

การออกแบบระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์



นาย สุรปรีช์ เมาลีกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5741-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A DESIGN OF AUTOMATION SYSTEM FOR HYDROXYAPATITE PRODUCTION

Mr. Surapree Maolikul



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-5741-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์

โดย

นาย สุรปรีช เมาลีกุล


สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

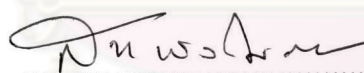
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

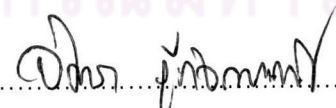

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย วิจิรวินิช)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตรา รุ่งกิจการพานิช)

สุรปรีช เมาสีกุล : การออกแบบระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์
(A DESIGN OF AUTOMATION SYSTEM FOR HYDROXYAPATITE PRODUCTION)
อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร , 255 หน้า. ISBN 974-17-5741-7.

สารไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นเซรามิกส์ทางการแพทย์ที่มีโครงสร้างคล้ายกระดูก มีคุณสมบัติเด่นในด้านการเข้ากันได้ดีและการเกิดปฏิสัมพันธ์ทางชีวภาพกับอวัยวะภายในร่างกายมนุษย์ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการผลิตอวัยวะเทียมและสารเคลือบผิวอวัยวะเทียมในรูปแบบต่างๆ เช่น ลูกตาเทียม ซีเมนต์กระดูก รากฟันเทียม ข้อตะโพกเทียม เป็นต้น ดังนั้นการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีคุณภาพดีและมีลักษณะสมบัติที่เหมาะสมแก่การประยุกต์ใช้งานจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

จากเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบและสร้างระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยออกแบบระบบเครื่องกลไกซึ่งประกอบไปด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิ ค่า pH และอัตราการเติมผสมสารตั้งต้น อีกทั้งระบบอุปกรณ์ควบคุมและซอฟต์แวร์ซึ่งได้ประยุกต์ใช้อุปกรณ์ PLC ควบคุมลำดับการทำงานร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อให้ผู้ใช้ระบบสามารถควบคุมและเฝ้าติดตามค่าปัจจัยของกระบวนการได้ หลังจากสร้างระบบอัตโนมัติเสร็จเรียบร้อยแล้วได้ทดสอบระบบโดยการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยกระบวนการผลิตอัตโนมัติ จากนั้นจึงนำผลที่ได้จากการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติไปตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวด้วยวิธีตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และวิธีวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีใต้แดง (FT-IR) ศึกษาลักษณะการกระจายของขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (PSLA) และศึกษาลักษณะรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)

จากการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติในงานวิจัยนี้พบว่า (1) ช่วยให้ประสิทธิภาพในการผลิตเพิ่มขึ้น 10% โดยประมาณเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตที่ควบคุมด้วยผู้ปฏิบัติการ (2) สามารถควบคุมปัจจัยอุณหภูมิ ค่า pH และอัตราการเติมผสมสารตั้งต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือความผิดพลาดในการควบคุมปัจจัยโดยรวมแล้วมีค่าประมาณไม่เกิน 1% (3) สารที่ผลิตได้มีลักษณะสมบัติเป็นสารไฮดรอกซีอะพาไทต์และสามารถปรับองค์ประกอบเฟสรวมไปถึงระดับความเป็นรูปผลึกได้จากการปรับเปลี่ยนค่าปัจจัยการผลิต และ (4) ช่วยลดปัญหาอันเกิดจากไอระเหยของก๊าซแอมโมเนียซึ่งเป็นสารตั้งต้นอย่างหนึ่งในกระบวนการผลิต โดยสรุปแล้ว การผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบอัตโนมัติมีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือ ประสิทธิภาพในการผลิตที่สูงขึ้น ประสิทธิภาพในการควบคุมปัจจัยที่น่าพอใจ กำลังการผลิตที่รองรับได้เพิ่มขึ้น และความปลอดภัยต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนิสิต สุรปรีช เมาสีกุล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

4470615021 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEY WORD : HYDROXYAPATITE / AUTOMATION

SURAPREE MAOLIKUL : A DESIGN OF AUTOMATION SYSTEM FOR HYDROXYAPATITE PRODUCTION. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SOMCHAI PUAJINDANETR, Ph.D., 255 pp. ISBN 974-17-5741-7.

Due to its identical structure with the natural bone which leads to good compatibility or bioactivity with the human organism, hydroxyapatite, a kind of bioceramics, provides versatility in medical applications as implants or coating on prostheses e.g. artificial eyeballs, bone cements, dental implants, and hip endoprotheses. The production of high quality hydroxyapatite with proper characteristics for each application, consequently, becomes considerably essential.

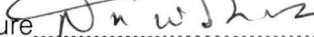
Hence, the objective of this research was to design and set up the automation system for hydroxyapatite production which comprised the hardware system and the software with controlling system. The hardware system was composed of temperature, pH and additional rate regulating system. The software with controlling system, on the other hand, was applied using a PLC device to control the production sequence together with the computer program designed and created for users to regulate and monitor the process parameters. After having been set up, the automation system designed was tested for producing hydroxyapatite. The synthetic hydroxyapatite powder was characterized using X-ray diffraction (XRD) and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). Furthermore, the particle size distribution was determined using the particle size laser analyzer (PSLA), while the morphology was performed using the scanning electron microscope (SEM).

The automated production system revealed that (1) the figures of production efficiency were roughly 10% higher than those of the manual production; (2) considering the 1% lower errors, the temperature, pH, and additional rate were effectively regulated; (3) the powder produced indicated hydroxyapatite's characteristics; in addition, the phase composition and crystallinity were adjustable by variations in the processing factors; and (4) the problem owing to hazardous ammonia fume was eliminated. In summary, the automation system for hydroxyapatite production is evidently advantageous in production efficiency, factor control effectiveness, high capacity support, and safety for operators.

Department...INDUSTRIAL ENGINEERING...

Student's signature 

Concentration...INDUSTRIAL ENGINEERING...

Advisor's signature 

Academic year...2003.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความเมตตากรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างดียิ่งตลอดระยะเวลาของการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย วิจิรวินิช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตรา รุ่งกิจการพานิช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะ เพื่อให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์ทุนอุดหนุนสำหรับการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ภูวิจิตร หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวัลย์ วิวรรณะเดช ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ยืมเครื่องมือ Potentiometric Automatic Titrator รวมไปถึง คุณพงศ์ธร รุ่งเจริญ คุรุปฏิบัติกร ประจำภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ ที่ได้ให้คำแนะนำในการใช้งานเครื่องดังกล่าว และให้ความอนุเคราะห์สารละลายบัฟเฟอร์เพื่อใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดค่า pH

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ภูมิ เหลืองจามีกร ที่ได้ให้ความกรุณาในการให้ยืมเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผู้ที่ได้กรุณาให้ความอนุเคราะห์ และอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ได้แก่ คุณจักรพันธ์ เมืองวัฒน์ ซึ่งเป็นคุรุปฏิบัติกรประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และเจ้าหน้าที่ธุรการประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่าน ขอขอบคุณคุณสกล เหมะธูลิน ที่ให้ความช่วยเหลือในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ขอขอบคุณคุณปาริฉัตร บันทอง ที่ได้ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคน ที่ให้กำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยที่ผ่านมา

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ซึ่งเป็นที่ยึดมั่น เคารพบูชาตลอดมา และได้ให้กำลังใจรวมถึงการสนับสนุนในทุกๆ ด้าน จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฎ |
| สารบัญรูป..... | ฏ |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 9 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 9 |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... | 10 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย..... | 12 |
| | |
| บทที่ 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม..... | 13 |
| 2.1 วัสดุทางการแพทย์..... | 13 |
| 2.2 เซรามิกส์ทางการแพทย์..... | 13 |
| 2.3 สารไฮดรอกซีอะพาไทต์..... | 16 |
| 2.3.1 การสังเคราะห์จากกระดูกวัวควาย (Bovine Bone)..... | 19 |
| 2.3.2 การสังเคราะห์จากซากสิ่งมีชีวิตในทะเล (Carbonate Skeleton).... | 20 |
| 2.3.3 การสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมี (Chemical Process)..... | 21 |
| 2.4 การสังเคราะห์สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีตกตะกอน..... | 24 |
| 2.4.1 วัสดุทางการแพทย์ที่นิยมสังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอน..... | 24 |
| 2.4.2 ข้อได้เปรียบของวิธีตกตะกอน..... | 26 |
| 2.4.3 ปัจจัยที่จำเป็นต้องควบคุมในกระบวนการสังเคราะห์..... | 27 |
| 2.4.4 ปฏิกิริยาในการสังเคราะห์สารไฮดรอกซีอะพาไทต์..... | 30 |
| 2.4.5 กระบวนการและเทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์..... | 31 |
| 2.5 อุปกรณ์ควบคุมลำดับการทำงาน (PLC)..... | 33 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 2.5.1 พื้นฐานเกี่ยวกับ PLC..... | 33 |
| 2.5.2 โครงสร้างและส่วนประกอบของ PLC..... | 34 |
| 2.6 การวัดและควบคุมอุณหภูมิ..... | 39 |
| 2.6.1 การวัดอุณหภูมิด้วย RTD..... | 39 |
| 2.6.2 การควบคุมอุณหภูมิ..... | 43 |
| 2.7 การวัดและควบคุมค่า pH..... | 46 |
| 2.7.1 การวัดค่า pH ของสารละลายโดยใช้เครื่องวัดค่า pH (pH meter)... | 46 |
| 2.7.2 ทฤษฎีการคำนวณ $[OH^-]$ และ pH ของสารละลายแอมโมเนีย เพื่อนำไปใช้ในการควบคุม..... | 49 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย..... | 63 |
| 3.1 การศึกษาและทดลองผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบผู้ปฏิบัติการ ควบคุม (Manual system)..... | 64 |
| 3.1.1 การจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต..... | 65 |
| 3.1.2 การดำเนินกระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์..... | 66 |
| 3.2 การออกแบบและสร้างกระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบ อัตโนมัติ (Automation system)..... | 68 |
| 3.2.1 การกำหนดสมมติฐานของการออกแบบระบบอัตโนมัติ..... | 68 |
| 3.2.2 การคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในปฏิกิริยา..... | 68 |
| 3.2.3 การออกแบบระบบเครื่องกลไก (Hardware)..... | 69 |
| 3.2.4 การออกแบบระบบอุปกรณ์ควบคุมและซอฟต์แวร์ (Software)..... | 108 |
| 3.3 การทดสอบระบบอัตโนมัติที่ได้จากการออกแบบและสร้างขึ้น..... | 115 |
| 3.3.1 การทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบผลิตสารไฮดรอกซี อะพาไทต์ด้วยระบบอัตโนมัติ..... | 115 |
| 3.3.2 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิต ได้จากระบบอัตโนมัติ..... | 117 |
| 3.3.3 การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค..... | 118 |
| 3.3.4 การศึกษาลักษณะรูปร่าง..... | 118 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์..... | 119 |
| 4.1 ผลการออกแบบระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์..... | 120 |
| 4.1.1 สมมติฐานของการออกแบบระบบอัตโนมัติ..... | 120 |
| 4.1.2 ผลการคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิต สารไฮดรอกซีอะพาไทต์..... | 121 |
| 4.1.3 การติดตั้งระบบอัตโนมัติ..... | 122 |
| 4.1.4 กระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากการออกแบบ..... | 124 |
| 4.1.5 แผนภาพการไหลของกระบวนการผลิตโดยระบบอัตโนมัติ..... | 126 |
| 4.2 ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ ด้วยระบบอัตโนมัติ..... | 132 |
| 4.2.1 น้ำหนักของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้จากการผลิตในงานวิจัย..... | 132 |
| 4.2.2 ผลการควบคุมปัจจัยอุณหภูมิและค่า pH ในกระบวนการผลิต..... | 133 |
| 4.3 ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้จาก ระบบอัตโนมัติ..... | 162 |
| 4.3.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD..... | 162 |
| 4.3.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR..... | 169 |
| 4.4 ผลการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค..... | 175 |
| 4.5 ผลการศึกษาลักษณะรูปร่าง..... | 181 |
| บทที่ 5 บทวิจารณ์ผลการวิจัย..... | 187 |
| 5.1 ประเด็นสำคัญที่พบในการปฏิบัติการผลิตด้วยระบบปฏิบัติการควบคุม..... | 187 |
| 5.2 บทวิจารณ์ระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์..... | 190 |
| 5.2.1 ระบบเครื่องกลไก (Hardware)..... | 190 |
| 5.2.2 ระบบอุปกรณ์ควบคุมและซอฟต์แวร์ (Software)..... | 193 |
| 5.3 บทวิจารณ์ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบผลิตสาร ไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบอัตโนมัติ..... | 194 |
| 5.3.1 น้ำหนักของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้จากการผลิตในงานวิจัย..... | 194 |
| 5.3.2 การควบคุมปัจจัยอุณหภูมิและค่า pH ในกระบวนการผลิต..... | 196 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 5.4 บทวิจารณ์ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้จากระบบอัตโนมัติ..... | 199 |
| 5.4.1 บทวิจารณ์ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD..... | 199 |
| 5.4.2 บทวิจารณ์ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR..... | 201 |
| 5.5 บทวิจารณ์ผลการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค..... | 202 |
| 5.6 บทวิจารณ์ผลการศึกษาลักษณะรูปร่าง..... | 203 |
| 5.7 บทวิจารณ์คุณค่าและข้อได้เปรียบของระบบอัตโนมัติในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์..... | 204 |
| 5.7.1 ประสิทธิภาพในการผลิต..... | 204 |
| 5.7.2 ประสิทธิภาพในการควบคุมปัจจัย..... | 204 |
| 5.7.3 กำลังการผลิต..... | 205 |
| 5.7.4 ความปลอดภัยต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน..... | 206 |
| | |
| บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... | 207 |
| 6.1 สรุปผลการวิจัย..... | 207 |
| 6.2 ข้อจำกัดของการวิจัย..... | 212 |
| 6.3 ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็น..... | 213 |
| | |
| รายการอ้างอิง..... | 215 |
| | |
| ภาคผนวก..... | 218 |
| ภาคผนวก ก รายการวัสดุและครุภัณฑ์ทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัย..... | 219 |
| ภาคผนวก ข เงินลงทุนและต้นทุนประมาณการของการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบอัตโนมัติที่ได้จากงานวิจัย..... | 229 |
| ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์..... | 233 |
| ภาคผนวก ง การสอบเทียบอุปกรณ์ RTD..... | 236 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| ภาคผนวก จ แผนภาพแลตเตออร์ของระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์..... | 241 |
| ภาคผนวก ฉ ตัวอย่างโปรแกรมติดต่อผู้ใช้งานสำหรับควบคุมและแสดงผลการดำเนินงาน..... | 245 |
| ภาคผนวก ช มาตรฐาน XRD ของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์..... | 252 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 255 |



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

| ตาราง | หน้า | |
|-------|--|-----|
| 2.1 | ประเภทของปฏิกิริยาการตอบสนองของเนื้อเยื่อต่อวัสดุที่ปลูกฝัง..... | 14 |
| 2.2 | สมบัติของ RTD ที่ทำจากโลหะประเภทต่างๆ..... | 41 |
| 2.3 | ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔG , ΔH และ ΔS และทิศทางการเปลี่ยนแปลง..... | 54 |
| 2.4 | ค่าปัจจัยทางด้านอุณหพลศาสตร์ของสารเคมีที่จำเป็นต้องใช้ในงานวิจัยนี้..... | 55 |
| 2.5 | ค่า pK_w ของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 0 – 100 °C..... | 60 |
| 2.6 | ค่า pK_a ของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ตั้งแต่ 0 - 50 °C..... | 61 |
| 3.1 | ส่วนผสมของสารละลายที่ใช้ในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ 10 กรัม..... | 67 |
| 3.2 | ช่วงอัตราการไหลที่ใช้งานสำหรับท่อซิลิโคนขนาดต่างๆ..... | 75 |
| 3.3 | ค่ากำหนดของตัวแปรต่างๆ เกี่ยวกับยานการวัด..... | 80 |
| 3.4 | ปัจจัยที่ผู้ใช้ระบบต้องกำหนดในกระบวนการผลิต..... | 113 |
| 3.5 | ปัจจัยของสภาวะทั้งสามสภาวะที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของระบบอัตโนมัติ..... | 116 |
| 4.1 | สัดส่วนต่างๆ ของปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ ตั้งแต่ 10 – 100 กรัมต่อรอบการผลิต..... | 121 |
| 4.2 | ผลของน้ำหนักของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากการผลิตในงานวิจัย..... | 132 |
| 4.3 | ค่าวิเคราะห์ทางสถิติที่สำคัญของอุณหภูมิที่วัดได้จากกระบวนการผลิตโดยระบบอัตโนมัติในขั้นตอนที่ 2-4 (ตลอดช่วงการควบคุมอุณหภูมิ)..... | 147 |
| 4.4 | ค่าวิเคราะห์ทางสถิติที่สำคัญของค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่วัดได้จากกระบวนการผลิตโดยระบบอัตโนมัติในขั้นตอนที่ 2-4 (ตลอดช่วงการควบคุมอุณหภูมิ)..... | 147 |
| 4.5 | ค่าวิเคราะห์ทางสถิติที่สำคัญของค่า pH ที่วัดได้จากกระบวนการผลิตโดยระบบอัตโนมัติในขั้นตอนที่ 2-5 (ตลอดช่วงการควบคุม pH)..... | 148 |
| 4.6 | ค่าวิเคราะห์ทางสถิติที่สำคัญของค่าความผิดพลาดของค่า pH ที่วัดได้จากกระบวนการผลิตโดยระบบอัตโนมัติในขั้นตอนที่ 2-5 (ตลอดช่วงการควบคุม pH)..... | 148 |
| 4.7 | ค่าวิเคราะห์ทางสถิติที่สำคัญของอุณหภูมิที่วัดได้จากกระบวนการผลิตโดยระบบอัตโนมัติในขั้นตอนต่างๆ ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ..... | 156 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตาราง | | หน้า |
|-------|---|------|
| 4.8 | ค่าวิเคราะห์ทางสถิติที่สำคัญของค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่วัดได้จากกระบวนการผลิตโดยระบบอัตโนมัติในขั้นตอนต่างๆ ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ..... | 157 |
| 4.9 | ค่าวิเคราะห์ทางสถิติที่สำคัญของค่า pH ที่วัดได้จากกระบวนการผลิตโดยระบบอัตโนมัติในขั้นตอนต่างๆ ที่มีการควบคุมค่า pH..... | 158 |
| 4.10 | ค่าวิเคราะห์ทางสถิติที่สำคัญของค่าความผิดพลาดของค่า pH ที่วัดได้จากกระบวนการผลิตโดยระบบอัตโนมัติในขั้นตอนต่างๆ ที่มีการควบคุมค่า pH..... | 159 |
| 4.11 | เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่วัดได้จากกระบวนการผลิตโดยระบบอัตโนมัติ..... | 160 |
| 4.12 | เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าเฉลี่ยของค่า pH ที่วัดได้จากกระบวนการผลิตโดยระบบอัตโนมัติ..... | 161 |
| 4.13 | สรุปค่าทางสถิติที่สำคัญของข้อมูลในการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค..... | 181 |
| ก.1 | รายการวัสดุสิ้นเปลืองที่มีอยู่พร้อมแล้วในห้องปฏิบัติการวิจัย..... | 220 |
| ก.2 | รายการวัสดุสิ้นเปลืองที่ต้องจัดหาเพิ่มเติม..... | 221 |
| ก.3 | รายการวัสดุคงทนถาวรที่มีอยู่พร้อมแล้วในห้องปฏิบัติการวิจัย..... | 223 |
| ก.4 | รายการวัสดุคงทนถาวรที่ต้องจัดหาเพิ่มเติม..... | 225 |
| ก.5 | รายการครุภัณฑ์ที่มีอยู่พร้อมแล้วในห้องปฏิบัติการวิจัย..... | 227 |
| ก.6 | รายการครุภัณฑ์ที่ต้องจัดหาเพิ่มเติม..... | 228 |
| ง.1 | ข้อมูลการสอบเทียบอุปกรณ์ RTD ครอบคลุมย่านการวัดที่ใช้งานทั้งหมด..... | 238 |

สารบัญรูป

| รูป | | หน้า |
|------|--|------|
| 1.1 | ลูกตาเทียม cHAp ชนิดมีรูพรุนของจักษุแพทย์ศัลยกรรมตกแต่ง Arthur C. Perry หลังผ่าตัดฝัง 6 เดือน เพื่อเจาะรู และเตรียมใส่ตาปลอมครอบชนิดมีก้านเสียบ..... | 4 |
| 2.1 | ระดับปฏิกิริยาทางชีวภาพของเซรามิกส์ทางการแพทย์ประเภทต่างๆ..... | 15 |
| 2.2 | รูปแสดงโครงสร้างอะตอมของผลึกสารคล้ายกระดูกไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Crystal structure of Hydroxyapatite)..... | 18 |
| 2.3 | แผนผังแสดงการสังเคราะห์สารไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัวควาย (Bovine Hydroxyapatite, bHAp)..... | 19 |
| 2.4 | โครงสร้างและส่วนประกอบพื้นฐานของ PLC..... | 34 |
| 2.5 | ส่วนประกอบของหน่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิดแรงดันเข้าแบบ AC..... | 35 |
| 2.6 | ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและอุณหภูมิ..... | 39 |
| 2.7 | โครงสร้างและการติดตั้งใช้งาน RTD..... | 41 |
| 2.8 | การต่อวงจร RTD แบบ 3 สายร่วมกับวงจรบริดจ์..... | 43 |
| 2.9 | แผนภาพการควบคุมอุณหภูมิแบบวงรอบปิด (Closed loop)..... | 44 |
| 2.10 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและค่า pH ที่อุณหภูมิต่างๆ..... | 48 |
| 2.11 | แผนภาพแสดง ΔH^0 ที่อุณหภูมิต่างกัน..... | 51 |
| 3.1 | ภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 เรียงตามลำดับจากซ้ายไปขวา..... | 71 |
| 3.2 | เครื่องกวนสารระบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นทำความร้อนยี่ห้อ CAT รุ่น M17.5..... | 73 |
| 3.3 | ปั๊มควบคุมการไหลยี่ห้อ Watson Marlow รุ่น 313U..... | 74 |
| 3.4 | แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อสายสัญญาณในรูปแบบศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับการควบคุมอัตโนมัติ..... | 75 |
| 3.5 | แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อขั้วสัญญาณเพื่อการควบคุมการเปิดปิดปั๊มควบคุมการไหล..... | 76 |
| 3.6 | แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อขั้วสัญญาณเพื่อการควบคุมทิศทางการไหลของปั๊มควบคุมการไหล..... | 76 |
| 3.7 | เครื่องวัดค่า pH ของบริษัท WPA รุ่น CD7400..... | 77 |
| 3.8 | เครื่อง Potentiometric automatic titrator ของบริษัท KEM รุ่น AT-400..... | 78 |
| 3.9 | อุปกรณ์ตรวจวัดระดับอย่างต่อเนื่อง..... | 79 |

สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูป | | หน้า |
|------|--|------|
| 3.10 | แบบแสดงสัดส่วนและย่านการวัดของอุปกรณ์ตรวจวัดระดับอย่างต่อเนื่อง..... | 80 |
| 3.11 | สวิตช์ลากลอยวัดระดับตามที่กำหนด..... | 81 |
| 3.12 | แบบแสดงสัดส่วนเกี่ยวกับขนาดของสวิตช์ลากลอย..... | 81 |
| 3.13 | แผนภาพแสดงการต่อขั้วต่างๆ ของ RTD เข้ากับเบ้าเสียบขั้วสัญญาณวัดอุณหภูมิ..... | 82 |
| 3.14 | การต่อเชื่อมความดันอากาศภายในภาชนะปฏิกรณ์ถึงกันโดยใช้ท่อซิลิโคน..... | 87 |
| 3.15 | ข้อต่อสี่ทางต่อเชื่อมความดันอากาศในภาชนะปฏิกรณ์ทั้งสามและท่อระบายความดัน..... | 87 |
| 3.16 | แผนภาพแสดงการควบคุมค่า pH ของสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1..... | 90 |
| 3.17 | การพล็อตกราฟระหว่างค่า pK_w และอุณหภูมิของน้ำเพื่อหาเส้นแนวโน้มสมการความสัมพันธ์ และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2)..... | 95 |
| 3.18 | การพล็อตกราฟระหว่างค่า pK_a ของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และอุณหภูมิของสารละลายเพื่อหาเส้นแนวโน้ม สมการความสัมพันธ์ และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2)..... | 98 |
| 3.19 | อุปกรณ์ PLC และอุปกรณ์จ่ายไฟกระแสตรงขนาด 24V ที่ใช้ในงานวิจัย..... | 109 |
| 3.20 | ระบบการแสดงผลข้อมูลสำหรับการติดตามกระบวนการด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ผนวกกับเครื่องบันทึกข้อมูล..... | 110 |
| 4.1 | แผนภาพแสดงระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์..... | 122 |
| 4.2 | ระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ในงานวิจัยนี้..... | 123 |
| 4.3 | แผนภาพการไหลของกระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยระบบอัตโนมัติ..... | 132 |
| 4.4 | กราฟแสดงค่าปัจจัยซึ่งต้องการควบคุมที่วัดได้จากกระบวนการผลิตโดยระบบอัตโนมัติที่สภาวะการผลิตที่ 1 ในการดำเนินการผลิตครั้งที่ 1..... | 134 |
| 4.5 | กราฟแสดงค่าปัจจัยซึ่งต้องการควบคุมที่วัดได้จากกระบวนการผลิตโดยระบบอัตโนมัติที่สภาวะการผลิตที่ 1 ในการดำเนินการผลิตครั้งที่ 2..... | 135 |
| 4.6 | กราฟแสดงค่าปัจจัยซึ่งต้องการควบคุมที่วัดได้จากกระบวนการผลิตโดยระบบอัตโนมัติที่สภาวะการผลิตที่ 2 ในการดำเนินการผลิตครั้งที่ 1..... | 136 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูป | หน้า | |
|------|--|-----|
| 4.21 | กราฟแสดงค่า pH ที่วัดได้จากกระบวนการผลิตโดยระบบอัตโนมัติ ที่สภาวะการผลิตที่ 3 ในขั้นตอนการผลิตที่ 2..... | 155 |
| 4.22 | ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากการผลิตด้วยระบบปฏิบัติการควบคุม..... | 163 |
| 4.23 | ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งได้จากการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 1..... | 164 |
| 4.24 | ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งได้จากการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 2..... | 165 |
| 4.25 | ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งได้จากการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 3..... | 166 |
| 4.26 | ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งได้จากการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 3 และผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง..... | 167 |
| 4.27 | การเปรียบเทียบผลจากการทดสอบด้วยเครื่อง XRD ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งได้จากการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะต่างๆ..... | 168 |
| 4.28 | ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FT-IR ของผงที่ได้จากการผลิตด้วยระบบปฏิบัติการควบคุม..... | 170 |
| 4.29 | ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FT-IR ของผงที่ได้จากการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 1..... | 171 |
| 4.30 | ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FT-IR ของผงที่ได้จากการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 2..... | 172 |
| 4.31 | ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FT-IR ของผงที่ได้จากการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 3..... | 173 |
| 4.32 | ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FT-IR ของผงที่ได้จากการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 3 และผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง.... | 174 |
| 4.33 | ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตด้วยระบบปฏิบัติการควบคุม..... | 176 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูป | | หน้า |
|------|---|------|
| 4.34 | ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 1..... | 177 |
| 4.35 | ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 2..... | 178 |
| 4.36 | ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 3..... | 179 |
| 4.37 | ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 3 และผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง..... | 180 |
| 4.38 | รูปถ่ายของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตด้วยระบบปฏิบัติการควบคุม..... | 182 |
| 4.39 | รูปถ่ายของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 1..... | 183 |
| 4.40 | รูปถ่ายของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 2..... | 184 |
| 4.41 | รูปถ่ายของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 3..... | 185 |
| 4.42 | รูปถ่ายของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตด้วยระบบอัตโนมัติที่สภาวะที่ 3 และผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง..... | 186 |
| 5.1 | แผนภาพการรับส่งข้อมูลค่า pH ในระบบควบคุมค่า pH..... | 192 |
| 5.2 | ยอดกราฟมาตรฐานอ้างอิงของ α -TCP และ β -TCP..... | 200 |
| ง.1 | กราฟการสอบเทียบของอุปกรณ์ RTD ทั้ง 4 ชิ้น..... | 240 |