้าเทียมคือสภาวะ SSM12-1ซึ่งใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สที่10วินาทีและความเร็วรอบในการฉีดอยู่ที่ ½ รอบ

2. การฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน Tube adapter และ Pyramid พบว่าการใช้gate thickness 4 mmให้ผลดีกว่าการใช้gate thickness 3 mm ที่เพิ่มขึ้นจะช่วยสรุปได้ว่า gate thickness ลดการเกิด Segregation ลงได้ และเพิ่มประสิทธิภาพในการดันเข้าของน้ำโลหะโดยจะทำให้ชิ้นงานเต็มแบบ

3. การลดความเร็วในช่วงผ่านทางเข้า (gate) จะช่วยลดการเกิดการแยกชั้นของของเหลว และยังช่วยให้สัดส่วนของแข็งที่ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกันและช่วยให้น้ำโลหะมีการไหลเข้าสู่ชิ้นงานอย่างราบรื่น

4. ความสม่ำเสมอของโครงสร้างภายในชิ้นงานมีความสำคัญมากในการนำชิ้นงานไปใช้จริง เนื่องจากความสม่ำเสมอจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานสูงขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพให้กับชิ้นงาน

**5.2 การปรับปรุงทางความร้อน**

1. การอบละลายที่อุณหภูมิ 480°C ไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมในการอบละลายอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านการหล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS ในทำนองเดียวกันการอบละลายที่อุณหภูมิ 450°C เป็นระยะเวลานานเกิน 8 ชั่วโมงก็ไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมเช่นกัน เนื่องจากมาการฟอร์ม coarse black particles ส่วนการอบลายที่ระยะเวลาสั้นแค่ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 450°C ไม่สามารถละลายเฟสยูเทคติกได้

สมบูรณ์ ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองนี้คือ การอบละลายที่อุณหภูมิ 450°C 4 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าความแข็งสูงสุดหลังการบ่มที่อุณหภูมิ 120°C 12 ชั่วโมง

2. อุณหภูมิการบ่มที่ 120°C ระยะเวลา 72 ชั่วโมง เป็นสภาวะการบ่มที่เหมาะสมสำหรับอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านการหล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS ซึ่งทำให้วัสดุมีค่าความแข็งสูงสุดที่ 90 HRB และค่าความแข็งแรงการดึงเฉลี่ยสูงสุดที่ 486 MPa โดยมีเปอร์เซ็นต์การยืดเฉลี่ยที่ 2%

3. การบ่มที่อุณหภูมิสูงขึ้นที่ 145°C 165°C และ 185°C จะให้ค่าความแข็งและค่าความแข็งแรงการดึงลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามเปอร์เซ็นต์การยืดเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันพรีซิพิเทตมีขนาดใหญ่ขึ้นและความหนาแน่นลดลง

4. พรีซิพิเทตเฟส $\eta'$ จะเป็นเฟสหลักที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านการหล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS หลังจากการบ่มในสภาวะที่ให้ค่าความแข็งสูงสุดทุกอุณหภูมิการบ่ม ทั้งนี้พรีซิพิเทตเฟส $\eta$ เริ่มฟอร์มที่สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ145°C 165°C และ 185°C ระยะเวลา 6 3 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ

5. ค่าความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสม 7075 ในงานวิจัยนี้สามารถเทียบเคียงได้กับอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบ Thixo-casting