

## บทที่ 5

### บทวิจารณ์ผลการวิจัย

#### 5.1 ประเด็นสำคัญที่พบในการปฏิบัติการผลิตด้วยระบบผู้ปฏิบัติการควบคุม

หลังจากการปฏิบัติการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์แบบควบคุมโดยผู้ปฏิบัติการแล้ว ทำให้ได้ทราบถึงสภาวะปัญหา จุดที่ต้องคำนึงถึง และข้อจำกัดในแต่ละขั้นตอน ซึ่งจะได้แจกแจงรายละเอียดดังต่อไปนี้โดยอ้างอิงขั้นตอนต่างๆ จากหัวข้อ 3.1.2 ในบทที่ 3

##### ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมสารละลายแคลเซียมไนเตรด พบประเด็นสำคัญดังต่อไปนี้

- ผงแคลเซียมไนเตรดสามารถละลายน้ำได้ง่าย ใช้แท่งแก้วกวนเพียงไม่นานก็สามารถละลายได้หมด
- สารละลายแคลเซียมไนเตรดพบว่ามีค่า  $\text{pH} = 5.54$  ที่อุณหภูมิ  $25.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีสภาพเป็นกรดอ่อนอันเนื่องมาจากแคลเซียมไนเตรดโดยทฤษฎีแล้วมีสภาพเป็นเกลือกรด
- ช่วงที่เติมสารละลายแอมโมเนียจำเป็นต้องนำไปปฏิบัติการภายในตู้กำจัดกลิ่น เนื่องจากไอรระเหยมีกลิ่นแรงและหากสูดดมเข้าไปจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมสารละลายได-แอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟต พบประเด็นสำคัญดังต่อไปนี้

- ผงได-แอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟตละลายน้ำได้ยากกว่าผงแคลเซียมไนเตรดเล็กน้อย เนื่องจากต้องใช้เวลากวนนานกว่า จึงจะสามารถละลายได้หมด
- สารละลายได-แอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟตพบว่ามีค่า  $\text{pH} = 8.01$  ที่อุณหภูมิ  $27.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีสภาพเป็นเบสอ่อนอันเนื่องมาจากได-แอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟตโดยทฤษฎีแล้วมีสภาพเป็นเกลือเบส
- ช่วงที่เติมสารละลายแอมโมเนียจำเป็นต้องนำไปปฏิบัติการภายในตู้กำจัดกลิ่น เนื่องจากไอรระเหยมีกลิ่นแรงและหากสูดดมเข้าไปจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

### ขั้นตอนที่ 3 การเติมผสมสารตั้งต้น พบประเด็นสำคัญดังต่อไปนี้

- ก่อนการเติมผสมสารตั้งต้น ความเร็วรอบของการกวนที่เหมาะสมคือ 400 rpm ในขณะที่เมื่อเติมผสมสารตั้งต้นแล้ว จำเป็นต้องเพิ่มความเร็วรอบของการกวนให้อยู่ที่ความเร็ว 800 rpm
- เมื่อนำขวด Funnel Dropping ไปทดสอบหาอัตราการไหลสูงสุดในภายหลัง โดยการจับเวลาที่ใช้ในการเปิดวาล์วเพื่อปล่อยของเหลวปริมาตร 500 ml ที่อยู่ในภาชนะจนหมด หาค่าเวลาโดยเฉลี่ยได้เป็น 27.077 วินาที และสามารถนำไปคำนวณอัตราการไหลสูงสุดได้เป็น  $500 \times 60 / 27.077 = 1107.9 \text{ ml / min}$

### ขั้นตอนที่ 4 การกวนสารผลิตภัณฑ์ พบประเด็นสำคัญดังต่อไปนี้

- ในการควบคุมอุณหภูมิของสารละลายด้วยมือ นั้นทำได้โดยการปรับอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน (Hot plate) โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ชนิดปรอทเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิของสารละลาย ผลปรากฏว่าเกิดความผิดพลาดสูงสุดของการควบคุมอยู่ที่ประมาณ  $\pm 6\%$  กล่าวคือ ที่อุณหภูมิกำหนดควบคุมที่  $80^{\circ}\text{C}$  นั้นมีความผิดพลาดเกิดขึ้นไม่เกิน  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  โดยประมาณ

### ขั้นตอนที่ 5 การตั้งทิ้งสารผลิตภัณฑ์ พบประเด็นสำคัญดังต่อไปนี้

- หลังจากปิดเครื่องกวนสารระบบแม่เหล็กระยะหนึ่ง ตะกอนชั้นขาวจะเริ่มนอนก้นภาชนะ

### ขั้นตอนที่ 6 การกรองตะกอน พบประเด็นสำคัญดังต่อไปนี้

- ก่อนเทสารผลิตภัณฑ์ลงในกรวยกรอง ควรใช้แท่งแก้วกวนให้ตะกอนเกิดการกระจายตัวอย่างทั่วถึงเสียก่อน เพื่อให้มีขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม ยังคงมีตะกอนส่วนหนึ่งจับกันเป็นก้อนอยู่บริเวณก้นภาชนะซึ่งยากแก่การทำให้กระจายตัว
- หลังจากเทสารผลิตภัณฑ์แล้วยังคงมีตะกอนอีกส่วนหนึ่งจับอยู่ที่ก้นภาชนะ จำเป็นต้องมีการชูดอกซึ่งอาจจะยังคงมีตะกอนบางส่วนหลงเหลืออยู่ในส่วนนี้ถือได้ว่าทำให้เกิดความสูญเสียขึ้น
- การกรองผ่านกระดาษกรองจะช่วยแยกสารละลายใสออกจากตะกอนได้อย่างเด็ดขาด
- การต่อปั๊มสุญญากาศเข้ากับระบบการกรองจะช่วยลดเวลาในการกรองลงได้มากอย่างมีนัยสำคัญ

- ในขั้นตอนการกรองยังมีความจำเป็นต้องปฏิบัติการณ์ในตู้กำจัดกลิ่นเนื่องจากสารละลายใส่ที่กรองได้ยังมีส่วนประกอบเป็นสารละลายแอมโมเนียส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยาและสารละลายแอมโมเนียในเตรดที่เป็นสารผลิตภัณฑ์ซึ่งจะยังคงมีไอระเหยที่มีกลิ่นแรงและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

ขั้นตอนที่ 7 การล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น พบประเด็นสำคัญดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนนี้ถือได้ว่ามีความจำเป็น เนื่องจากเป็นการกำจัดไอออนส่วนเกินที่อาจจะยังหลงเหลืออยู่ที่ตะกอนที่กรองออกมาได้ครั้งแรก โดยน้ำกลั่นจะช่วยชะล้างไอออนเหล่านั้นออกไป ทำให้ตะกอนไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ที่ได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น

ขั้นตอนที่ 8 การอบแห้ง พบประเด็นสำคัญดังต่อไปนี้

- การอบแห้งในเตาอบสูญญากาศ จะเป็นการกำจัดความชื้นออกไป ทำให้ผงที่ได้นั้นปราศจากความชื้น อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าผงไฮดรอกไซด์อะพาไทต์จะผ่านการอบแห้งแล้ว หากตั้งทิ้งไว้ในอากาศก็อาจจะทำให้ดูดความชื้นเข้าไปได้ จึงควรเก็บผงไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ไว้ในภาชนะควบคุมความชื้นด้วย

ขั้นตอนที่ 9 การบดให้เป็นผง พบประเด็นสำคัญดังต่อไปนี้

- การใช้ครกบดยาบดให้เป็นผงด้วยมือนั้น อาจจะทำให้อนุภาคกระจายตัวสม่ำเสมอน้อยกว่าการใช้เครื่องจักรสำหรับบดโดยเฉพาะ เช่น เครื่องบดแบบหมุนประเภท Ball mill เป็นต้น
- หลังจากการบดเป็นผงแล้วนำไปชั่งน้ำหนักได้ 7.643 g และ 7.985 g น้อยกว่าน้ำหนักที่ได้จากการคำนวณคือ 10 g ซึ่งน่าจะเกิดจากตะกอนส่วนหนึ่งที่จับตัวอยู่ที่ก้นภาชนะ หรือมวลส่วนหนึ่งอาจกระเด็นออกมาจากภาชนะเนื่องจากการใช้ความเร็วรอบในการกวนสารที่สูงเกินไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5.2 บทวิจารณ์ระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์

### 5.2.1 ระบบเครื่องกลไก (Hardware)

ระบบเครื่องกลไกที่ออกแบบขึ้นมาในงานวิจัยนี้พบประเด็นที่น่าสนใจที่ต้องพิจารณา โดยแยกออกเป็นส่วนต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

#### 5.2.1.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิ

ระบบควบคุมอุณหภูมิในงานวิจัยนี้ถือว่ามีลักษณะเป็นระบบกึ่งอัตโนมัติ กล่าวคือ สามารถควบคุมระดับอุณหภูมิให้เป็นไปตามที่กำหนดได้แต่ไม่สามารถกำหนดลำดับการทำงานได้ ผู้ปฏิบัติการจำเป็นต้องเปิดปิดการทำงานและปรับค่าอุณหภูมิที่ต้องการที่ตัวเครื่องเพื่อให้ระบบทำงานได้ตามที่ต้องการ ทั้งนี้เนื่องจากว่าเครื่องกวนสารระบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นทำความร้อนจำนวน 2 เครื่องที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการนั้นไม่สามารถส่งข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าอุณหภูมิออกไปยังอุปกรณ์อื่นๆ เช่น ส่งสัญญาณในรูปแบบสัญญาณอนาล็อกไปยังอุปกรณ์ PLC หรือสัญญาณข้อมูลผ่านพอร์ต RS232 ไปยังอุปกรณ์จำพวกไมโครคอมพิวเตอร์ได้

ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้จากระบบควบคุมอุณหภูมิในงานวิจัยนี้สามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

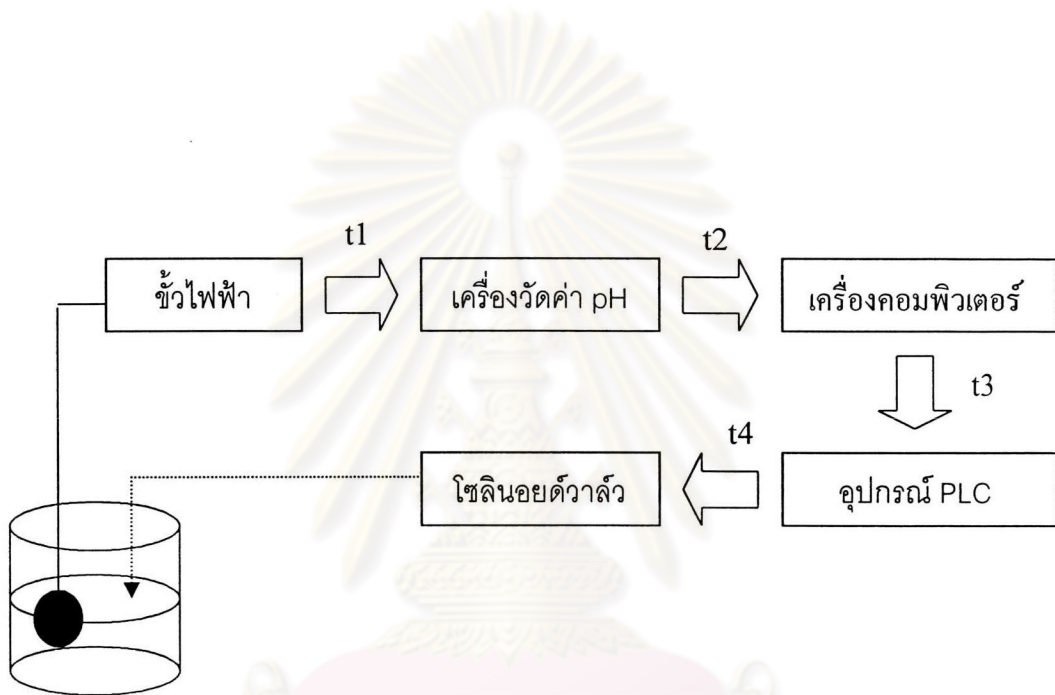
- สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ RTD จะทำให้ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัดเกิดความผิดพลาด ซึ่งอาจเกิดจากการส่งสัญญาณจากปลายของแท่งวัดผ่านสายไฟไปยังส่วนควบคุม ซึ่งหากว่าสายไฟมีขนาดยาวเกินไปก็จะมีผลให้เกิดสัญญาณรบกวนมากขึ้นเท่านั้น
- การควบคุมอุณหภูมิภายในห้องที่ไม่มีเสถียรภาพ เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้อุณหภูมิในระบบการผลิตเกิดการแกว่ง
- ความไม่เป็นเชิงเส้นในการวัดของอุปกรณ์ RTD อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้
- จุดที่วัดอุณหภูมินั้นมีอยู่เพียงจุดเดียวในภาชนะปฏิกรณ์ ซึ่งโดยปกติแล้วอุณหภูมิในแต่ละจุดจะมีค่าไม่เท่ากัน ยกตัวอย่างเช่น สารละลายที่บริเวณก้นภาชนะปฏิกรณ์จะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าสารละลายที่อยู่ระดับผิวด้านบน เพราะว่ายูใกล้กับแหล่งให้ความร้อนมากกว่า ดังนั้น การใช้แท่งกวนแม่เหล็กกวนในอัตราเร็วรอบที่เหมาะสมจะช่วยให้อุณหภูมิของสารละลายมีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น ในจุดนี้จำเป็นต้องมีการคำนึงถึงอย่างมากในการ

ออกแบบระบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งอาจจะต้องมีการตรวจวัดอุณหภูมิหลายๆ จุดแล้วนำไปหาค่าเฉลี่ย และมีกลไกที่ทำให้สารละลายเกิดการไหลเวียนเพื่อให้มีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอในกระบวนการผลิต

### 5.2.1.2 ระบบควบคุมค่า pH

ระบบควบคุมค่า pH ที่ได้จากการออกแบบนี้มีลักษณะเป็นระบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบซึ่งมีความสามารถในการควบคุมค่า pH ให้คงที่ได้แม่นยำในระดับหนึ่งเนื่องจากการออกแบบได้ใช้หลักการการคำนวณทางเคมีเข้ามาประยุกต์เพื่อให้สามารถควบคุมค่า pH ได้อย่างถูกต้องตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม ยังมีความผิดพลาดหรือประเด็นบางอย่างที่น่าสนใจเกี่ยวกับการออกแบบระบบควบคุมค่า pH ที่ควรต้องพิจารณาดังต่อไปนี้

- เนื่องจากภาชนะปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นบีกเกอร์ซึ่งมีปากสำหรับเทสาร ซึ่งในการปิดด้วยฝาอาจยังคงมีรูรั่วอยู่บางส่วน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการแก้ไขโดยตัดยางขนาดเล็กมาแปะทับฝาของบริเวณที่ต้องอุดรูรั่วบริเวณปากของบีกเกอร์ ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ
- เครื่องวัดค่า pH ที่สามารถส่งข้อมูลผ่านพอร์ต RS232 ไปยังอุปกรณ์เชื่อมต่ออื่นๆ ได้นั้นมีอยู่เพียงเครื่องเดียว ดังนั้นสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์อีกหนึ่งใบจำเป็นต้องดำเนินการปรับค่าด้วยมือ อย่างไรก็ตามมิได้ทำให้ความสามารถในการควบคุมค่า pH ของระบบลดลงเท่าใดนัก เนื่องจากภาชนะปฏิกรณ์ที่ต้องปรับค่าด้วยมือดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพียงเพื่อปรับสภาพ pH ของสารละลายตั้งต้นได-แอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟตก่อนที่จะนำไปผสมเพื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายตั้งต้นตัวอื่นๆ
- ข้อกำหนดสมมติฐานทั้ง 9 ข้อของการออกแบบระบบควบคุม pH ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 3 แล้วนั้นเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นในการควบคุม
- ในการรับส่งสัญญาณค่า pH จากขั้วไฟฟ้าไปจนถึงอุปกรณ์ควบคุมนั้น เมื่อลองพิจารณาให้ดีจะพบว่าสัญญาณจะเกิดการหน่วงขึ้นในแต่ละลำดับขั้นของการส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ต่างๆ จึงทำให้เกิดเวลาล่าช้าขึ้นดังแสดงไว้เป็นแผนภาพในรูปที่ 5.1 ทั้งนี้อุปกรณ์แต่ละอย่างจะมีอัตราการส่งข้อมูลจำกัดอยู่ที่ค่าหนึ่งๆ เมื่อรวมเวลาหน่วงทั้งหมดในระบบควบคุมค่า pH แล้วพบว่าเวลาหน่วงดังกล่าวเป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลทำให้การควบคุมเกิดความผิดพลาดขึ้นได้เนื่องจากค่า pH ของสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ต้องการควบคุมนั้นเปลี่ยนแปลงตามเวลา



รูปที่ 5.1 แผนภาพการรับส่งข้อมูลค่า pH ในระบบควบคุมค่า pH

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.2.1.3 ระบบควบคุมอัตราการเติมผสมสารตั้งต้น

ระบบควบคุมอัตราการเติมผสมสารตั้งต้นในงานวิจัยนี้ถือว่ามีควมสม่ำเสมอและแม่นยำ อีกทั้งยังดำเนินการได้ในลักษณะอัตโนมัติเต็มรูปแบบเนื่องจากใช้ปั๊มที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ยังเกิดปัญหาในการถูกรบกวนของอุปกรณ์ตรวจวัดระดับตามที่กำหนดจากแท่งกวนแม่เหล็กดังที่เคยได้กล่าวถึงแล้ว การแก้ปัญหาโดยการเลื่อนระยะความสูงที่ตรวจวัดของอุปกรณ์ตรวจวัดระดับนั้นช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ได้ แต่การสอบเทียบปริมาตรที่เหลือกับเวลาที่กำหนดให้ปั๊มทำงานต่อนั้นอาจเกิดความผิดพลาดขึ้นได้เนื่องจากของเหลวถูกกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก จึงอาจทำให้ระดับของเหลวเกิดการกระเพื่อม ทำให้อุปกรณ์ตรวจวัดระดับส่งสัญญาณเพื่อเริ่มต้นจับเวลาหน่วยที่ไม่พอดีกับปริมาณสารละลายที่เหลืออยู่ ซึ่งอาจจะเป็นผลให้อัตราส่วนโมลของสารละลายเปลี่ยนไปถ้าปั๊มตัดการทำงานก่อนสารละลายที่เหลือจะผสมกันจนหมด ทั้งนี้อาจพัฒนาโดยการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดในรูปแบบอื่นๆ ซึ่งมีความแม่นยำและเหมาะสมมากกว่านี้

### 5.2.2 ระบบอุปกรณ์ควบคุมและซอฟต์แวร์ (Software)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าอุปกรณ์ควบคุมลำดับการทำงานที่ใช้คืออุปกรณ์ PLC ซึ่งสามารถติดต่อกับคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์แสดงผลข้อมูลอื่นๆ ได้จากพอร์ต RS232 จึงมีความสะดวกในการใช้งานเนื่องจากสามารถติดต่อรับส่งข้อมูลที่ประมวลจากเครื่องคอมพิวเตอร์ไปใช้ในการออกคำสั่งกับอุปกรณ์ปฏิบัติการต่างๆ ได้สะดวกยิ่งขึ้น กล่าวคือ ในการดำเนินงานสามารถทำได้โดยเขียนลำดับการทำงานอยู่ในรูปแบบแผนภาพแลดเดอร์ลงในโปรแกรมซอฟต์แวร์ของอุปกรณ์ PLC ซึ่งจะถูกบันทึกลงไปหน่วยความจำของอุปกรณ์ PLC และสร้างส่วนโปรแกรมที่รับส่งและแสดงผลให้กับผู้ใช้งานเพื่อติดต่อกับซอฟต์แวร์ที่เชื่อมโยงการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ PLC

### 5.3 บทวิจารณ์ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบอัตโนมัติ

#### 5.3.1 น้ำหนักของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้จากการผลิตในงานวิจัย

จากผลของน้ำหนักของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 จะพิจารณาได้ว่าการนำระบบอัตโนมัติเข้ามาใช้ควบคุมปัจจัยในการผลิตจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการผลิตสูงขึ้นเกินกว่า 10% ทั้งนี้เนื่องจากระบบการผลิตแบบอัตโนมัตินั้นสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ได้ค่อนข้างแม่นยำและคงที่ อีกทั้งยังทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตนั้นมีความสม่ำเสมอและทั่วถึงมากกว่าระบบการผลิตที่ควบคุมด้วยผู้ปฏิบัติการ เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างสมบูรณ์และเป็นไปตามทฤษฎีมากยิ่งขึ้น จึงได้น้ำหนักของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ใกล้เคียงกับน้ำหนักที่คำนวณจากทฤษฎีหรือกำลังการผลิตที่กำหนดขึ้น

นอกจากเหตุผลด้านการควบคุมปัจจัยการผลิตแล้ว การเติมสารละลายแอมโมเนียเพื่อรักษาระดับค่า pH จะเป็นการช่วยให้โมเลกุลของไฮดรอกไซด์ไอออนที่แตกตัวจากสารละลายแอมโมเนียมีปริมาณพอเพียงกับความต้องการใช้ในปฏิกิริยา ซึ่งในการผลิตที่ควบคุมด้วยมือในงานวิจัยนี้ได้คำนวณปริมาณของสารละลายแอมโมเนียที่ต้องใช้ในปฏิกิริยาไว้พอดีตามทฤษฎีซึ่งอาจจะมีปริมาณของสารละลายแอมโมเนียบางส่วนระเหยกลายเป็นไอทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ตามทฤษฎีที่คำนวณไว้ จึงทำให้ประสิทธิภาพการผลิตของระบบที่ควบคุมด้วยมือน้อยกว่าระบบควบคุมอัตโนมัติ

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในส่วนของการผลิตที่ควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติในแต่ละสภาวะนั้นพบว่าโดยรวมแล้วที่สภาวะที่ 2 นั้นให้ประสิทธิภาพในการผลิตที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะอื่นๆ ทั้งนี้ให้ลองพิจารณาสมการเคมีที่ (2.20) ซึ่งเป็นสมการสมดุลเคมีของสารละลายแอมโมเนีย กล่าวคือ



จากทฤษฎีเกี่ยวกับค่าคงที่ของการแตกตัวของแอมโมเนีย ( $K_b$ ) ในบทที่ 2 จะพบว่าค่า  $pK_b$  มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นั่นคือค่า  $K_b$  จะเพิ่มขึ้นตามค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เป็นผลให้โมเลกุลของแอมโมเนียในสมการที่ (2.20) แตกตัวเป็นแอมโมเนียมไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มขึ้น อีกทั้งสภาวะที่ 2 นั้นเป็นสภาวะที่ใกล้เคียงกับการเกิดปฏิกิริยาแบบ Stoichiometric ของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์มากขึ้น จึงทำให้ปฏิกิริยาในสภาวะที่ 2 เกิดได้สมบูรณ์แบบกว่าปฏิกิริยาในสภาวะที่ 1 อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาตามเหตุผลดังกล่าว ปฏิกิริยาในสภาวะที่ 3 ก็น่าจะมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าปฏิกิริยาในสภาวะที่ 2 แต่กลับกลายเป็นว่าประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อยเมื่อ



เทียบกับปฏิกิริยาในสภาวะที่ 2 ทั้งนี้วิเคราะห์สาเหตุได้ว่า ที่สภาวะที่ 3 ซึ่งเป็นสภาวะที่ใช้ อุณหภูมิในการผลิตถึง 90 °C สังเกตได้ว่าสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์เริ่มเดือดและมีการ กลายเป็นไออย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังมีความดันก๊าซเหนือระดับสารละลายที่สูง จึงมีความเป็นไปได้ ว่ามีก๊าซแอมโมเนียปริมาณหนึ่งซึ่งมีนัยสำคัญระเหยออกมาจากสารละลาย จากการพิจารณา สมการที่ (2.20) เมื่อก๊าซแอมโมเนียระเหยออกไป ปริมาณที่นำไปใช้ในการแตกตัวเป็น แอมโมเนียมไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนจะลดลง ซึ่งสังเกตได้จากการลดลงอย่างรวดเร็วของ ค่า pH และการจ่ายสารละลายแอมโมเนียจากภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ในปริมาณที่เยอะกว่าใน สภาวะการผลิตอื่นเป็นอย่างมาก ความไม่สมบูรณ์ของปฏิกิริยาจึงเป็นเหตุผลสำคัญอย่างหนึ่ง ที่ทำให้สภาวะที่ 3 มีประสิทธิภาพน้อยกว่าสภาวะที่ 2 เล็กน้อย

อีกประเด็นหนึ่งที่มีความสำคัญคือความบริสุทธิ์สารตั้งต้น กล่าวคือผงแคลเซียม ไนเตรตที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผงที่มีน้ำเจือปนอยู่ โดยเขียนเป็นสูตรเคมีได้คือ  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  นั่นคือผงแคลเซียมไนเตรต 1 โมเลกุลจะมีโมเลกุลของน้ำเกาะอยู่ 4 โมเลกุล ถึงแม้ว่าการคำนวณ ในงานวิจัยนี้จะได้คำนวณโดยเผื่อปริมาณของน้ำเข้าไปด้วยแล้ว แต่อาจจะเกิดความคลาดเคลื่อน ของปริมาณโมลของแคลเซียมไนเตรตจริงๆที่ต้องใช้ในปฏิกิริยาในระหว่างการชั่งน้ำหนักของ สารเคมีเนื่องจากผงแคลเซียมไนเตรตที่มีโมเลกุลของน้ำเกาะอยู่นั้นอาจจะมีน้ำหนักที่ไม่แน่นอน อันอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำไปมาระหว่างของเหลวกับไอ อีกทั้งโมเลกุลของน้ำ ตามสูตรเคมีซึ่งมี 4 โมเลกุลสำหรับผงแคลเซียมไนเตรต 1 โมเลกุล นั้นเป็นเพียงค่าเฉลี่ยโดยรวม เท่านั้น ปริมาณของน้ำที่เกาะอยู่ที่ผงอาจจะกระจายอยู่อย่างไม่สม่ำเสมอ ประเด็นดังกล่าวนี้เป็น ส่วนหนึ่งที่จะทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ในปฏิกิริยาขึ้นได้

จากความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในการผลิต (น้ำหนักที่หายไปเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ คำนวณได้จากทฤษฎี) นอกเหนือจากความไม่สมบูรณ์ของปฏิกิริยาซึ่งเป็นสาเหตุหลักแล้ว สามารถวิเคราะห์หาสาเหตุอื่นๆ ได้ดังต่อไปนี้

- 1) เมื่อวิเคราะห์จากกระบวนการผลิตจะพบว่าเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นจนเสร็จสิ้นแล้ว สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเริ่มตกตะกอนนอนที่ก้นภาชนะปฏิกรณ์ ซึ่งค่อนข้างมีความ หินดีและชัน เมื่อนำภาชนะปฏิกรณ์ไปเทยังกรวยกรองเพื่อกรองตะกอน จะมี ตะกอนชั้นบางส่วนติดค้างอยู่ที่ก้นภาชนะ และไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำกลั่น เพียงอย่างเดียวเพื่อให้ตะกอนหลุดออกมา จำเป็นต้องมีการขัดหรือถูเพื่อให้ ตะกอนส่วนนั้นหลุดออกมาได้ จึงถือได้ว่าตะกอนส่วนที่ติดค้างอยู่นี้เป็นความ เสี่ยงที่มีนัยสำคัญส่วนหนึ่ง
- 2) ในขั้นตอนการบดสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ให้เป็นผงซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการบด ด้วยครกบดยา (บดด้วยมือ) ผงเมื่อผ่านการบดด้วยครกบดยา จะเกาะแน่นอยู่ที่

เนื้อหาของกระดาษของครก ผงส่วนที่เกาะนี้จำเป็นต้องมีการขูดออกให้หมด อย่างไรก็ตาม อาจยังมีผงบางส่วนที่ยังติดค้างอยู่และยากแก่การขูดออก ต้องนำไปล้างน้ำ แล้วใช้แผ่นขัดขัดออก ปริมาณสารส่วนที่สูญเสียไปนี้ถึงแม้ว่าจะมีไม่มากนัก แต่หากว่าดำเนินการผลิตในระดับกำลังการผลิตในอุตสาหกรรมซึ่งมีกำลังการผลิตสูงๆ นั้นจำเป็นต้องมีการออกแบบวิธีการบดที่คำนึงถึงความสูญเสียในส่วนนี้ด้วย

### 5.3.2 การควบคุมปัจจัยอุณหภูมิและค่า pH ในกระบวนการผลิต

#### 5.3.2.1 การพิจารณาแนวโน้มของค่าปัจจัยที่ต้องการควบคุมตลอดทั้งกระบวนการผลิต

จากการพิจารณารูปผลการดำเนินงานในรูปที่ 4.4 - 4.9 ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มของการควบคุมปัจจัยอุณหภูมิและค่า pH ที่เกิดขึ้นตลอดทั้งกระบวนการ โดยรวมแล้วช่วงที่มีการควบคุมอุณหภูมินั้นเริ่มต้นจากขั้นตอนที่ 1 ไปสิ้นสุดที่ขั้นตอนที่ 4 และช่วงที่มีการควบคุมค่า pH นั้นเริ่มต้นจากขั้นตอนที่ 1 ไปจนถึงสิ้นสุดกระบวนการในขั้นตอนที่ 5 อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนที่ 1 ถือว่าเป็นขั้นตอนที่ปรับสภาพปัจจัยของสารละลายเพื่อให้เข้าสู่สมดุล จึงไม่นำไปพิจารณาในการวิเคราะห์ความสามารถในการควบคุมปัจจัย

เวลาที่ใช้ในขั้นตอนที่ 1 ของกระบวนการในแต่ละสภะนั้นจะถูกกำหนดโดยค่าอุณหภูมิ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายตั้งต้นให้ได้ตามต้องการนั้นทำได้โดยการให้ความร้อนแก่สารละลายด้วยอัตราการให้ความร้อนของฮีตเตอร์ที่จำกัด ในขณะเดียวกัน การปรับค่า pH ในตอนเริ่มต้นนั้นสามารถคำนวณปริมาณสารละลายแอมโมเนียที่ต้องเติมเพื่อให้ได้ค่า pH ตามต้องการแล้วจึงเติมสารละลายแอมโมเนียในปริมาณตามที่คำนวณได้ ทำให้การปรับสภาพค่า pH เข้าสู่ระดับควบคุมได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นเวลาที่ใช้ในขั้นตอนที่ 1 จะขึ้นอยู่กับระดับอุณหภูมิที่กำหนด ยิ่งกำหนดอุณหภูมิควบคุมสูงมากขึ้นเท่าใด ยิ่งต้องใช้เวลามากขึ้นเท่านั้น

การควบคุมค่า pH ในสภาวะที่ 3 นั้นพบว่าค่า pH จะไม่สามารถควบคุมให้เป็นไปตามที่กำหนดได้ในช่วงปลายของขั้นตอนที่ 4 ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ โดยค่า pH มีแนวโน้มที่ลดลงในช่วงแรกจนถึงค่าหนึ่งแล้วจึงปรับตัวสูงขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า ที่สภาวะการผลิตที่กำหนดอุณหภูมิสูง สารละลายแอมโมเนียบางส่วนจะเกิดการระเหยเป็นก๊าซแอมโมเนีย ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนที่ได้จากการแตกตัวของแอมโมเนียและน้ำนั้นลดลงอย่างรวดเร็ว จำเป็นต้องเติมสารละลายแอมโมเนียเข้าไปชดเชยในปริมาณมาก อย่างไรก็ตาม ความจุของภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ซึ่งบรรจุสารละลายแอมโมเนียนั้นจำกัดเพียงแค่ว่า

500 ml เท่านั้น จึงไม่เพียงพอในการจ่ายเพื่อควบคุมค่า pH ให้คงที่ได้ตลอดทั้งกระบวนการ จึงทำให้กระบวนการไม่สามารถควบคุมค่า pH ได้ตั้งแต่ช่วงปลายของขั้นตอนที่ 4 เป็นต้นไป

### 5.3.2.2 การพิจารณาถึงความสามารถในการควบคุมปัจจัยที่กำหนดตลอดช่วงการควบคุมในกระบวนการผลิต

การพิจารณาในส่วนนี้จะพิจารณาเฉพาะช่วงที่มีการควบคุมปัจจัยแต่ละอย่างตลอดทั้งช่วง และจะไม่นำขั้นตอนที่ 1 มาพิจารณาเนื่องจากเป็นช่วงของการปรับเข้าสู่ระดับควบคุม ทั้งนี้จะต้องพิจารณากราฟผลการดำเนินงานในรูปที่ 4.10 – 4.15 ประกอบกับตารางที่ 4.3 – 4.6 ซึ่งเป็นตารางค่าวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัยที่ควบคุมและความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยที่ค่าความผิดพลาดนี้เป็นค่าผลต่างของค่าที่วัดได้จริงกับค่าที่กำหนดในการควบคุมปัจจัย

เมื่อพิจารณาปัจจัยอุณหภูมิแล้วพบว่า ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในทุกสภาวะการผลิตมีค่าใกล้เคียงกับค่าควบคุมที่กำหนดขึ้น แต่จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อลองพิจารณาจากกราฟจะพบว่าความแปรปรวนที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวก็น่าจะมีสาเหตุมาจากขั้นตอนที่ 2 เป็นหลัก และเกิดจากความแปรผันของอุณหภูมิในขั้นตอนที่ควบคุมอื่นๆ เล็กน้อย ซึ่งในส่วนนี้จำเป็นต้องวิเคราะห์แยกแต่ละกระบวนการอีกครั้งหนึ่งในหัวข้อถัดไป

เมื่อพิจารณาปัจจัยค่า pH แล้วพบว่า การควบคุมค่า pH ในสภาวะการผลิตที่ 1 และ 2 นั้นค่าเฉลี่ยของค่า pH มีค่าใกล้เคียงกับค่ากำหนดของ pH ที่ต้องการควบคุมในแต่ละสภาวะ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแตกต่างกันไม่มากนัก ในขณะที่สภาวะการผลิตที่ 3 นั้นถือว่าเกิดความผิดปกติขึ้นเนื่องจากค่าเฉลี่ยของค่า pH ที่วัดได้กับค่ากำหนดของ pH ที่ต้องการควบคุมนั้นแตกต่างกันมากอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาจากกราฟแล้วจึงพบว่าเกิดขึ้นจากความผิดพลาดในการควบคุมในช่วงปลายขั้นตอนที่ 4 ซึ่งเกิดปัญหาสารละลายแอมโมเนียในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ถูกใช้จนหมดและมีปริมาณไม่เพียงพอกับความต้องการเนื่องจากความจุของภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 มีอยู่จำกัด

### 5.3.2.3 การพิจารณาถึงความสามารถในการควบคุมปัจจัยที่กำหนดในแต่ละขั้นตอน

เมื่อลองพิจารณาแยกในแต่ละขั้นตอน จะพิจารณาได้จากค่าวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลปัจจัยที่ควบคุมที่แยกคิดในแต่ละขั้นตอน ประกอบกับการพิจารณาแนวโน้มจากกราฟ ทั้งนี้เนื่องจากในขั้นตอนที่ 2 นั้นเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลาน้อยแต่มีความสำคัญมากเพราะเป็นขั้นตอนการเติมผสมให้เกิดปฏิกิริยาซึ่งน่าจะมีความแปรปรวนของค่าปัจจัยมากที่สุดในรอบดาขั้นตอนที่มี

การควบคุมปัจจัยคงที่ (ยกเว้นขั้นตอนที่ 1) จึงต้องมีการแยกออกมาพล็อตใหม่ให้เกิดความชัดเจนยิ่งขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงการควบคุมอุณหภูมิ จะพบว่าที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  นั้น แต่ละขั้นตอนถือว่ามีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับค่ากำหนดในการควบคุม และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  และ  $90^{\circ}\text{C}$  นั้นเมื่อพิจารณากราฟประกอบจะเห็นได้ชัดเจนว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของขั้นตอนที่ 3 และ 4 ใกล้เคียงกับค่ากำหนดในการควบคุมแต่ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในขั้นตอนที่ 2 ลดลงตามลำดับ ทั้งนี้วิเคราะห์ได้ว่าในขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนในการผสมสารตั้งต้นให้เกิดปฏิกิริยา จะมีการดึงเอาสารละลายแอมโมเนียที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องมาใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สภาวะที่ 3 ซึ่งกำหนดอุณหภูมิควบคุมที่  $90^{\circ}\text{C}$  อีกทั้งยังต้องใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นจำนวนมากในขั้นตอนที่ 2 นี้ จึงทำให้อุณหภูมิของของผสมลดลง หลังจากที่อุณหภูมิลดลง ฮีตเตอร์ซึ่งควบคุมด้วยพีซีลอคจิกจะพยายามปรับปริมาณความร้อนที่ให้อุ่นขึ้นทำให้อุณหภูมิเริ่มเพิ่มสูงขึ้นในช่วงปลายของขั้นตอนที่ 2

เมื่อพิจารณาถึงการควบคุมค่า pH จะสังเกตเห็นได้จากกราฟและค่าวิเคราะห์ทางสถิติประกอบกันว่าในขั้นตอนที่ 2 เกือบทุกสภาวะมีแนวโน้มที่จะมีค่าเฉลี่ยของค่า pH ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยในขั้นตอนอื่นๆ อีกทั้งยังมีความแปรผันที่มากกว่าขั้นตอนอื่นๆ ด้วย (ทั้งนี้ไม่รวมถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นในการควบคุมค่า pH ในขั้นตอนที่ 4 และ 5 ของสภาวะที่ 3) เป็นเพราะว่าในขั้นตอนที่ 2 มีอัตราการใช้ไฮดรอกไซด์ไอออนในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าขั้นตอนอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญจึงทำให้การควบคุมซึ่งมีข้อจำกัดในด้านระยะเวลาของวงรอบการส่งข้อมูลนั้นไม่สามารถตอบสนองต่อค่า pH ที่ลดลงได้ดีเท่ากับการตอบสนองต่อการลดลงของค่า pH ในขั้นตอนอื่นๆ จึงทำให้ค่าเฉลี่ยของค่า pH ในขั้นตอนที่ 2 น้อยกว่าค่าเฉลี่ยของค่า pH ในขั้นตอนอื่นๆ และมีการแกว่งของข้อมูลมากกว่าซึ่งจะเป็นผลให้เกิดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มากกว่าด้วย

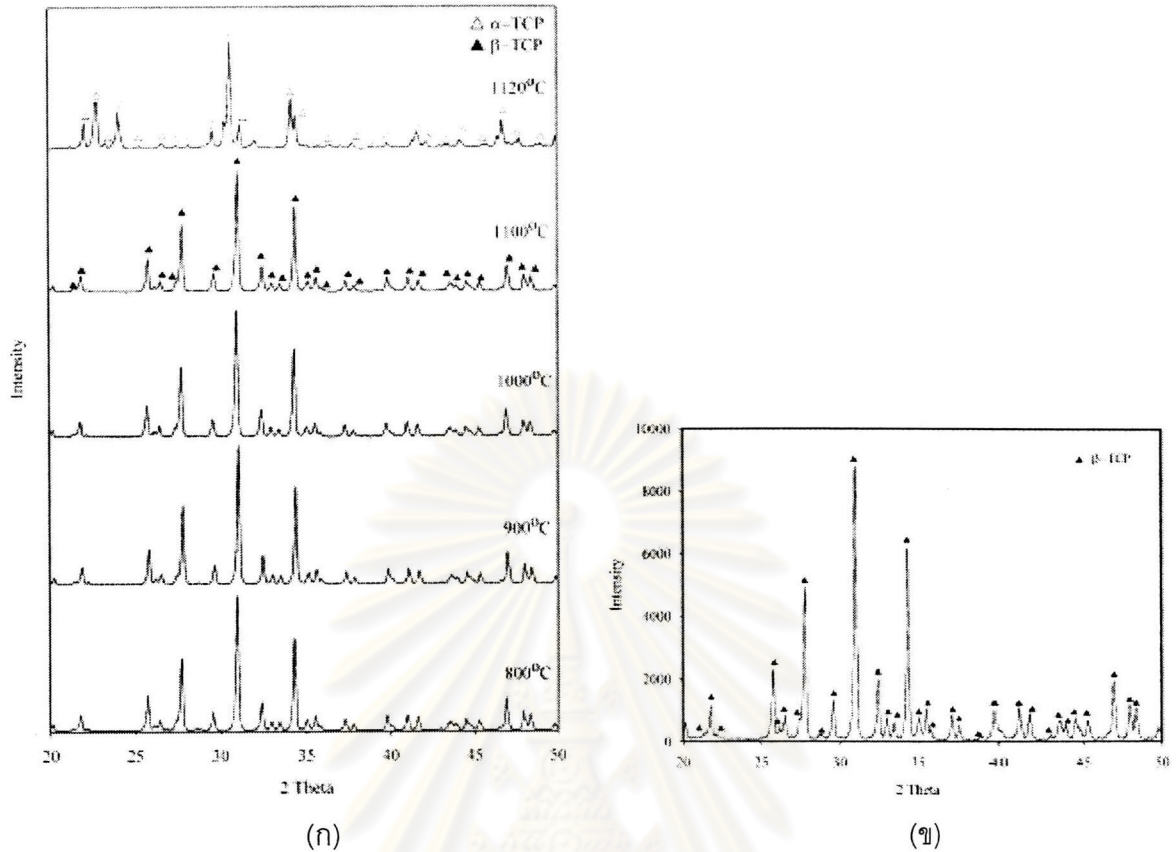
การพิจารณาถึงความสามารถของกระบวนการโดยรวมในช่วงที่มีการควบคุมปัจจัยและในแต่ละช่วงนั้นสามารถมองเห็นภาพได้ง่ายขึ้นเมื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.11 และ 4.12 พบว่าโดยรวมแล้วการควบคุมค่าอุณหภูมิและค่า pH ของระบบอัตโนมัติที่สร้างขึ้นนี้ถือได้ว่ามีประสิทธิภาพในการควบคุมเป็นอย่างดีโดยวัดได้จากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ต่ำซึ่งมีค่าอยู่ราวๆ ไม่เกิน 1% อย่างไรก็ตาม มีเพียงที่สภาวะที่ 3 เท่านั้นที่ถือว่าย่างควบคุมไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากข้อจำกัดของระบบอัตโนมัติทำให้การควบคุมอุณหภูมิที่สภาวะที่ 2 เกิดความผิดพลาดค่อนข้างมาก (ประมาณ 5%) และการควบคุมค่า pH หลังจากสภาวะที่ 4 เกิดความผิดพลาดมาก (ประมาณ 10%) ซึ่งเกิดขึ้นจากเหตุผลดังที่ได้วิเคราะห์ไปแล้ว

## 5.4 บทวิจารณ์ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้จากระบบอัตโนมัติ

### 5.4.1 บทวิจารณ์ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD นั้นจะสามารถแสดงให้เห็นได้ว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่นำไปทดสอบนั้นเป็นผงไฮดรอกซีอะพาไทต์จริงหรือไม่ โดยการพิจารณาจากยอดกราฟที่เกิดขึ้นในแต่ละยอดว่าเกิดที่มุม  $2\theta$  ตรงกันกับยอดอ้างอิงมาตรฐานซึ่งเป็นของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) หรือไม่ ซึ่งผลปรากฏว่าทั้งผงที่สังเคราะห์ด้วยระบบปฏิบัติการควบคุมและระบบอัตโนมัตินั้นถือว่ามียอดโดยส่วนใหญ่ตรงกับยอดอ้างอิงมาตรฐานของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ จึงสรุปได้ว่าสารที่ผลิตได้จากทั้งระบบปฏิบัติการควบคุมและระบบอัตโนมัตินี้เป็นสารไฮดรอกซีอะพาไทต์จริง

เมื่อทราบได้ว่าเป็นสารไฮดรอกซีอะพาไทต์แล้ว จะต้องวิเคราะห์ลึกลงไปถึงเฟสที่เกิดขึ้นว่ามีเฟสที่ตรงกันมากน้อยเพียงใด การผลิตในบางสภาวะอาจจะมีเฟสอื่นเข้ามาเจือปนอยู่ได้ ซึ่งจะต้องใช้วิธีนำไปเทียบกับยอดอ้างอิงมาตรฐานของสารประกอบชนิดอื่นๆที่น่าสงสัยว่าจะอยู่ในข่ายได้แก่ เฟสของ  $\alpha$ -TCP และ  $\beta$ -TCP ซึ่งยอดอ้างอิงสูงสุดของสองเฟสดังกล่าวคือที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 31 และ 35 องศา ตามลำดับ [11] โดยสามารถพิจารณาได้จากกราฟอ้างอิงในรูปที่ 5.2 จากการพิจารณาจะพบได้ว่าผงที่ได้จากการผลิตในระบบปฏิบัติการควบคุมนั้นเกิดเฟสของ  $\beta$ -TCP ขึ้นที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 31 องศา ในขณะที่ผงที่ได้จากการผลิตในระบบอัตโนมัตินั้นพบว่าผงซึ่งผลิตที่สภาวะที่ 1 นั้นมี  $\beta$ -TCP เกิดขึ้นอยู่ในปริมาณเล็กน้อย ในขณะที่ผงซึ่งผลิตที่สภาวะที่ 2 เริ่มจะมีปริมาณที่น้อยลงจนกระทั่งผงซึ่งผลิตที่สภาวะที่ 3 นั้นไม่พบเฟส  $\beta$ -TCP อีก เช่นเดียวกับผงซึ่งผลิตที่สภาวะที่ 3 แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังนี้สามารถอธิบายได้ว่าปริมาณของ  $\beta$ -TCP ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลโดยตรงมาจากอัตราส่วนโมลของ Ca / P ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมปัจจัยในการผลิตดังเช่นที่ได้ควบคุมในระบบอัตโนมัติของงานวิจัยนี้ จึงกล่าวได้ว่าการควบคุมปัจจัยการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติจะช่วยในการกำหนดเฟสที่เกิดขึ้นของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ ดังกรณีผงตัวอย่างที่ได้จากการผลิตในงานวิจัยนี้ โดยอ้างอิงจากผลการวิจัยของ Raynaud และคณะ [13] ซึ่งพบว่า การควบคุมค่า pH อุณหภูมิ และอัตราส่วนโมล Ca / P ของสารตั้งต้น สามารถกำหนด อัตราส่วนโมล Ca / P ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากการผลิต ในงานวิจัยนี้คาดว่าผงที่ผลิตได้ในสภาวะที่ 1 จะมีอัตราส่วนของ Ca / P อยู่ราวๆ 1.6 ซึ่งจะมีปริมาณของ  $\beta$ -TCP ไม่เกิน 20% ในสภาวะที่ 2 จะสังเคราะห์ได้ปริมาณ  $\beta$ -TCP ที่ลดลง และในสภาวะที่ 3 จะทำให้ได้อัตราส่วนโมล Ca / P ของผงเป็น 1.667พอดี ซึ่งจะมีเพียงเฟสของไฮดรอกซีอะพาไทต์เพียงเฟสเดียวเท่านั้น



รูปที่ 5.2 ยอดกราฟมาตรฐานอ้างอิงของ  $\alpha$ -TCP และ  $\beta$ -TCP

(ก) เฟสของ  $\alpha$ -TCP ที่เปลี่ยนแปลงมาจาก  $\beta$ -TCP ที่เผาที่อุณหภูมิสูงกว่า  $1,100\text{ }^{\circ}\text{C}$

(ข) เฟสของ  $\beta$ -TCP ที่เผาที่อุณหภูมิ  $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$

การพิจารณาอีกประการหนึ่งคือการพิจารณาเกี่ยวกับระดับความเป็นรูปผลึกโดยการนำกราฟ XRD ที่สภาวะต่างๆ มาเปรียบเทียบกัน ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.27 กล่าวคือผงที่มีระดับความเป็นรูปผลึกสูงจะมีลักษณะยอดกราฟที่แหลม สูง และมีฐานที่แคบ ในขณะที่ผงที่มีระดับความเป็นรูปผลึกต่ำจะมีลักษณะยอดกราฟที่เตี้ยและมีฐานกว้าง จากการพิจารณารูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่าสามารถเรียงลำดับระดับความเป็นรูปผลึกได้คือ ผงที่ผลิตได้จากสภาวะที่  $1 < 2 < 3$  และเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมงจะทำให้ระดับความเป็นรูปผลึกสูงที่สุด ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าระบบอัตโนมัติที่มีการควบคุมปัจจัยการผลิตจะสามารถกำหนดระดับความเป็นรูปผลึกของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตออกมาได้

#### 5.4.2 บทวิจารณ์ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR

การวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง FT-IR นั้น (ให้พิจารณารูปที่ 4.28 – 4.32 ประกอบ) จะทำให้ทราบได้ว่าสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตออกมาได้นั้นมีหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบใดบ้าง และยังสามารถพิจารณาระดับความเป็นรูปผลึกได้เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง XRD

ในการวิเคราะห์เลขคลื่น (Wave number) ซึ่งเป็นค่าในแกน X มีค่าตั้งแต่  $400.0\text{ cm}^{-1}$  ถึง  $4000.0\text{ cm}^{-1}$  ในตำแหน่งที่ถูกดูดกลืนจากสารตัวอย่างนั้นทำให้สามารถวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบได้จากมาตรฐานอ้างอิง [25, 26] ซึ่งผลการวิเคราะห์ได้ระบุหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ตามยอดกราฟที่ระบุเลขคลื่นเรียบร้อยแล้ว ประเด็นที่น่าสนใจมีดังต่อไปนี้

- ผงที่ผลิตได้ทั้งจากระบบผู้ปฏิบัติการควบคุมและระบบอัตโนมัติในทุกสภาวะ จะมียอดกราฟซึ่งแสดงถึงหมู่ไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) ที่เลขคลื่น  $632$  และ  $2572\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเป็นสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ และยอดกราฟที่เลขคลื่นบริเวณ  $600$  และ  $1100\text{ cm}^{-1}$  จะแสดงถึงหมู่ฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ )
- หมู่ของไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) ปรากฏให้เห็นอยู่เล็กน้อยที่เลขคลื่นประมาณ  $868\text{ cm}^{-1}$  สำหรับผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ดำเนินการผลิตด้วยระบบผู้ปฏิบัติการควบคุมและระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 1 และ 2 ซึ่งหมู่ของไฮโดรเจนฟอสเฟตนี้มีความสำคัญในการกำหนดอัตราส่วนโมล Ca / P ของผงที่ผลิตได้ ซึ่งผลที่ได้จะสอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ XRD กล่าวคือเมื่อพิจารณาสภาวะการผลิตที่ 1 จะมีหมู่ของไฮโดรเจนฟอสเฟตอยู่ในปริมาณหนึ่ง ในสภาวะการผลิตที่ 2 จะมีปริมาณของหมู่ของไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ลดลง สังเกตได้จากกราฟที่ราบเรียบขึ้นเนื่องจากการดูดซับรังสีได้แดงน้อยลง และเมื่อพิจารณาสภาวะการผลิตที่ 3 (ทั้งที่ยังไม่ได้เผาและนำไปเผาแล้ว) จะไม่พบหมู่ฟังก์ชันนี้เลยโดยสังเกตได้จากยอดกราฟที่หายไป
- ผงที่ผลิตได้ทั้งจากระบบผู้ปฏิบัติการควบคุมและระบบอัตโนมัติในทุกสภาวะ นั้นมีหมู่ฟังก์ชันของน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ปรากฏอยู่ที่เลขคลื่น  $3,430\text{ cm}^{-1}$  และ  $1,630\text{ cm}^{-1}$  สามารถวิเคราะห์ได้ว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตออกมาได้นั้นไม่ได้นำไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น จึงทำให้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ดูดความชื้นในบรรยากาศเข้าไป
- หมู่ฟังก์ชันของคาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) ปรากฏให้เห็นในผงตัวอย่างทั้งระบบผู้ปฏิบัติการควบคุมและระบบอัตโนมัติทุกสภาวะที่ยังไม่ได้เผา อยู่ที่เลขคลื่นประมาณ  $1,400\text{ cm}^{-1}$  ทั้งนี้อธิบายได้ว่าเกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่

ในบรรยากาศเข้ามาทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นจนมีส่วนผสมของคาร์บอนเนตเกิดขึ้นเล็กน้อย ซึ่งหมู่ฟังก์ชันนี้จะหายไปเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ XRD ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งผลิตในสภาวะที่ 3 โดยผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.32

การวิเคราะห์ระดับความเป็นรูปผลึกสามารถพิจารณาได้จากลักษณะของยอดกราฟ เช่นเดียวกับกราฟที่ได้จากเครื่อง XRD กล่าวคือ ยอดกราฟจะแหลมขึ้นและมีฐานที่แคบขึ้นเมื่อระดับความเป็นรูปผลึกมีค่ามากขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.28 - 4.32 จะพบว่าระดับความเป็นรูปผลึกสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้คือ สภาวะที่ 1 < สภาวะที่ 2 < สภาวะที่ 3 และเมื่อนำสภาวะที่ 3 ไปเผาจะทำให้ได้ระดับความเป็นรูปผลึกสูงที่สุด ซึ่งผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับผลที่วิเคราะห์ได้จากเครื่อง XRD

## 5.5 บทวิจารณ์ผลการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง PSLA ดังรูปที่ 4.33 – 4.37 และผลวิเคราะห์ทางสถิติจากรายที่ 4.13 จะกล่าวได้ว่าโดยรวมแล้วขนาดอนุภาคที่ได้จากการผลิตในงานวิจัยนี้นั้นมีขนาดค่อนข้างใหญ่อีกทั้งมีพิสัยที่กว้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของอนุภาคที่วัดได้นั้นเป็นของอนุภาคย่อยที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอีกทีหนึ่ง กล่าวคือยังไม่ใช่ผลึกที่แท้จริง ขนาดของอนุภาคในลักษณะนี้ขึ้นกับวิธีการบดผงไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยตรงในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการบดผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยครกบดยาซึ่งต้องดำเนินการบดด้วยมือทั้งกระบวนการผลิตในระบบผู้ปฏิบัติการควบคุมและระบบอัตโนมัติ จึงเป็นสาเหตุของผลการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้นดังกล่าว

เมื่อลองพิจารณาค่าวิเคราะห์ทางสถิติต่างๆ เกี่ยวกับแนวโน้มของขนาดโดยรวมจากการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบอัตโนมัติจะพบว่าจากสภาวะที่ 1 ถึง สภาวะที่ 3 ขนาดของอนุภาคนั้นมีแนวโน้มเล็กลงและเมื่อนำผงที่ผลิตที่สภาวะที่ 3 ไปเผาจะยิ่งทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าที่เคยผลิตได้มีจำนวนมากขึ้น ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้จากค่า  $D(v,0.1)$  ซึ่งจะทำให้มองเห็นภาพได้ชัดเจน

เมื่อลองวิเคราะห์ถึงสาเหตุของแนวโน้มของขนาดที่ลดลงดังกล่าว จะพิจารณาได้ว่าเมื่อระดับความเป็นรูปผลึกสูงขึ้น (เรียงลำดับดังนี้คือ สภาวะที่ 1 < สภาวะที่ 2 < สภาวะที่ 3 < สภาวะที่ 3 เมื่อผ่านการเผา) ลักษณะความเป็นรูปผลึกจะมีความชัดเจนยิ่งขึ้น อนุภาคจึงมีลักษณะเป็นรูปพุ่มมากขึ้นจึงทำให้แตกตัวออกเป็นอนุภาคที่เล็กกว่าได้ง่ายขึ้น ในขณะที่รูปผลึกที่



เป็นอสัณฐาน (Amorphous) มากจะมีรูปผลึกที่ไม่แน่นอน จึงทำให้เกิดรูพรุนที่น้อยกว่าและแตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ ได้ยากกว่า เนื่องจากจะจับตัวกันเป็นก้อน ทั้งนี้ควรต้องดูลักษณะรูปทรงจากผลวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่องมือ SEM ประกอบการพิจารณาด้วย

## 5.6 บทวิจารณ์ผลการศึกษาลักษณะรูปทรง

จากผลวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ SEM ดังรูปที่ 4.38 – 4.42 พบว่าอนุภาคที่เลือกมาเพื่อถ่ายภาพนั้นมีขนาดที่สอดคล้องกับขนาดที่วัดได้จากเครื่องมือ PSLA ในหัวข้อที่แล้ว ซึ่งเมื่อลองเพิ่มกำลังขยายเพื่อตรวจสอบที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคจะพบว่ามีลักษณะคล้ายกลุ่มอนุภาคย่อยเกาะกันอยู่ (กลุ่มอนุภาคย่อยดังกล่าวนั้นยังไม่ใช่ผลึกที่แท้จริง)

จากรูปที่ 4.38 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากการผลิตโดยระบบปฏิบัติการควบคุมนั้นจะพิจารณาได้ว่าพื้นที่ผิวนั้นไม่ค่อยมีความสม่ำเสมอ กล่าวคืออนุภาคย่อยที่มองเห็นนั้นมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอเท่าใดนัก ทั้งนี้อธิบายได้ว่าเนื่องจากไม่ได้มีการควบคุมปัจจัยในการผลิตให้คงที่จึงทำให้ผงที่ได้ออกมานั้นมีลักษณะสมบัติที่ไม่คงที่

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.39 – 4.42 จะพบว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากการผลิตโดยระบบอัตโนมัติ นั้น อนุภาคย่อยที่มองเห็นมีขนาดที่สม่ำเสมอมากกว่า และจะสังเกตได้ว่าขนาดของอนุภาคย่อยมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น (เมื่อเรียงลำดับดังนี้คือ สภาวะที่ 1 < สภาวะที่ 2 < สภาวะที่ 3 < สภาวะที่ 3 ที่ผ่านการเผาแล้ว) และมองเห็นเป็นลักษณะรูปร่างที่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อระดับความเป็นรูปผลึกสูงขึ้นแสดงว่าเกิดการพัฒนาเป็นรูปผลึกที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นจึงแสดงให้เห็นถึงการรวมตัวกันของผลึกเป็นอนุภาคย่อยที่มีความชัดเจนมากขึ้น

ในการเชื่อมโยงประเด็นการวิเคราะห์ด้วย PSLA และ SEM เข้าด้วยกันจะพบว่าผลที่ได้ นั้นมีความสอดคล้องกันกล่าวคือ เมื่อระดับความเป็นรูปผลึกเพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ที่ได้จาก PSLA คือ อนุภาคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้นั้นมีขนาดลดลง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ SEM จะพบว่าเมื่อระดับความเป็นรูปผลึกเพิ่มขึ้นอนุภาคย่อยที่มองเห็นที่พื้นผิวของผงจะมีขนาดเพิ่มขึ้นและมีความชัดเจนยิ่งขึ้นซึ่งก็จะทำให้มีช่องว่างมากขึ้น และทำให้แตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ ได้ง่ายขึ้นดังที่ได้คาดการณ์ไว้ในหัวข้อที่แล้ว

## 5.7 บทวิจารณ์คุณค่าและข้อได้เปรียบของระบบอัตโนมัติในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์

จากผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดที่ผ่านมาสามารถนำมาประเมินคุณค่าของระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับระบบการผลิตแบบปฏิบัติการควบคุมว่ามีข้อได้เปรียบอย่างไรบ้าง โดยสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

### 5.7.1 ประสิทธิภาพในการผลิต

จากผลการทดสอบสามารถบ่งบอกได้ชัดเจนว่าระบบอัตโนมัติจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการผลิตเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระบบอัตโนมัติจะช่วยควบคุมให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้นซึ่งจะทำให้ปริมาณที่ผลิตออกมาได้มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่คำนวณไว้จากทฤษฎีมากขึ้น

### 5.7.2 ประสิทธิภาพในการควบคุมปัจจัย

ระบบอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมปัจจัยการผลิตนั้นจะทำให้สามารถกำหนดลักษณะสมบัติที่สำคัญ 2 ประการได้อย่างแม่นยำ ลักษณะสมบัติดังกล่าวประกอบด้วย

#### 5.7.2.1 องค์ประกอบเฟส

องค์ประกอบเฟสของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้นสามารถพิจารณาได้อีกรูปแบบหนึ่งคือการพิจารณาจากอัตราส่วนโมลของ Ca / P จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโมลของ Ca / P จะทำให้เกิดเฟสที่ช่วยปรับปรุงสมบัติของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ให้ดียิ่งขึ้น โดยเฟสที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากคือ  $\beta$ -TCP ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นในด้านความสามารถในการดูดซึมเข้ากับเนื้อเยื่อ ในขณะที่ไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้นมีคุณสมบัติเด่นในด้านปฏิสัมพันธ์ทางชีวภาพกับเนื้อเยื่อข้างเคียง เมื่อทั้งสองเฟสมาผสมกันจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของพันธะที่ยึดเกาะกับอวัยวะจำพวกเนื้อเยื่อแข็งให้ดียิ่งขึ้น ในการประยุกต์ใช้ทำอวัยวะเทียมในด้านต่างๆ นั้นจำเป็นต้องมีการปรับสัดส่วนคุณสมบัติทั้งสองอย่างตามความเหมาะสมซึ่งจะต้องมีการกำหนดค่าอัตราส่วนโมลของ Ca / P จากการควบคุมปัจจัยนั่นเอง

ยิ่งไปกว่านั้นแล้วหากปราศจากการควบคุมปัจจัยในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ อาจจะทำให้เกิดเฟสบางเฟสที่ไม่พึงประสงค์ขึ้นได้ อาทิเช่น เฟสของ  $\alpha$ -TCP หรือ CaO เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาเฟสไม่พึงประสงค์เหล่านี้จะทำให้สมบัติบางประการของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์แยกลงเช่น สมบัติเชิงกลที่แข็งแรงน้อยลง เป็นต้น

### 5.7.2.2 ระดับความเป็นรูปผลึก (Crystallinity)

ระดับความเป็นรูปผลึก เป็นสิ่งที่บ่งชี้ได้ว่าสารประกอบนั้นมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับรูปผลึกในทางทฤษฎี (Crystalline) มากน้อยเพียงใด ระดับความเป็นรูปผลึกนั้นสามารถกำหนดได้ โดยการควบคุมปัจจัยในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์เช่นเดียวกันกับองค์ประกอบเฟส ความสำคัญของระดับความเป็นรูปผลึกนั้นคล้ายกันกับขององค์ประกอบเฟส กล่าวคือช่วยปรับปรุงสมบัติการใช้งานวัสดุภายในร่างกายมนุษย์ให้ดียิ่งขึ้น ยกตัวอย่างเช่น Tadic และคณะ [7] ได้ระบุว่าสารทดแทนกระดูกควรมีความใกล้เคียงกับกระดูกธรรมชาติ กล่าวคือมีระดับความเป็นรูปผลึกต่ำจะทำให้สมบัติการดูดซึมและเข้ารวมตัวกับกระดูกเป็นไปได้ง่ายขึ้น ซึ่งในการนำวัสดุทางการแพทย์ไปใช้งานนั้นจำเป็นต้องมีการหาจุดที่เหมาะสมระหว่างความสามารถในการละลายกับอายุการใช้งานทางชีวภาพของวัสดุนั้นซึ่งสามารถปรับให้เหมาะสมได้โดยการปรับปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์และระดับความเป็นรูปผลึก จึงกล่าวได้ว่าระดับความเป็นรูปผลึกถือเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องกำหนดเพื่อให้ได้ลักษณะสมบัติของวัสดุในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ในด้านต่างๆ ตามต้องการ

### 5.7.3 กำลังการผลิต

ดังที่ได้ทราบแล้วว่าสารไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้นถือได้ว่าเป็นมีความสำคัญอย่างยิ่งในวงการแพทย์ มีความต้องการใช้งานมากขึ้นเรื่อยๆ การดำเนินการผลิตในระดับอุตสาหกรรมจึงถือได้ว่ามีความจำเป็นในการตอบสนองความต้องการการใช้งานวัสดุให้เพียงพอ เมื่อจำเป็นต้องดำเนินการผลิตในระดับอุตสาหกรรมซึ่งผลิตเป็นจำนวนมาก การควบคุมปัจจัยด้วยระบบผู้ปฏิบัติการควบคุมนั้นถือว่าทำได้ลำบากมากหรืออาจกล่าวได้ว่าแทบเป็นไปไม่ได้เลย ระบบการควบคุมปัจจัยการผลิตที่มีประสิทธิภาพจะยังมีความซับซ้อนมากขึ้นอันเนื่องมาจากข้อกำหนดสมมติฐานบางอย่างไม่สามารถละเลยได้อีกต่อไป อาทิเช่น การใช้อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิเพียงจุดเดียวในระบบขนาดเล็กเพราะถือว่าอุณหภูมิของสารละลายมีค่าสม่ำเสมอทุกจุด ในขณะที่ระบบการผลิตที่ใหญ่ขึ้น อุณหภูมิแต่ละจุดอาจจะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญก็ได้ หรือเมื่อพิจารณาเกี่ยวกับ

ความดันก๊าซภายในระบบใหญ่ จำเป็นต้องมีการออกแบบระบบควบคุมความดันมิให้ความดันในระบบสูงจนเกิดอันตรายขึ้นได้ เป็นต้น จึงกล่าวได้ว่าหากต้องการยกระดับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ให้เป็นรูปแบบอุตสาหกรรม ระบบอัตโนมัติในการผลิตจะมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งที่จะช่วยให้กระบวนการผลิตดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผล

#### 5.7.4 ความปลอดภัยต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน

ในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอนนั้น สารละลายแอมโมเนียถือว่าเป็นสารตั้งต้นที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานหากว่าสูดดมเข้าไปในปริมาณมาก ทั้งนี้ในการสังเคราะห์ด้วยระบบผู้ปฏิบัติการควบคุมนั้นจะต้องดำเนินการผลิตภายในตู้กำจัดกลิ่น ซึ่งจะดูดซับไอระเหยแอมโมเนียไว้ในแผ่นกรองไอระเหยแอมโมเนีย แต่ถ้ากำหนดกำลังการผลิตในปริมาณมากนั้นเป็นที่แน่นอนว่าไม่เหมาะสมเป็นอย่างยิ่งในการควบคุมด้วยผู้ปฏิบัติการ เนื่องจากปริมาณของแอมโมเนียที่ใช้จะยังมีปริมาณมากขึ้นเป็นผลให้เกิดไอระเหยมากขึ้นด้วย ดังนั้นการดำเนินการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติในระบบปิดจึงเป็นความจำเป็นเพื่อลดความเสี่ยงต่ออันตรายที่เกิดขึ้นกับสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย