บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้มีการดำเนินการในส่วนต่างๆ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการออกแบบและสร้างระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ขึ้นมาเพื่อเป็นต้นแบบและแนวทางสำหรับการพัฒนากระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

ในบทนี้ สิ่งต่างๆ ที่ได้ดำเนินการในงานวิจัยทั้งหมดจะได้นำมาสรุปผลของการวิจัย อภิปรายถึงข้อจำกัดของการวิจัย และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในการพัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 สรุปผลการวิจัย

1) จากการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับวัสดุทางการแพทย์ สารไฮดรอกซีอะพาไทต์จัดได้ว่าเป็นเซรามิกส์ทางการแพทย์ที่มีองค์ประกอบทางเคมีภาคอนินทรีย์ใกล้เคียงกับกระดูกหรือเนื้อเยื่อแข็ง โดยมีคุณสมบัติเด่นในด้านปฏิสัมพันธ์ทางชีวภาพกับเนื้อเยื่อข้างเคียง จึงทำให้สารไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์เพื่อทำอวัยวะเทียมหรือวัสดุเคลือบผิวอวัยวะเทียม ทั้งนี้การประยุกต์ใช้ในแต่ละส่วนนั้นต้องการสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกันไปบ้าง จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมปัจจัยในการผลิตเพื่อให้ได้ลักษณะสมบัติของวัสดุตามต้องการ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้
2) ในงานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายในการออกแบบและสร้างระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยเลือกใช้วิธีการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมีโดยวิธีตกตะกอน สารตั้งต้นที่ใช้ทั้งหมดมี 3 อย่างคือ สารละลายแคลเซียมไนเตรด สารละลายได-แอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟต และสารละลายแอมโมเนีย
3) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าปัจจัยในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์จากปฏิกิริยาเคมีโดยวิธีการตกตะกอนที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้นประกอบด้วย อุณหภูมิ ค่า pH อัตราส่วนโมล Ca/P ของสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารตั้งต้นปฏิกิริยา อัตราการเติมผสมสารตั้งต้น สภาวะเชิงกลในการสนับสนุนปฏิกิริยา และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

4) ระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นมานั้นเป็นระบบปิดที่สามารถป้องกันการรั่วไหลของก๊าซแอมโมเนียในขณะดำเนินกระบวนการได้ และปัจจัยที่สามารถควบคุมแบบอัตโนมัติได้คือ ค่า pH อัตราการเติมผสมสารตั้งต้น และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้แบบกึ่งอัตโนมัติคือ อุณหภูมิ ส่วนปัจจัยที่ต้องควบคุมด้วยผู้ปฏิบัติการคือ อัตราส่วนโมล Ca/P ของสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารตั้งต้นปฏิกิริยา และสภาวะเชิงกลในการสนับสนุนปฏิกิริยา

5) อุปกรณ์ควบคุมลำดับการทำงานที่ใช้ในการดำเนินกระบวนการอัตโนมัติผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ในงานวิจัยนี้ได้แก่อุปกรณ์ PLC กำหนดให้รับสัญญาณขาเข้าแบบดิจิตอล 1 สัญญาณ สัญญาณขาออกแบบดิจิตอล 3 สัญญาณ สัญญาณขาเข้าแบบอนาล็อก 1 สัญญาณ และสัญญาณขาออกแบบอนาล็อก 1 สัญญาณ นอกจากนี้แล้วอุปกรณ์ PLC ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีพอร์ตรับส่งข้อมูลแบบ RS232 จำนวน 2 พอร์ต ซึ่งหนึ่งพอร์ตได้นำมาเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์โดยมีวัตถุประสงค์ 2 ประการกล่าวคือ เพื่อใช้ในการบันทึกลำดับการทำงานจากแผนภาพแลดเดอร์ที่ผู้ใช้อุปกรณ์ PLC เขียนขึ้นในโปรแกรม DirectSOFT32 ลงไปในหน่วยความจำของอุปกรณ์ PLC และเพื่อใช้ในการติดต่อรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ PLC ผ่านโปรแกรม DSData Server ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่เชื่อมระหว่างอุปกรณ์ PLC กับโปรแกรมรับค่าข้อมูลและแสดงสถานภาพที่เขียนขึ้นด้วยโปรแกรม Visual Basic 6.0 สำหรับอีกพอร์ตหนึ่งของอุปกรณ์ PLC นั้นจะนำไปใช้ในการเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูลซึ่งจะช่วยในการแสดงผลการควบคุมปัจจัยแบบเวลาจริง (Real time) ในช่วงเวลาที่เพิ่งผ่านมาไม่นานนัก โดยแสดงผลในรูปแบบกราฟิก (กราฟเส้น) เพื่อให้สามารถมองเห็นแนวโน้มของการควบคุมกระบวนการได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

6) โปรแกรมรับค่าข้อมูลและแสดงสถานภาพที่ได้เขียนขึ้นมานั้นมีลักษณะเป็นโปรแกรมติดต่อกับผู้ใช้งาน (User interface) ซึ่งในตอนเริ่มต้นจะกำหนดให้ผู้ใช้ระบบอัตโนมัติกรอกข้อมูลของปัจจัยที่ต้องการควบคุม 6 อย่าง อันประกอบด้วย

   - ค่า pH
   - อุณหภูมิ
   - อัตราการเติมผสมสารตั้งต้น
   - เวลาในการกวนสารผลิตภัณฑ์
   - เวลาในการตั้งทิ้งสารผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิกำหนด

- เวลาในการตั้งทิ้งสารผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิห้อง

หลังจากที่ได้กำหนดทุกอย่างเรียบร้อยแล้ว ผู้ใช้ระบบกดปุ่มเริ่มต้นกระบวนการผลิต โปรแกรมจะแสดงหน้าจอหลักซึ่งจะมีส่วนประกอบต่างๆ 3 ส่วนดังต่อไปนี้

- ข้อมูลค่ากำหนดเริ่มต้น
- ข้อมูลปัจจุบันที่ได้จากเครื่องวัดค่า pH
- ข้อมูลล่าสุดที่ผ่านมา

7) การกำหนดสภาวะการทดสอบระบบอัตโนมัตินั้นกำหนดให้มีการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ขึ้นมา 3 สภาวะๆ ละ 2 ครั้ง โดยพยายามแปรผันค่าปัจจัยทั้งหมดที่ต้องการควบคุมให้ครอบคลุมพิสัยของการควบคุม ในงานวิจัยนี้กำหนดตัวแปรควบคุมให้ใช้กับทุกสภาวะการผลิต ดังนี้คือ กำลังการผลิต 30 กรัมต่อรอบการผลิต อัตราเร็วรอบในการกวนสารตั้งต้น 400 rpm อัตราเร็วรอบในการกวนสารผลิตภัณฑ์ 800 rpm เวลากวนสารผลิตภัณฑ์ 2 ชั่วโมง เวลาตั้งทิ้งสารผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิกำหนด 1 ชั่วโมง และเวลาตั้งทิ้งสารผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิห้อง 12 ชั่วโมง ตัวแปรต้นที่กำหนดในแต่ละสภาวะการผลิต 3 สภาวะมีรายละเอียดดังนี้

- สภาวะที่ 1 ใช้อุณหภูมิ 30 ^{o}C ค่า pH 7 อัตราการเติมผสมสารตั้งต้น 110 ml / min
- สภาวะที่ 2 ใช้อุณหภูมิ 60 ^{o}C ค่า pH 8 อัตราการเติมผสมสารตั้งต้น 70 ml / min
- สภาวะที่ 3 ใช้อุณหภูมิ 90 ^{o}C ค่า pH 9 อัตราการเติมผสมสารตั้งต้น 30 ml / min

นอกจากนี้ ยังได้แบ่งผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะที่ 3 จำนวนครึ่งหนึ่งมาทำการเผาที่อุณหภูมิ 900 ^{o}C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อใช้เป็นตัวอย่างเปรียบเทียบในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะตัวของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค และลักษณะรูปทรง

สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้จากระบบอัตโนมัติจะต้องผ่านการตรวจวัดน้ำหนัก การตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัว การศึกษาลักษณะการกระจายของขนาดอนุภาค และการศึกษาลักษณะรูปทรงโดยจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้จากระบบผู้ปฏิบัติการควบคุมซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบผู้ปฏิบัติการควบคุมขึ้นมา 2 ครั้ง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ดังกล่าว

8) การทดสอบระบบอัตโนมัติที่ได้จากการออกแบบและสร้างขึ้นนั้นได้ดำเนินการดังต่อไปนี้

- การทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบอัตโนมัติ
  - การตรวจวัดน้ำหนักของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้
  - การทดสอบการควบคุมปัจจัยอุณหภูมิและค่า pH
- การตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้จากระบบอัตโนมัติ
  - การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD
  - การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR
- การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง PSLA
- การศึกษาลักษณะรูปทรงด้วยเครื่อง SEM

9) จากการตรวจวัดน้ำหนักของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้จะสามารถบอกถึงประสิทธิภาพของระบบการผลิตได้ ผลที่ได้จากการตรวจวัดแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของระบบอัตโนมัตินั้นสูงกว่าของระบบผู้ปฏิบัติการควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการควบคุมปัจจัยต่างๆให้คงที่ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และเป็นไปตามทฤษฎีมากยิ่งขึ้น อีกทั้งปริมาณของสารละลายแอมโมเนียมีมากเกินพอในการเกิดปฏิกิริยาอันเป็นผลมาจากการควบคุมค่า pH

10) จากการทดสอบประสิทธิผลในการควบคุมปัจจัยอุณหภูมิและค่า pH ผลปรากฏว่าโดยรวมแล้วทั้งปัจจัยอุณหภูมิและค่า pH จะเกิดความผิดพลาดในการควบคุมไม่เกิน 1% โดยช่วงที่เกิดความผิดพลาดของค่าเฉลี่ยและความแปรผันมากที่สุดนั้นคือขั้นตอนที่ 2 ซึ่งเป็นขั้นตอนการเติมผสมสารตั้งต้น เนื่องจากเป็นช่วงที่ไฮดรอกไซด์ไอออนได้ถูกดึงไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม การควบคุมปัจจัยในสภาวะที่ 3 นั้นเกิดความผิดพลาดถึง 5% ในการควบคุมอุณหภูมิในขั้นตอนที่ 2 เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนหายไปในการเกิดปฏิกิริยา ประกอบกับแอมโมเนียบางส่วนระเหยกลายเป็นไออย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง จึงต้องเติมสารละลายแอมโมเนียซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องลงไปเป็นจำนวนมาก อุณหภูมิผสมจึงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และยังเกิดความผิดพลาดถึง 10% ในการควบคุมค่า pH ตั้งแต่ช่วงปลายของขั้นตอนที่ 4 เป็นต้นไป เนื่องจากสารละลายแอมโมเนียในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 หมด ไม่สามารถจ่ายสารละลายแอมโมเนียเพื่อควบคุมค่า pH ต่อไปได้

11) จากผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยเครื่อง XRD ผลปรากฏว่าสารที่ผลิตได้ทั้งจากระบบผู้ปฏิบัติการควบคุมและระบบอัตโนมัติเป็นสารไฮดรอกซีอะพาไทต์จริง และการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบอัตโนมัติสามารถกำหนดองค์ประกอบเฟสและระดับความเป็นรูปผลึกได้

12) ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยเครื่อง FT-IR นั้นพบว่าสอดคล้องกับผลที่ได้จาการตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD โดยจะบอกถึงหมู่ฟังก์ชันที่พบในสารประกอบที่นำมาทดสอบ ผลที่ได้สามารถยืนยันได้ว่าระบบอัตโนมัติสามารถกำหนดองค์ประกอบเฟสและระดับความเป็นรูปผลึกได้

13) จากผลการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคพบว่าขนาดของอนุภาคค่อนข้างใหญ่และมีการกระจายค่อนข้างมาก เนื่องจากข้อจำกัดในด้านเครื่องมือบดผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อระดับความเป็นรูปผลึกของอนุภาคสูงขึ้น อนุภาคจะมีรูพรุนมากขึ้น ทำให้มีแนวโน้มที่จะแตกตัวออกเป็นอนุภาคที่เล็กกว่าได้ง่ายขึ้น

14) จากผลการศึกษาลักษณะรูปทรงพบว่า การผลิตด้วยระบบผู้ปฏิบัติการควบคุมนั้นเนื่องจากไม่ได้มีการควบคุมปัจจัยการผลิตให้คงที่ จึงทำให้ผงที่ผลิตได้มีลักษณะสมบัติไม่คงที่ โดยสามารถสังเกตได้จากขนาดของอนุภาคย่อยที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคซึ่งไม่สม่ำเสมอเท่าใดนัก นอกจากนี้จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อระดับความเป็นรูปผลึกของอนุภาคสูงขึ้น ขนาดอนุภาคย่อยจะโตขึ้นและมีความเป็นระเบียบมากขึ้นเนื่องจากรูปผลึกมีความสมบูรณ์มากขึ้นจึงรวมตัวกันเป็นอนุภาคย่อยที่มีรูปร่างชัดเจนยิ่งขึ้น และทำให้มีช่องว่างระหว่างอนุภาคย่อยมากขึ้น จึงแตกตัวเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าได้ง่ายขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลการศึกษาด้วยเครื่องมือ PSLA

15) จากผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่าการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบอัตโนมัติมีข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตด้วยระบบผู้ปฏิบัติการควบคุมในด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ด้านประสิทธิภาพในการผลิต
- ด้านประสิทธิผลในการควบคุมปัจจัยการผลิต
- ด้านกำลังการผลิต
- ด้านความปลอดภัยต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน

6.2 ข้อจำกัดของการวิจัย

1) กำลังการผลิตของระบบอัตโนมัติสำหรับผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ในงานวิจัยนี้ คือ 20 – 40 กรัมต่อรอบการผลิตเนื่องจากข้อจำกัดด้านขนาดของภาชนะปฏิกรณ์และลักษณะการติดตั้งของอุปกรณ์ตรวจวัด
2) การควบคุมอุณหภูมิเป็นเพียงระบบกึ่งอัตโนมัติเนื่องจากอุปกรณ์ที่มีอยู่ไม่สามารถส่งข้อมูลที่วัดได้ออกไปยังอุปกรณ์ต่อพ่วงอื่นๆ อย่างไรก็ตาม ค่าอุณหภูมิสามารถติดตามและบันทึกผลได้จากเครื่องวัดค่า pH ซึ่งจำเป็นต้องวัดอุณหภูมิเพื่อการชดเชยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป
3) การควบคุมค่า pH แบบอัตโนมัติสามารถดำเนินการได้กับภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ซึ่งเป็นภาชนะปฏิกรณ์ตัวหลักเท่านั้น เนื่องจากเครื่องวัดค่า pH ซึ่งสามารถส่งข้อมูลที่วัดได้ไปยังอุปกรณ์ภายนอกได้นั้นมีอยู่เพียงเครื่องเดียว ส่วนภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2 ซึ่งเป็นเพียงภาชนะปฏิกรณ์ในการปรับสภาพสารตั้งต้นคือได-แอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟตเพียงอย่างเดียวนั้นจำเป็นต้องดำเนินการปรับค่า pH ก่อนทำปฏิกิริยาด้วยมือ ทั้งนี้หากสามารถจัดหาเครื่องวัดค่า pH ที่ส่งข้อมูลออกไปยังอุปกรณ์อื่นได้เพิ่มเติมก็จะสามารถควบคุมค่า pH ได้โดยใช้หลักการเดียวกันกับที่ใช้ควบคุมค่า pH ในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1
4) การกำหนดจ่ายสารละลายแอมโมเนียโดยการเปิดปิดโซลินอยด์วาล์วตามเวลาที่คำนวณได้นั้น จะไม่สามารถกำหนดช่วงเวลาเปิดปิดให้ต่ำกว่า 20 ms ได้ เนื่องจากข้อจำกัดในด้านการตอบสนองของโซลินอยด์วาล์วและเหตุผลเกี่ยวกับแรงตึงผิวของสารละลายซึ่งทำให้สารละลายแอมโมเนียไม่สามารถไหลออกมาได้
5) ความจุของภาชนะปฏิกรณ์บรรจุสารละลายแอมโมเนียมีปริมาตรจำกัดเพียง 500 ml ซึ่งหากดำเนินการผลิตในสภาวะการผลิตที่มีอุณหภูมิสูง ประกอบกับค่า pH ที่สูงดังเช่นสภาวะที่ 3 ในงานวิจัยนี้ อาจทำให้ปริมาณสารละลายแอมโมเนียไม่เพียงพอกับความต้องการในการควบคุมค่า pH ได้

6.3 ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็น

1) ในขั้นตอนของการเตรียมสารละลายตั้งต้น ผงแคลเซียมไนเตรดที่นำไปชั่งน้ำหนักตามสัดส่วนที่ต้องการนั้นมีโมเลกุลของน้ำเจือปนอยู่โดยเฉลี่ย 4 โมเลกุลต่อสารแคลเซียมไนเตรด 1 โมเลกุล ซึ่งมีที่มาจากสูตรเคมีที่ระบุไว้คือ $Ca(NO_3)_2.4H_2O$ อย่างไรก็ตาม โมเลกุลของน้ำที่เกาะอยู่นี้ไม่มีเสถียรภาพเท่าที่ควร ซึ่งอาจจะทำให้ปริมาณของแคลเซียมไนเตรดที่นำไปชั่งน้ำหนักเกิดความคลาดเคลื่อนไปจากที่คำนวณได้ตามทฤษฎี ดังนั้นควรนำผงแคลเซียมไนเตรดไปอบเพื่อไล่โมเลกุลของน้ำออกให้หมดก่อนที่จะนำไปชั่งตวงตามสัดส่วนที่ใช้จริงในปฏิกิริยา
2) เมื่อพิจารณาถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้น พบว่าส่วนหนึ่งเกิดขึ้นจากตะกอนที่จับอยู่บริเวณก้นภาชนะปฏิกรณ์ในขณะที่ลำเลียงตะกอนออกไปกรองยังกรวยกรอง ซึ่งควรจะต้องหาวิธีการที่มีประสิทธิผลในการลำเลียงตะกอนส่วนที่ติดอยู่ที่ก้นภาชนะนี้ออกไปให้หมด ยกตัวอย่างเช่น ระบบการฉีดน้ำกลั่นเพื่อไล่ตะกอนในส่วนที่ติดอยู่ เป็นต้น
3) ในการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติซึ่งเป็นระบบปิดนั้น เมื่อดำเนินการผลิตที่อุณหภูมิสูง ของเหลวบางส่วนจะระเหยกลายเป็นไอและทำให้เกิดความดันก๊าซขึ้นภายในระบบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องระบายความดันก๊าซเหล่านั้นเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อระบบ สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการติดตั้งวาล์วแบบรูปทรงกลม (Ball valve) เพื่อระบายความดันก๊าซที่มีมากเกินไปในระบบและต่อท่อยางจากวาล์วนี้ไปยังตู้กำจัดกลิ่นเพื่อกำจัดไอระเหยของแอมโมเนีย โดยเปิดวาล์วนี้ตลอดเมื่อดำเนินการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ในสภาวะที่ใช้อุณหภูมิสูง ทั้งนี้ในการพัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์จึงต้องมีการคำนึงถึงการติดตั้งระบบระบายความดันก๊าซซึ่งอาจจะใช้เป็นวาล์วระบายความดันที่มีขนาดใช้งานตามความเหมาะสมกับความสามารถในการทนความดันของภาชนะปฏิกรณ์ หรืออาจจะใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความดันในระบบส่งสัญญาณที่วัดได้ไปยังอุปกรณ์ PLC จากนั้นอุปกรณ์ PLC จะส่งสัญญาณควบคุมออกไปยังโซลินอยด์วาล์วเพื่อเปิดปิดวาล์วระบายความดัน นอกจากนี้แล้วจะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์กำจัดไอระเหยของแอมโมเนียที่ปะปนมากับความดันเหล่านั้นด้วย
4) จากผลการทดสอบประสิทธิผลในการควบคุมปัจจัยอุณหภูมิที่สภาวะที่ 3 ซึ่งใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 90 °C ซึ่งพบว่าในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งเป็นขั้นตอนการเติมผสมสารตั้งต้น อุณหภูมิของสารละลายภายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 มีค่าลดลงอย่าง

มากโดยลดลงมาจนถึงจุดต่ำสุดที่ประมาณ 80 °C ซึ่งถือว่าเกิดความผิดพลาดที่มีนัยสำคัญพอสมควร สาเหตุเนื่องมาจากการเติมสารละลายแอมโมเนียที่มีอุณหภูมิโดยประมาณเท่ากับอุณหภูมิห้องลงไปเป็นจำนวนมาก ทำให้อุณหภูมิของสารละลายผสมในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการปรับปรุงในจุดนี้คือการอุ่น (preheat) สารละลายแอมโมเนียที่ใช้เติมให้มีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิกำหนดก่อนที่จะเติมลงไปในภาชนะปฏิกรณ์ซึ่งน่าจะช่วยลดความผิดพลาดในส่วนนี้ลงได้มาก อย่างไรก็ตาม ควรต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในบางประเด็นที่น่าสนใจ ได้แก่สภาวะบางประการของสารละลายแอมโมเนียที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้สามารถออกแบบในส่วนของการอุ่นสารละลายแอมโมเนียได้อย่างเหมาะสม

5) จากผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันของน้ำเจือปนอยู่ด้วย แสดงให้เห็นว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ดูดความชื้นในบรรยากาศเข้าไป ดังนั้นผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้นั้นจำเป็นต้องนำไปเก็บในภาชนะที่มีระบบควบคุมความชื้นเพื่อเก็บรักษาคุณภาพของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้
6) งานวิจัยนี้ดำเนินการบดตะกอนไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยใช้วิธีตำด้วยครกบดยา ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคด้วยเครื่องมือ PSLA ได้แสดงให้เห็นแล้วว่าไม่สามารถบดให้ได้ผงที่มีความละเอียดมากเพียงพอและขนาดอนุภาคที่ได้มีการกระจายที่ค่อนข้างกว้าง กระบวนการผลิตในส่วนของการบดตะกอนจึงต้องมีการปรับปรุงด้านกลไกการบดให้เกิดประสิทธิผลมากขึ้น ยกตัวอย่างวิธีการที่น่าจะทำให้เกิดผลดียิ่งขึ้นได้แก่ การบดตะกอนด้วยเครื่องบดแบบลูกกลม (Ball mill) ซึ่งจะช่วยให้ผงที่ได้มีความละเอียดและสม่ำเสมอมากขึ้น
7) ระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นต้นแบบและแนวทางที่สามารถนำไปพัฒนาต่อให้มีกำลังการผลิตที่สูงขึ้นจนกระทั่งนำไปผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้