บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 วิเคราะห์ผลการดำเนินงานวิจัย

5.1.1 การศึกษาโครงร่างทดแทนกระดูกที่ทำจากวัสดุไทเทเนียมที่มีความพรุน

5.1.1.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพ

เพื่อพิจารณาลักษณะทางภาพของชิ้นงานไทเทเนียมผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว และที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง พบว่าบริเวณผิวภายนอกหลังผ่านกระบวนการอบประสานมีความพรุนเกิดขึ้น (รูปที่ 4.4 (ข)) อันเนื่องจากการสลายตัวของสารที่ทำให้เกิดความพรุน (แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต) ในกระบวนการอบประสาน (Debinding) และเมื่อพิจารณาลักษณะรูพรุนบริเวณภายในของชิ้นงานไทเทเนียมที่มีความพรุนทุกอัตราส่วน พบว่าประกอบด้วยรูพรุน 2 ชนิด ได้แก่ รูพรุนขนาดใหญ่ และรูพรุนขนาดเล็ก (รูปที่ 4.7) โดยรูพรุนขนาดใหญ่เกิดจากสารที่ทำให้เกิดความพรุน (แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต) ถูกกำจัดออกระหว่างกระบวนการอบประสาน ซึ่งรูพรุนขนาดใหญ่นี้เหมาะสมแก่การสร้างเนื้อเยื่อกระดูก และส่งผ่านของเหลวภายในร่างกาย และในส่วนของรูพรุนขนาดเล็กเกิดจากพฤติกรรมการเชื่อมติดกันบริเวณผิวสัมผัสของอนุภาคไทเทเนียมในกระบวนการอบประสาน ส่งผลให้เกิดช่องว่างขึ้น [17] รูพรุนขนาดเล็กนี้สามารถช่วยเหนี่ยวนำให้เกิดเซลล์กระดูกได้ดี [18] และเมื่อทำการทดสอบปริมาตรความพรุน พบว่าขนาดรูพรุนส่วนใหญ่ของชิ้นงานหลังอบประสานที่อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียวมีขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 108 ไมครอน) กว่าชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง (เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 73.8 ไมครอน) (รูปที่ 4.8) เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปที่อัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทางมีการให้แรงดันอัดที่สูง (200 เมกะปาสคาล) แก่ชิ้นงานทุกทิศทาง ส่งผลให้อนุภาคของไทเทเนียม และแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตของชิ้นงานก่อนอบประสานเคลื่อนที่ชิดกันมากขึ้น ดังนั้นเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการอบประสาน ช่องว่างระหว่างอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จึงมีปริมาตรลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว อย่างไรก็ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปทั้ง 2 ชนิด มีค่าใกล้เคียงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดสำหรับส่งผ่านของเหลวในร่างกาย และรูพรุนกระดูกธรรมชาติ (200-500 ไมครอน) [19, 20] และเมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพบริเวณภายในของชิ้นงานไทเทเนียมที่มีความพรุนทุกอัตราส่วน พบว่าชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 60 และ 70 โดยปริมาตรที่อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียวด้วยแรง 50 เมกะปาสคาล และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดัน

เท่ากันทุกทิศทาง โครงสร้างภายปรากฏรอยแตกร้าว (รูปที่ 4.6 (ช และ ฌ)) เนื่องจากแรงดันอัดที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานมีปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความเค้นสะสมอยู่ภายในชิ้นงาน ดังนั้นเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการอบประสานจึงเกิดความเค้นตกค้าง (Residual stress) อยู่ภายในชิ้นงาน ทำให้เกิดรอยแตกร้าวขึ้นภายในโครงสร้าง [21] และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ชิ้นงานไทเทเนียมที่มีความพรุนที่ผ่านกระบวนการอบประสาน พบว่าผิวชิ้นงานบริเวณภายนอก และภายในมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกัน โดยบริเวณภายนอกพบสารประกอบไทเทเนียมออกไซด์ ส่วนบริเวณภายในพบสารประกอบไทเทเนียม (รูปที่ 4.9) สาเหตุที่ทำให้ทั้ง 2 บริเวณมีสารประกอบที่แตกต่างกัน เนื่องจากหลังเสร็จสิ้นกระบวนอบประสาน จะทำการปล่อยชิ้นงานให้เย็นตัวภายในเตา ซึ่งในขั้นตอนนี้ไม่ได้มีการควบคุมบรรยากาศด้วยก๊าซเฉื่อย จึงอาจส่งผลให้ไทเทเนียมบริเวณผิวภายนอกชิ้นงานที่สัมผัสกับบรรยากาศภายในเตาทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็นสารประกอบไทเทเนียมออกไซด์ขึ้น

5.1.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล

การทดสอบความต้านทานแรงกดชิ้นงานที่มีความพรุนลักษณะกราฟที่ได้สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนการเสียรูปคืนตัวแบบเส้นตรง เกิดจากผนังโครงสร้างรูพรุนเกิดการสั่น และขยับตัวส่งผลให้มีความแน่นตัวสูงขึ้นจากแรงกด ส่วนที่ 2 ช่วงที่ความเค้นคงที่ เกิดจากบริเวณข้อต่อผนังโครงสร้างดูดซับแรงกดที่กระทำต่อวัสดุ ส่งผลให้วัสดุเกิดการเสียรูปอย่างต่อเนื่องค่าความเครียดจึงมีค่าเพิ่มขึ้นขณะที่ค่าความเค้นมีค่าคงที่ และส่วนการแน่นตัว เกิดจากผนังโครงสร้างเกิดการเสียหายยุบตัวรวมกันทั้งหมด ส่งผลให้เมื่อให้แรงกดกับวัสดุค่าความเค้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว [18, 31] โดยกระดูกธรรมชาติในร่างกายมนุษย์มีค่าสมบัติทางกลช่วงที่ความเค้นคงที่ ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด และค่ามอดุลัสของยังอยู่ในช่วง 3-20 เมกะปาสคาล 2-200 เมกะปาสคาล และ 0.1-20 กิกะปาสคาล ตามลำดับ [8, 9, 10] และจากการทดสอบความต้านทานแรงกดชิ้นงานไทเทเนียมที่มีความพรุน หลังผ่านกระบวนการอบประสาน เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่อัตราส่วนแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตเท่ากัน เช่น ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 60 โดยปริมาตร (รูป 4.10 (ค และ ง)) เมื่อเปลี่ยนกระบวนการอัดขึ้นรูปจากอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว เป็นอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง พบว่ากราฟช่วงที่ความเค้นคงที่ที่ได้มีลักษณะราบเรียบ และมีค่าเกาะกลุ่มใกล้เคียงกันเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทางมีการใช้แรงดันอัดที่สูงแก่ชิ้นงาน ซึ่งแรงที่ให้มีปริมาณมากกว่าแรงอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว ดังนั้นเมื่อนำชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียวด้วยแรงต่างๆ มาผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง ค่าความหนาแน่นสุดท้ายจึงมีค่าใกล้เคียงกัน แต่พบว่าค่าช่วงที่ความเค้นคงที่ที่ได้มีค่าลดเมื่อเทียบกับกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว เนื่องจากผนังโครงสร้างภายในเกิดการแตกร้าวจากกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง (รูปที่ 4.6 (ช)) ส่งผลให้ความสามารถใน

การดูดซับแรงกดของโครงสร้างมีค่าลดลงค่าช่วงที่ความเค้นคงที่จึงมีค่าลดลง และจากรูปที่ 4.10 (ก) พิจารณาชิ้นงานที่อัตราส่วนแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตเท่ากัน เช่น ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยปริมาตร ที่อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว พบว่ากราฟช่วงที่ความเค้นคงที่มีค่าลดลง เมื่อแรงอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียวเพิ่มขึ้น เนื่องจากผนังช่วงที่บริเวณข้อต่อผนังโครงสร้างดูดซับแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปส่วนที่มากเกินไป ดังนั้นเมื่อทดสอบสมบัติการรับแรงกดจึงเสียรูปได้ง่ายค่าช่วงที่ความเค้นคงที่จึงมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปด้วยกระบวนการเดียวกัน เช่น อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง (รูปที่ 4.10 (ข และ ง)) พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตจากร้อยละ 60 เป็น 70 โดยปริมาตร ค่าช่วงที่ความเค้นคงที่ ค่าความต้านทานแรงกดสูงสุด และค่ามอดุลัสของยังมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างชิ้นงานมีค่าร้อยละความพรุนเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.8) ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงกดมีค่าลดลง

5.1.2 การศึกษาโครงร่างทดแทนกระดูกที่ทำจากวัสดุไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์และผงแก้วชีวภาพ

5.1.2.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะทางภาพบริเวณภายในของชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ และผงแก้วชีวภาพหลังอบประสาน เมื่อพิจารณาลักษณะรูพรุนภายในของชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์และผงแก้วชีวภาพทุกอัตราส่วน พบว่าประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก 2 ชนิด (รูปที่ 4.15) โดยชนิดแรกเป็นรูพรุนที่เกิดจากการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคชนิดเดียวกัน และรูพรุนชนิดที่ 2 เป็นรูพรุนที่เกิดจากรอยต่อระหว่างกลุ่มอนุภาคต่างชนิดกัน โดยรูพรุนชนิดที่ 2 มีขนาดใหญ่กว่าชนิดแรกเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบปริมาตรความพรุนชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ และผงแก้วชีวภาพหลังอบประสาน พบว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน 2 ช่วง คือ ช่วงขนาดประมาณ 0.01-6.54 และ 8.14-10.50 ไมครอน (รูปที่ 4.16) และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนไฮดรอกซีแอปาไทต์เพิ่มขึ้น พบว่าค่าร้อยละความพรุนตัวมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะอนุภาคผงไฮดรอกซีแอปาไทต์มีรูพรุนกระจายอยู่ภายในเนื้ออนุภาค (รูปที่ 4.11 (ก)) ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนไฮดรอกซีแอปาไทต์มากขึ้นส่งผลให้ค่าร้อยละความพรุนตัวที่ได้จึงมีค่าสูงขึ้น และที่อัตราส่วนไฮดรอกซีแอปาไทต์เพิ่มขึ้น พบว่าขนาดรูพรุนรูพรุนส่วนใหญ่ที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้น (รูปที่ 4.16) เนื่องจากไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่เพิ่มขึ้นเกิดการรวมกลุ่มกัน ส่งผลให้รูพรุนชนิดที่ 2 มีปริมาณมากขึ้น ขนาดรูพรุนรูพรุนส่วนใหญ่ที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพบริเวณภายในชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ ที่เติมผงแก้วชีวภาพหลังอบประสาน พบว่าอนุภาคไทเทเนียม และไฮดรอกซีแอปาไทต์สามารถยึดเกาะกันได้ดีขึ้น พิจารณาจากลักษณะทางกายภาพภายนอกชิ้นงานที่

เติมผงแก้วชีวภาพ (รูปที่ 4.13) เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมผงแก้วภาพ (รูปที่ ข.2) ทั้งนี้เนื่องจากผงแก้วชีวภาพเกิดการหลอมเหลวในกระบวนการอบประสานทำหน้าที่เชื่อมระหว่างอนุภาคของไทเทเนียมและไฮดรอกซีแอปาไทต์ และแทรกตัวอยู่ในรูพรุนระหว่างอนุภาค (รูปที่ 4.14 (ซ-ญ)) ส่งผลให้ชิ้นงานหลังอบประสานไม่เกิดการแตกร้าว และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ และผงแก้วชีวภาพที่ผ่านกระบวนการอบประสาน พบว่าผิวชิ้นงานบริเวณภายนอก และภายในมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกัน โดยบริเวณภายนอกพบสารประกอบไฮดรอกซีแอปาไทต์ ไทเทเนียมออกไซด์ ไทเทเนียมฟอสเฟต และแคลเซียมออกไซด์ฟอสเฟส ส่วนบริเวณภายในประกอบด้วยไฮดรอกซีแอปาไทต์ และไทเทเนียมออกไซด์ เนื่องจากกระบวนการสลายตัวของไฮดรอกซีแอปาไทต์ได้น้ำเป็นสารผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ส่งผลให้อนุภาคไทเทเนียมเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นกับออกซิเจนในบรรยากาศภายในเตาเกิดเป็นสารประกอบไทเทเนียมออกไซด์ขึ้น [30] และธาตุฟอสเฟตของไฮดรอกซีแอปาไทต์เกิดการแพร่จากบริเวณภายในสู่ภายนอก เกิดเป็นสารประกอบไทเทเนียมฟอสเฟต และแคลเซียมออกไซด์ฟอสเฟสขณะทำการอบประสาน [21] ดังรูปที่ 4.17

5.1.2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล

การทดสอบความต้านทานแรงกดชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ และผงแก้วชีวภาพที่อัตราส่วนต่างๆ ลักษณะกราฟผลการทดสอบที่ได้ไม่พบกราฟช่วงที่ความเค้นคงที่ ดังรูปที่ 4.18 เนื่องจากวัสดุเซรามิกมีสมบัติความความต้านทานแรงกดสูง จึงเกิดการเสียรูปก่อนเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกด้วยกระบวนการแตกหักแบบเปราะ ทำให้เมื่อรับแรงกดถึงจุดสูงสุดเกิดการแตกหักทันที [31] และเมื่อพิจารณาชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 40 เป็น 60 โดยปริมาตร พบว่าค่าความต้านทานแรงกดสูงสุด (รูปที่ 4.19 (ก)) และค่ามอดุลัสของยัง (รูปที่ 4.19 (ข)) มีค่าลดลง เนื่องจากไฮดรอกซีแอปาไทต์มีสมบัติแข็งแต่เปราะ ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนไฮดรอกซีแอปาไทต์ส่งผลชิ้นงานมีความเปราะเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงกดที่ได้จึงมีค่าลดลง [31] และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ และผงแก้วชีวภาพที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่ออัตราส่วนไฮดรอกซีแอปาไทต์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 40 เป็น 60 โดยปริมาตร พบว่าค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุด (รูปที่ 4.20 (ก)) และค่ามอดุลัสของยังมีค่าลดลง (รูปที่ 4.20 (ข)) เนื่อง จากไฮดรอกซีแอปาไทต์มีสมบัติแข็งแต่เปราะ ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนไฮดรอกซีแอปาไทต์จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดมีค่าลดลง [31]

5.1.2.3 พฤติกรรมการเสียรูปการทดสอบความต้านทานแรงกด ของโครงร่างทดแทนกระดูกที่ทำจากวัสดุไทเทเนียมที่มีความพรุน และที่ทำจากวัสดุไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ และผงแก้วชีวภาพ

การทดสอบความต้านทานแรงกดเมื่อพิจารณาลักษณะกราฟการทดสอบชิ้นงานไทเทเนียมที่มีความพรุน เปรียบเทียบกับชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ และผงแก้วชีวภาพ พบว่ามีพฤติกรรมการเสียรูปที่แตกต่างกัน โดยเมื่อพิจารณากราฟการทดสอบความต้านทานแรงกดชิ้นงานไทเทเนียมที่มีความพรุนปรากฏกราฟช่วงที่ความเค้นคงที่ ลักษณะกราฟช่วงนี้พบได้ในชิ้นงานโลหะที่โครงสร้างมีความพรุน ซึ่งเกิดจากบริเวณข้อต่อผนังโครงสร้างดูดซับแรงกดที่กระทำต่อวัสดุ ส่งผลให้วัสดุเกิดการเสียรูปอย่างต่อเนื่องค่าความเครียดจึงมีค่าเพิ่มขึ้นขณะที่ค่าความเค้นมีค่าคงที่ ดังรูปที่ 4.10 และเมื่อพิจารณากราฟการทดสอบความต้านทานแรงกดชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ และผงแก้วชีวภาพ ไม่พบลักษณะกราฟช่วงที่ความเค้นคงที่ เนื่องจากวัสดุมีการผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ซึ่งเป็นวัสดุในกลุ่มเซรามิกมีสมบัติแข็งแต่เปราะ เมื่อทดสอบความต้านทานแรงกดจึงเกิดการเสียรูปทันทีเมื่อรับแรงกดถึงจุดสูงสุด จึงไม่พบกราฟช่วงที่มีความเค้นคง ดังรูปที่ 4.18

5.1.3 การทดสอบสมบัติความเข้ากันทางชีวภาพ

การประเมินสมบัติความเข้ากันทางชีวภาพสามารถพิจารณาจากปฏิกิริยาระหว่างเซลล์กับเซลล์ (Cell-cell adhesion) การตอบสนองของเซลล์ต่อพื้นผิววัสดุทดสอบ (Cell-matrix) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากโปรตีนที่เซลล์สร้างให้เกิดพันธะทางกายภาพ (Physical bond) กับพื้นผิวที่ยึดเกาะ [7] (รูปที่ ง.1) นำชิ้นงานที่ผลิตด้วยวัสดุไฮดรอกซีแอปาไทต์บริสุทธิ์ผสมผงแก้วชีวภาพ ไทเทเนียมบริสุทธิ์ ไทเทเนียมที่มีความพรุน และไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ และผงแก้วชีวภาพที่อัตราส่วนต่างๆ มาทดสอบการตอบสนองกับเซลล์กระดูก โดยทำการเลี้ยงเซลล์กระดูกบนผิววัสดุโดยตรงเป็นเวลา 7 วัน จากการวิเคราะห์สภาพของเซลล์กระดูกด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเซลล์กระดูกสามารถยึดเกาะ และเจริญเติบโตได้บนผิววัสดุทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ แต่เมื่อพิจารณาลักษณะการยึดเกาะของเซลล์กระดูกกับผิววัสดุแต่ละชนิด พบว่าชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ และผงแก้วชีวภาพ เซลล์กระดูกมีการเจริญเติบโตในแต่ละบริเวณไม่สม่ำเสมอ ลักษณะเซลล์ไม่สมบูรณ์ ความสามารถในยึดเกาะกับวัสดุไม่ดี รูปร่างและขนาดเปลี่ยนแปลงไปจากเซลล์กระดูกปรกติ [7] เนื่องจากผิวชิ้นงานมีลักษณะขรุขระ ความสูงต่ำของผิวชิ้นงานในแต่ละส่วนต่างกันมาก ทำให้เซลล์กระดูกยากต่อการยึดเกาะในแต่ละส่วนของพื้นผิว ลักษณะการยึดเกาะจึงไม่เรียบไปกับผิววัสดุ ดังรูปที่ 4.21 (ง-ฉ) และเมื่อพิจารณาลักษณะการยึดเกาะของเซลล์กระดูกกับชิ้นงานไฮดรอกซีแอปาไทต์ผสมผงแก้วชีวภาพ และไทเทเนียมที่มีความพรุน พบว่าเซลล์กระดูกมีการเจริญเติบโตสม่ำเสมอ ความสามารถในยึดเกาะกับวัสดุดี รูปร่างและขนาดใกล้เคียงเซลล์ปรกติ

ลักษณะสมบูรณ์ โดยสังเกตจากส่วนที่ยื่นออกจากเซลล์คล้ายนิ้วมือ (Filopodia) ที่มีจำนวนมาก เนื่องจากพื้นผิวชิ้นงานมีลักษณะเรียบมากขึ้น และความสูงต่ำของผิวชิ้นงานในแต่ละส่วนลดลง ทำให้เซลล์กระดูกง่ายต่อการยึดเกาะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามผิววัสดุยังคงมีความขรุขระเซลล์กระดูกที่ได้จึงแผ่ตัวไปในระนาบเดียวกับผิวชิ้นงานได้ไม่ดี ความสามารถในการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์เกิดได้ยาก ดังรูปที่ 4.21 (ก และ ค) และเมื่อพิจารณาลักษณะการยึดเกาะของเซลล์กระดูกกับชิ้นงานไทเทเนียมบริสุทธิ์ พบว่าเซลล์กระดูกมีการเจริญเติบโตสม่ำเสมอ ลักษณะสมบูรณ์ ความสามารถในยึดเกาะกับวัสดุดี เซลล์กระดูกสามารถเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์กับเซลล์ได้เพิ่มขึ้น รูปร่างและขนาดใกล้เคียงเซลล์ปรกติมากสุดเมื่อเทียบกับวัสดุที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องจากพื้นผิวชิ้นงานมีลักษณะราบเรียบทำให้เซลล์กระดูกง่ายต่อการยึดเกาะ ดังรูปที่ 4.21 (ข)

จากผลการทดสอบการตอบสนองของเซลล์กระดูกข้างต้นที่กล่าวมายังไม่สามารถสรุปได้ว่า วัสดุชนิดใดมีความสามารถตอบสนองต่อเซลล์กระดูกได้ดีกว่ากัน ทั้งนี้ขึ้นกับตำแหน่งกระดูกที่ทดแทนในร่างกาย เนื่องจากชนิดของเซลล์และการนำไปใช้งานในแต่ละบริเวณของร่างกายจะมีการตอบสนองของเซลล์กับวัสดุทดแทนที่แตกต่างกัน จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในสัตว์ทดลองในขั้นตอนต่อไป

5.2 สรุปผลการทดลอง

5.2.1 การศึกษาโครงร่างทดแทนกระดูกที่ทำจากวัสดุไทเทเนียมที่มีความพรุน

1. สามารถผลิตโครงร่างทดแทนกระดูกที่ทำจากวัสดุไทเทเนียมที่มีความพรุน ที่อัตราส่วนแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 60, 70 และ 80 โดยปริมาตรสำเร็จ โดยมีค่าช่วงที่ความเค้นคงที่อยู่ในช่วง 2-14 เมกะปาสคาล ค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดอยู่ในช่วง 5-19 เมกะปาสคาล และค่ามอดุลัสของยังอยู่ในช่วง 0.02-0.2 กิกะปาสคาล ซึ่งมีค่าสมบัติทางลใกล้เคียงกับกระดูกธรรมชาติ
2. แรงที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานแบบทิศทางเดียวที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าช่วงที่ความเค้นคงที่และค่าความต้านทานแรงกดมีค่าลดลง
3. แรงที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานแบบทิศทางเดียว 50 เมกะปาสคาล และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง ทำให้ลักษณะทางกายภาพบริเวณภายในชิ้นงานเกิดรอยร้าวส่งผลให้ค่าช่วงที่ความเค้นคงที่ และค่าความต้านทานแรงกดมีค่าลดลง
4. อัตราส่วนของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าช่วงที่ความเค้นคงที่ และค่าความต้านทานแรงกดมีค่าลดลง

5.2.2 การศึกษาโครงร่างทดแทนกระดูกที่ทำจากวัสดุไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์และผงแก้วชีวภาพ

1. สามารถผลิตโครงร่างทดแทนกระดูกที่ทำจากวัสดุไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ และผงแก้วชีวภาพ ที่อัตราส่วนไฮดรอกซีแอปาไทต์ร้อยละ 0, 20, 40, 60 และ 100 โดยปริมาตรสำเร็จโดยมีค่ามอดุลัสของยังอยู่ในช่วง 0.68-1.29 กิกะปาสคาล มีค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดอยู่ในช่วง 19.64-59.10 เมกะปาสคาล และมีค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดอยู่ในช่วง 7.06-34.70 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่าสมบัติทางกลใกล้เคียงกับกระดูกธรรมชาติ
2. เวลาที่ใช้ในกระบวนการบดผสมไม่ใช่ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าสมบัติทางกล และลักษณะทางกายภาพ
3. อัตราส่วนของไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกด และค่าความต้านทานแรงดัดมีค่าลดลง

5.2.3 การทดสอบสมบัติความเข้ากันทางชีวภาพ

1. ชิ้นงานไฮดรอกซีแอปาไทต์บริสุทธิ์ผสมผงแก้วชีวภาพ ไทเทเนียมบริสุทธิ์ ไทเทเนียมที่มีความพรุน และไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์และผงแก้วชีวภาพที่อัตราส่วนต่างๆ เซลล์กระดูกสามารถยึดเกาะและเจริญเติบโตได้
2. ชิ้นงานไทเทเนียมบริสุทธิ์มีผิวชิ้นงานเรียบ เซลล์กระดูกสามารถยึดเกาะบนผิวชิ้นงานสม่ำเสมอ มีปริมาณมาก เซลล์มีการแผ่เชื่อมกับเซลล์รอบข้างได้ดี เมื่อเทียบกับไฮดรอกซีแอปาไทต์บริสุทธิ์ผสมผงแก้วชีวภาพ ไทเทเนียมที่มีความพรุน และไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์และผงแก้วชีวภาพที่อัตราส่วนต่างๆ

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการศึกษาในงานวิจัยนี้หากต้องการนำไปต่อยอดใช้ผลิตในเชิงอุตสาหกรรม ควรปรับช่วงค่าอัตราส่วนผสมระหว่างไทเทเนียม และไฮดรอกซีแอปาไทต์ให้ละเอียดมากขึ้น เพื่อให้ได้โครงร่างทดแทนกระดูกที่มีค่าสมบัติทางกลที่หลากหลาย ซึ่งสามารถนำไปปรับใช้ให้เหมาะสมกับกระดูกธรรมชาติแต่ละส่วนของร่างกาย
2. จากขั้นตอนการทดสอบสมบัติความเข้ากันทางชีวภาพ หากต้องการศึกษาการเจริญเติบโตของเซลล์กระดูก ลักษณะการยึดเกาะในระยะเวลาต่างๆ ให้เห็นความแตกต่างชัดเจนมากขึ้น สามารถทำได้โดยเพิ่มระยะเวลาที่ใช้เลี้ยงเซลล์กระดูกบนผิวชิ้นงาน และหากต้องการนำไปใช้ผลิตในเชิงอุตสาหกรรมควรทำการทดสอบค่าความเป็นพิษต่อเซลล์ และมีการทดสอบโดยนำไปใช้กับสัตว์ทดลอง (In vivo test)