

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ซึ่งได้แก่การออกแบบและสร้างระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาแนวทางในการดำเนินกระบวนการผลิตเพื่อเป็นพื้นฐานในการออกแบบและสร้างระบบอัตโนมัติให้สามารถผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ตามข้อกำหนด ทั้งนี้จะต้องมีการทดสอบระบบในแง่มุมต่างๆ ในขั้นสุดท้าย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้กำหนดวิธีการดำเนินการวิจัยออกเป็นผลงานต่างๆ โดยสามารถจำแนกผลงานดังกล่าวได้ตามลำดับดังต่อไปนี้

- 1) การศึกษาและทดลองผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบผู้ปฏิบัติการควบคุม (Manual system)
 - ก) การจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต
 - ข) การดำเนินกระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์

- 2) การออกแบบและสร้างกระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบอัตโนมัติ (Automation system)
 - ก) การกำหนดสมมติฐานของการออกแบบระบบอัตโนมัติ
 - ข) การคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในปฏิกิริยา
 - ค) การออกแบบระบบเครื่องกลไก (Hardware)
 - (1) การสำรวจเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง
 - (2) การออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิ
 - (3) การออกแบบระบบควบคุมค่า pH
 - (4) การออกแบบระบบควบคุมอัตราการเติมผสมสารตั้งต้น
 - ง) การออกแบบระบบอุปกรณ์ควบคุมและซอฟต์แวร์ (Software)
 - (1) การสำรวจลักษณะโดยทั่วไปของอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม
 - (2) การจำแนกสัญญาณที่ต่อเข้ากับอุปกรณ์ควบคุม PLC
 - (3) การออกแบบโปรแกรมสำหรับผู้ใช้ระบบ (User interface)

- 3) การทดสอบระบบอัตโนมัติที่ได้จากการออกแบบและสร้างขึ้น
 - ก) การทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบอัตโนมัติ
 - ข) การตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้จากระบบอัตโนมัติ
 - (1) การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD
 - (2) การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR
 - ค) การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค
 - ง) การศึกษาลักษณะรูปร่าง

3.1 การศึกษาและทดลองผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบปฏิบัติการควบคุม (Manual system)

การศึกษาและทดลองปฏิบัติการผลิตในรูปแบบการควบคุมโดยผู้ปฏิบัติการหรือควบคุมด้วยมือ (Manual system) นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของสารเคมีในระบบ รวมไปถึงการดำเนินกระบวนการผลิตว่าในแต่ละขั้นตอนนั้นมีสถานะปัญหา จุดที่ต้องคำนึงถึง และข้อจำกัด อย่างไรบ้างโดยละเอียด เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางที่สำคัญในการออกแบบระบบอัตโนมัติตามกระบวนการดังกล่าวอย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผล ทั้งนี้ข้อวิจารณ์และประเด็นสำคัญที่พบในการทดลองผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบปฏิบัติการจะได้นำไปแสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 5

อนึ่ง วิธีการผลิตสาร ไฮดรอกซีอะพาไทต์แบบควบคุมโดยผู้ปฏิบัติการนี้อ้างอิงมาจากวิธีการของสุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์ [3] ซึ่งจากการตรวจสอบด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แล้วได้ผลผลิตออกมาเป็นสารไฮดรอกซีอะพาไทต์อย่างถูกต้อง

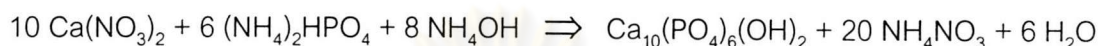
3.1.1 การจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต

ในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาการตกตะกอนทางเคมี จะต้องใช้วัสดุและอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ คือ

- 1) ผงแคลเซียมไนเตรด (Calcium nitrate, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
- 2) ผงได-แอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟต (Di-ammonium hydrogen orthophosphate, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$)
- 3) สารละลายแอมโมเนีย ความเข้มข้น 28% โดยน้ำหนัก (Ammonia solution 28%)
- 4) น้ำกลั่น (Purified water)
- 5) เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.001 g
- 6) บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 1000 ml
- 7) ขวด Buchner Flask ขนาด 1000 ml
- 8) ขวด Funnel Dropping ขนาด 500 ml
- 9) กระบอกตวงสาร ขนาด 100 ml
- 10) แท่งแก้วกวน
- 11) กรวยกรอง ขนาด 110 ml
- 12) กระดาษกรอง ยี่ห้อ MN เบอร์ 615 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 cm
- 13) เทอร์โมมิเตอร์ปรอท ทนอุณหภูมิ 100 °C
- 14) เครื่องกวนสารระบบแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer) พร้อมด้วย heater
- 15) บั้มสุญญากาศ พร้อมชุดสายยาง
- 16) เตอบสุญญากาศ ยี่ห้อ WTB Binder

3.1.2 การดำเนินการกระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์

ในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยกรรมวิธีการตกตะกอนจากปฏิกิริยาเคมี (Precipitation method) ดังสมการเคมีที่ (2.7) กล่าวคือ



ในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ จะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้ โดยกำหนดกำลังการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ปริมาณ 10 กรัมต่อรอบการผลิต

- 1) เตรียมสารละลายของแคลเซียมไนเตรด ด้วยการนำผงแคลเซียมไนเตรด ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) น้ำหนัก 23.506 กรัมมาเติมน้ำกลั่นให้ได้สารละลายปริมาตร 99.5 ml กวนจนผงแคลเซียมไนเตรดละลายหมด แล้วเติมสารละลายแอมโมเนีย ความเข้มข้น 28% โดยน้ำหนัก ปริมาตร 5 ml นำสารละลายที่เตรียมได้ไปกวนทิ้งบนเครื่องกวนสารระบบแม่เหล็ก
- 2) เตรียมสารละลายของได-แอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต ด้วยการนำผง ได-แอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) น้ำหนัก 7.887 g มาเติมน้ำกลั่นให้ได้สารละลายปริมาตร 59.7 ml กวนจนผงละลายหมด แล้วเติมแล้วเติมสารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 28% โดยน้ำหนัก ปริมาตร 5 ml กวนให้เข้ากันแล้วบรรจุลงในขวด Funnel Dropping
- 3) เปิดวาล์วของขวด Funnel Dropping หยดสารละลายในขั้นตอนที่ 2 ผสมกับสารละลายที่เตรียมไว้ในขั้นตอนแรก เพื่อให้สารละลายทั้งสองชนิดผสมกัน แล้วปรับความเร็วของเครื่องกวนสารระบบแม่เหล็กให้มีความเร็วรอบมากขึ้น เนื่องจากความหนืดของสารละลายจะเพิ่มขึ้น
- 4) เมื่อสารละลายทั้งสองชนิดผสมกันหมดแล้ว ยังคงเปิดให้เครื่องกวนทำงานต่อไป และเปิด heater ของเครื่องกวนสารระบบแม่เหล็กให้ความร้อนกับสารละลาย ที่อุณหภูมิ 80°C โดยประมาณ (ควบคุมอุณหภูมิที่แม่นยำให้ความร้อนด้วยมือ) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 5) ปิดเครื่องกวนสาร แล้วทิ้งสารละลายให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการตกตะกอน

- 6) นำสารละลายที่ตกตะกอนมากรองผ่านกระดาษกรองยี่ห้อ MN เบอร์ 615 เพื่อให้การกรองเป็นไปอย่างรวดเร็วให้ใช้ ระบบการกรองที่ต่อกับปั๊มสุญญากาศ
- 7) นำตะกอนที่ได้จากการกรองมาล้างด้วยน้ำกลั่นอีกประมาณ 2-3 รอบ เพื่อขจัดสารแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์และแอมโมเนียมไนเตรดที่ตกค้างอยู่
- 8) นำตะกอนที่ล้างแล้วไปอบแห้ง โดยอบในเตาอบสุญญากาศ อบที่อุณหภูมิ 90 °C ประมาณ 3 ชั่วโมง
- 9) นำตะกอนที่อบแห้งแล้วไปบดด้วยครกบดยา จะได้เป็นผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ตามที่ต้องการ

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของสารละลายที่ใช้ในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ 10 กรัม

สารละลาย	สารเคมี	ปริมาณ
สารละลาย 1	ผงแคลเซียมไนเตรด ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	23.506 g
	สารละลายแอมโมเนีย ความเข้มข้น 28% โดยน้ำหนัก	5.0 ml
	น้ำกลั่น	เติมให้ได้ปริมาตร สารละลาย 99.5 ml
สารละลาย 2	ผงได-แอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$)	7.887 g
	สารละลายแอมโมเนีย ความเข้มข้น 28% โดยน้ำหนัก	5.0 ml
	น้ำกลั่น	เติมให้ได้ปริมาตร สารละลาย 59.7 ml

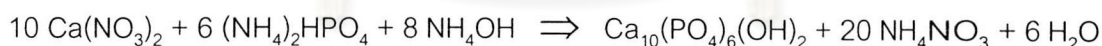
3.2 การออกแบบและสร้างกระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบอัตโนมัติ (Automation system)

3.2.1 การกำหนดสมมติฐานของการออกแบบระบบอัตโนมัติ

ระบบอัตโนมัติในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้นมีวัตถุประสงค์ที่เป็นประเด็นหลักคือ เพื่อให้สามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ได้อย่างถูกต้อง เพื่อหลีกเลี่ยงการสัมผัสโดยตรงกับสารเคมีที่เป็นพิษต่อร่างกาย กล่าวคือไอระเหยของแอมโมเนีย โดยการสร้างให้เป็นระบบปิด และเพื่อเป็นต้นแบบสำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรมต่อไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดสมมติฐานเกี่ยวกับการดำเนินการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยระบบอัตโนมัติตามความเหมาะสมทั้งในด้านงบประมาณ เวลา และข้อจำกัดต่างๆ เกี่ยวกับเครื่องมืออุปกรณ์เพื่อให้ครอบคลุมวัตถุประสงค์ดังกล่าว

3.2.2 การคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในปฏิกิริยา

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการสังเคราะห์โดยการตกตะกอนจากปฏิกิริยาเคมี (Precipitation method) ซึ่งจะสามารถสังเคราะห์ได้ตามสมการเคมีที่ (2.7) กล่าวคือ



การคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในปฏิกิริยานั้นสามารถทำได้โดยการเทียบอัตราส่วนโมลจากสมการเคมีที่ (2.7) ซึ่งเป็นสมการเคมีที่ใช้ในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ จากขอบเขตของงานวิจัยที่กำหนดให้กำลังการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ไม่เกิน 100 กรัมต่อรอบการผลิต ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องมีการคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์ในสัดส่วนที่จะทำให้สามารถผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ตามทฤษฎีตั้งแต่ 10 กรัมถึง 100 กรัม เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตที่กำลังการผลิตต่างๆ ในขอบเขตของงานวิจัย ทั้งนี้ได้แสดงตัวอย่างการคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์ไว้ในภาคผนวก ค

3.2.3 การออกแบบระบบเครื่องกลไก (Hardware)

3.2.3.1 การสำรวจเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบระบบอัตโนมัติของงานวิจัยนี้ จำเป็นต้องพิจารณาเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีอยู่แล้วในภาควิชาที่สามารถนำไปใช้ปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นหลัก หากแต่ถ้าเครื่องมือและอุปกรณ์บางอย่างที่ภาควิชาไม่สามารถจัดหาให้ได้นั้น จำเป็นต้องมีการหาซื้อเพิ่มเติมเพื่อให้ระบบอัตโนมัติสามารถดำเนินการได้อย่างเหมาะสม เครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมดที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการออกแบบระบบเครื่องกลไก (Hardware) สามารถแจกแจงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

3.2.3.1.1 ภาชนะปฏิกรณ์ (Reactor)

ภาชนะปฏิกรณ์ (Reactor) เป็นภาชนะที่ใช้บรรจุสารละลายตั้งต้นของการผลิต ในกระบวนการผลิตนี้จะประกอบไปด้วยสารละลายตั้งต้นทั้งหมด 3 ชนิดดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ทั้งนี้มีความจำเป็นต้องพิจารณาขนาดของภาชนะที่เหมาะสมกับปริมาตรของสารละลายดังกล่าว เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการดำเนินการและมีความจุที่พอเพียงในการบรรจุสารละลายต่างๆ ภาชนะปฏิกรณ์สามารถพิจารณาแยกย่อยได้ 3 ประเภทตามชนิดทั้งหมดของสารละลายที่บรรจุดังต่อไปนี้

1) ภาชนะปฏิกรณ์บรรจุสารละลายแคลเซียมไนเตรด

ภาชนะปฏิกรณ์ใบนี้จะกำหนดให้ในตอนเริ่มต้นเป็นภาชนะที่ใช้บรรจุสารละลายแคลเซียมไนเตรดซึ่งต้องรับปริมาตรเพิ่มขึ้นอีกจากการปรับสภาพ pH โดยการเติมสารละลายแอมโมเนียเข้ามา ในขณะที่เดียวกันยังมีหน้าที่เป็นภาชนะผสมสารตั้งต้นทั้งหมดให้เกิดปฏิกิริยาอีกด้วย ดังนั้นจึงต้องมีความจุที่สามารถรองรับปริมาณสารละลายทั้งหมดในปฏิกิริยาที่ส่งเข้ามาผสมได้ ภาชนะปฏิกรณ์ใบนี้จะกำหนดในงานวิจัยนี้ให้เป็นภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1

จากการพิจารณาบีกเกอร์ขนาด 1,000 ml ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4 นิ้ว ความสูง 145 mm ที่อยู่ในห้องปฏิบัติการวิจัยพบว่ามีความเหมาะสมในการใช้งาน โดยสามารถนำไปใช้กับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีกำลังการผลิตอยู่ในช่วง 20 – 40 กรัม โดยประมาณ ซึ่งอยู่ในขอบเขตของงานวิจัยนี้ กล่าวคือกำลังการผลิตมีค่าไม่เกิน 100 กรัม โดยที่กำลังการผลิตสูงสุดประมาณ 40 กรัมถูกกำหนดโดยความจุของสารละลายทั้งหมดที่ภาชนะสามารถบรรจุได้ และกำลังการผลิตต่ำสุดประมาณ 20 กรัมถูกกำหนดโดยข้อจำกัดด้านความยาว

ของอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้บีกเกอร์แก้วขนาด 1,000 ml เป็นภาชนะสำหรับบรรจุสารละลายแคลเซียมไนเตรด หรือภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1

2) ภาชนะปฏิกรณ์บรรจุสารละลายได-แอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟต

ภาชนะปฏิกรณ์ใบนี้กำหนดให้เป็นภาชนะสำหรับบรรจุสารละลายได-แอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟตในตอนเริ่มต้นและต้องรับปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจากการปรับสภาพ pH โดยการเติมสารละลายแอมโมเนียเข้ามาเช่นเดียวกับภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ภาชนะปฏิกรณ์บรรจุสารละลายได-แอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟตเป็นภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2

เมื่อลองพิจารณาบีกเกอร์ขนาด 600 ml ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 3 นิ้ว ความสูง 150 mm ที่อยู่ในห้องปฏิบัติการวิจัยจึงได้พบว่ามีขนาดเหมาะสมในการใช้งาน โดยสามารถรองรับปริมาณสารละลายที่สอดคล้องกับกำลังการผลิตของภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้บีกเกอร์แก้วขนาด 600 ml เป็นภาชนะบรรจุสารละลายได-แอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟต หรือภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2

3) ภาชนะปฏิกรณ์บรรจุสารละลายแอมโมเนีย

ภาชนะปฏิกรณ์ใบนี้กำหนดให้เป็นภาชนะที่ใช้สำหรับเก็บสารละลายแอมโมเนียความเข้มข้น 28% โดยมวล ซึ่งไอร่าเหยนั้นมียันตรายต่อสุขภาพ บทบาทของสารละลายแอมโมเนียในการผลิตไฮดรอกซีอะพาไทต์ระบบอัดโนมิตินี้เป็นทั้งสารตั้งต้นปฏิกิริยาและช่วยในการควบคุมค่า pH ของปฏิกิริยาไปพร้อมกัน ภาชนะที่ใช้จึงต้องมีความพร้อมและสะดวกในการจ่ายสารละลายแอมโมเนียไปยังภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 ได้ตลอดเวลา วิธีการหนึ่งที่ใช้งานได้ดีคือการใช้แรงโน้มถ่วงของโลกในการขับเคลื่อนการไหลของสารละลายแอมโมเนียไปยังภาชนะปฏิกรณ์อื่นๆ ดังนั้นตำแหน่งของภาชนะปฏิกรณ์บรรจุสารละลายแอมโมเนียจึงต้องอยู่เหนือภาชนะปฏิกรณ์อื่นๆ เพื่อให้สารละลายสามารถไหลได้จากแรงโน้มถ่วงของโลก และควรจะมีวาล์วปิดเปิดอยู่ด้านล่างภาชนะเพื่อควบคุมการปิดเปิดการไหลของสารละลายแอมโมเนียได้ ภาชนะปฏิกรณ์ใบนี้จะกำหนดในงานวิจัยนี้ให้เป็นภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3

จากการพิจารณาภาชนะที่อยู่ในห้องปฏิบัติการวิจัยพบว่า ภาชนะที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้เป็นภาชนะปฏิกรณ์บรรจุสารละลายแอมโมเนียหรือภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ได้แก่ขวด Funnel Dropping ซึ่งเป็นขวดแก้วบรรจุสารละลายขนาด 500 ml ด้านบนสามารถใช้จุกยางหรือจุกแก้วปิดได้สนิท ในขณะที่ด้านล่างมีวาล์วควบคุมการปิดเปิดการไหลของสารละลายออกจากภาชนะ ขวด Funnel Dropping นี้สามารถตอบสนองของฟังก์ชันการทำงานได้เป็นอย่างดีอีกทั้งสามารถกักเก็บไอร่าเหยของแอมโมเนียได้เป็นที่น่าพอใจ ดังนั้น จึงได้เลือกใช้ขวด Funnel Dropping เป็นภาชนะปฏิกรณ์บรรจุสารละลายแอมโมเนียหรือภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3



รูปที่ 3.1 ภาพขณะปฏิกิริยาที่ 1, 2 และ 3 เรียงตามลำดับจากซ้ายไปขวา

ศูนย์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.3.1.2 เครื่องกวนสารระบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นทำความร้อน (Magnetic hotplate stirrer)

เครื่องกวนสารระบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นทำความร้อน เป็นเครื่องมือที่ใช้กวนสารเคมีซึ่งสามารถใช้งานได้โดยวางภาชนะปฏิกรณ์ลงบนแผ่นทำความร้อนพร้อมกับหย่อนแท่งแม่เหล็กสำหรับใช้งานกับเครื่องนี้โดยเฉพาะลงไป ในภาชนะที่บรรจุสารละลาย แท่งแม่เหล็กนี้จะส่งสนามแม่เหล็กไปยังแท่งเหล็กของเครื่องกวนสารที่อยู่ใต้แผ่นทำความร้อน และเมื่อปรับเครื่องกวนให้กวนด้วยอัตราเร็วรอบค่าหนึ่ง มอเตอร์จะหมุนแท่งเหล็กดังกล่าวซึ่งจะส่งผลให้แท่งแม่เหล็กที่แช่อยู่ในสารละลายหมุนตามด้วยความเร็วรอบที่เท่ากัน

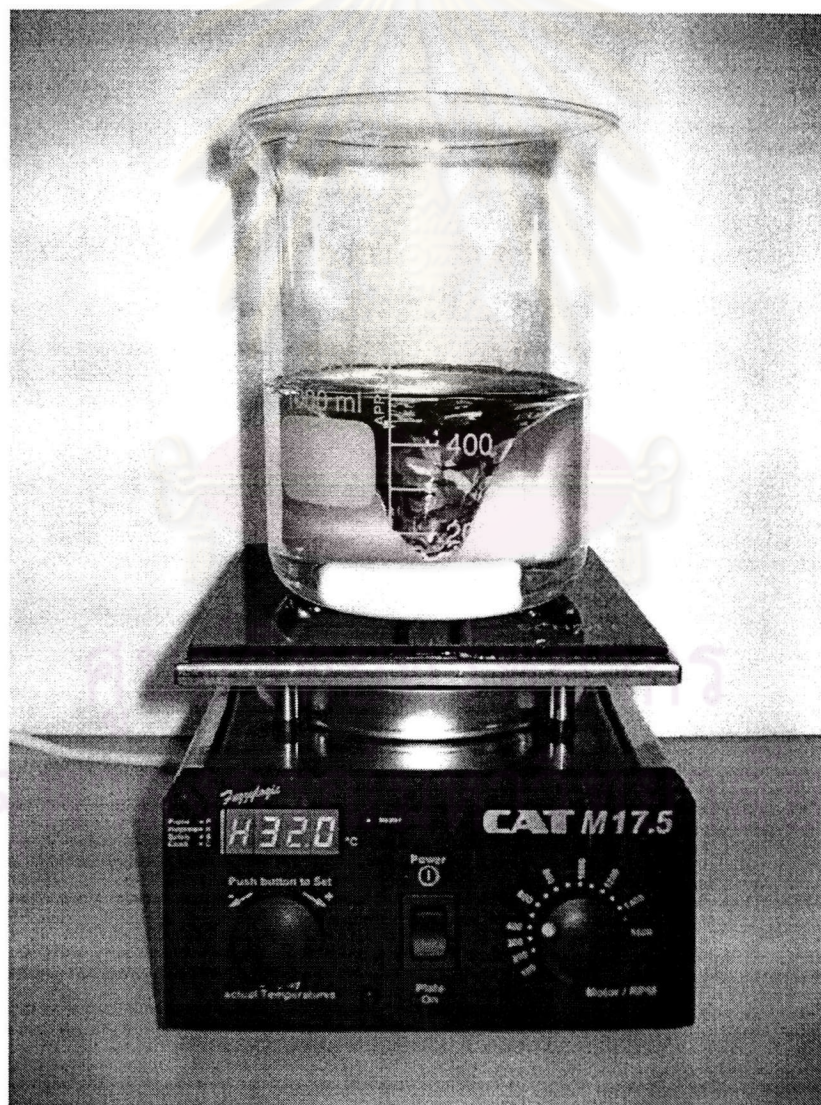
นอกจากนี้แผ่นทำความร้อนยังสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ด้วย โดยแบ่งวิธีการควบคุมออกเป็น 2 รูปแบบกล่าวคือ การควบคุมอุณหภูมิของแผ่นทำความร้อนให้มีค่าคงที่ และการควบคุมอุณหภูมิของสารละลายโดยใช้ RTD เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ ซึ่งในรูปแบบหลังนั้นอุณหภูมิที่ควบคุมจะมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า เพราะว่าเป็นการตรวจวัดอุณหภูมิที่สารละลายโดยตรง

สำหรับงานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องกวนสารระบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นทำความร้อน จำนวน 2 เครื่องเพื่อควบคุมอุณหภูมิของสารละลายตั้งต้นก่อนผสมและควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 อีกทั้งควบคุมอุณหภูมิของสารละลายตั้งต้นก่อนผสมในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2 เครื่องกวนสารระบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นทำความร้อนที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการวิจัยนั้น เป็นเครื่องมือยี่ห้อ CAT รุ่น M17.5 เหมือนกันทั้ง 2 เครื่อง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีลักษณะสมบัติดังต่อไปนี้

- แสดงผลแบบดิจิตอล ตัวเลข 4 หลัก
- สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ 2 รูปแบบ ทั้งควบคุมที่แผ่นทำความร้อนและควบคุมที่สารละลายโดยตรงโดยใช้อุปกรณ์ RTD ซึ่งเป็นวัสดุแพลทินัมที่มีความต้านทาน 100Ω ที่ 0°C
- ไมโครโปรเซสเซอร์เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิโดยใช้หลักการตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy logic)
- ควบคุมความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์โดยไมโครโปรเซสเซอร์
- ช่วงของการวัดและควบคุมอุณหภูมิที่ใช้งานเมื่อตรวจวัดด้วย RTD คือ 25°C ถึง 250°C
- ความละเอียดของการวัดและควบคุมอุณหภูมิที่ใช้งาน : 0.5°C

- ช่วงของความเร็วรอบการกวนที่ใช้งาน คือ 50 – 1,600 rpm
- ความละเอียดของความเร็วรอบการกวนที่ใช้งาน คือ 10 rpm
- มีระบบความปลอดภัยโดยการกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดของแผ่นทำความร้อนหรืออุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้จาก RTD ก่อนที่เครื่องมือจะตัดการทำงาน
- สามารถตั้งเวลาปิดได้ตั้งแต่ 1 นาทีถึง 999 นาที

อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ RTD นั้นเป็นอุปกรณ์เสริมต่างหากของเครื่องกวนสารระบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นทำความร้อน ซึ่งจำเป็นต้องมีการออกแบบและประดิษฐ์เพิ่มเติม โดยจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.2 เครื่องกวนสารระบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นทำความร้อนยี่ห้อ CAT รุ่น M17.5

3.2.3.1.3 ปั๊มควบคุมการไหล (Peristaltic pump)

ปั๊มควบคุมการไหลที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการวิจัยนั้นเป็นปั๊มควบคุมการไหลยี่ห้อ Watson Marlow รุ่น 313U ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 ทิศทางการไหลของของเหลวสามารถปรับได้ 2 ทิศทาง ความเร็วรอบของปั๊มสามารถปรับได้ตั้งแต่ 2.5 rpm จนถึง 50 rpm โดยที่อัตราการไหลของของเหลวนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของท่อที่ใช้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.3 ปั๊มควบคุมการไหลยี่ห้อ Watson Marlow รุ่น 313U

ตารางที่ 3.2 ช่วงอัตราการไหลที่ใช้งานสำหรับท่อซิลิโคนขนาดต่างๆ

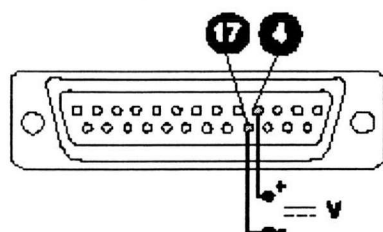
เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (นิ้ว)	ช่วงอัตราการไหลใช้งาน (ml / min)
0.5	1/50	0.07 – 1.5
0.8	1/32	0.15 – 3
1.6	1/16	0.65 – 13
3.2	1/8	2.5 – 50
4.8	3/16	5.5 – 110
6.4	1/4	9 – 180
8.0	5/16	12.5 – 250

นอกจากนี้แล้ว ปีมควบคุมการไหลยี่ห้อ Watson Marlow รุ่น 313U ยังสนับสนุนการควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติจากสัญญาณควบคุมทางไฟฟ้าได้ด้วย โดยมีการแบ่งรูปแบบของการควบคุมออกเป็น 3 รูปแบบกล่าวคือ แบบควบคุมด้วยมือ (Manual) แบบควบคุมจากการแปรผันค่าศักย์ไฟฟ้า (Auto volt) ตั้งแต่ 0 – 10 V และแบบควบคุมจากการแปรผันค่ากระแสไฟฟ้า (Auto current) ตั้งแต่ 4 – 20 mA ซึ่งการแปรผันค่าเหล่านี้จะทำให้อัตราการไหลแปรผันตามไปด้วยในลักษณะเชิงเส้น ในกรณีที่ต้องการควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติจากสัญญาณควบคุมทางไฟฟ้า จะต้องต่อสายสัญญาณผ่านปลั๊กขั้วสัญญาณแบบ 25 ทาง (25 – way Dee plug) ซึ่งอยู่ด้านหลังของตัวเครื่อง

ในการเชื่อมต่อสายสัญญาณนั้นสามารถทำได้โดยพิจารณาจากแผนผังในรูปที่ 3.4 ซึ่งจะแบ่งออกเป็นสัญญาณศักย์ไฟฟ้าและสัญญาณกระแสไฟฟ้า โดยเลือกใช้อย่างใดอย่างหนึ่ง

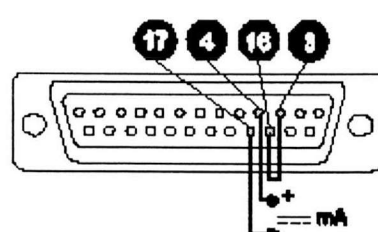
Voltage signal

Input impedance 220 kohms.
voltage signal 10V



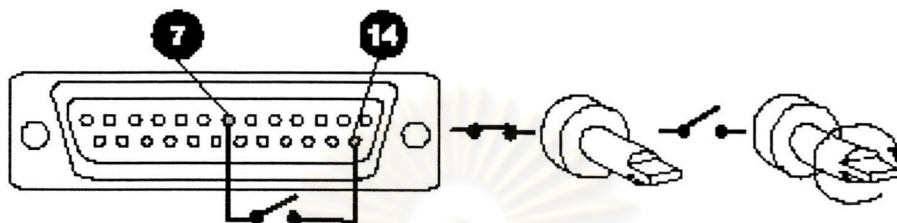
Current signal

Maximum Input impedance 250 ohms



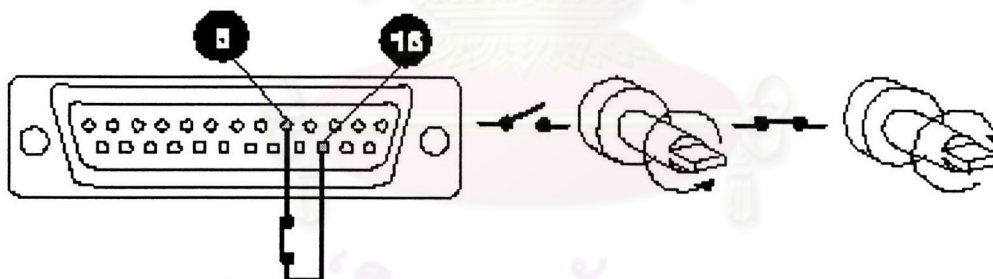
รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงการเชื่อมต่อสายสัญญาณในรูปแบบศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับการควบคุมอัตโนมัติ

ในส่วนของการควบคุมการเปิดปิดการทำงานของปั๊ม สามารถตัดต่อการทำงานของปั๊ม โดยการเชื่อมต่อขั้วที่ 7 และ 14 ของปลั๊กขั้วสัญญาณ 25 ทาง กล่าวคือเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.5 ให้ปิดวงจรเมื่อต้องการหยุดการทำงานของปั๊ม และเปิดวงจรเมื่อต้องการให้ปั๊มทำงานตามปกติ



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อขั้วสัญญาณเพื่อการควบคุมการเปิดปิดปั๊มควบคุมการไหล

นอกจากนี้แล้วปั๊มควบคุมการไหลยังสามารถควบคุมทิศทางการไหลแบบอัตโนมัติได้ ด้วย โดยการเชื่อมต่อขั้วที่ 5 และ 16 ของปลั๊กขั้วสัญญาณ 25 ทาง กล่าวคือเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.6 ปั๊มจะหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเมื่อเปิดวงจร และจะหมุนตามเข็มนาฬิกาเมื่อปิดวงจร



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อขั้วสัญญาณเพื่อการควบคุมทิศทางการไหลของปั๊มควบคุมการไหล

3.2.3.1.4 เครื่องวัดค่า pH

เครื่องวัดค่า pH เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดค่า pH ในสารละลาย โดยมีหลักการต่างๆ ตามที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 งานวิจัยนี้ต้องการเครื่องวัดค่า pH ชนิดที่สามารถส่งข้อมูลผลลัพธ์ออกไปยังอุปกรณ์อื่นได้ จำนวน 2 เครื่อง แต่ห้องปฏิบัติการวิจัยนั้นมีอยู่เพียงเครื่องเดียว จึงมีความจำเป็นต้องจัดหาเพิ่มเติมอีก 1 เครื่อง

เครื่องวัดค่า pH ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการนั้นเป็นเครื่องวัดค่า pH ของบริษัทผู้ผลิต WPA รุ่น CD7400 ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นเครื่องที่สามารถวัดค่า pH ได้ในช่วงตั้งแต่ 0.00 จนถึง 14.00 โดยมีความละเอียด 0.01 เครื่องวัดค่า pH รุ่นนี้สามารถชดเชยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปโดยอัตโนมัติ ดังนั้นจึงมีเบ้าเสียบสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิด้วย ซึ่งได้ระบุให้ใช้ RTD ชนิดแพลทินัมความต้านทาน 100Ω ที่ 0°C ในรูปแบบของการวัดอุณหภูมิด้วย RTD ของเครื่องวัดค่า pH ช่วงของการวัดอุณหภูมิใช้งานคือ -5°C จนถึง 105°C โดยมีความละเอียด 0.1°C เมื่อพิจารณาในส่วนของการส่งข้อมูลผลลัพธ์ออกไปยังอุปกรณ์อื่นๆ เครื่องวัดค่า pH รุ่นนี้สามารถส่งข้อมูลออกได้โดยใช้พอร์ต 9 pin แบบ RS232 รูปแบบข้อมูลที่ส่งออกมาสามารถส่งออกได้ทั้งรูปแบบการกดปุ่มด้วยมือเพื่อให้ข้อมูลออกมาแต่ละชุดและการส่งข้อมูลออกมาแบบอัตโนมัติ ข้อมูลที่ส่งออกมาจะมีอยู่ 3 ชนิด กล่าวคือ ค่า pH อุณหภูมิ และค่า mV ที่วัดได้จากขั้วไฟฟ้าแก้ว ในงานวิจัยนี้สิ่งที่สนใจคือค่า pH และค่าอุณหภูมิที่ส่งออกไปประมวลผลที่คอมพิวเตอร์โดยอัตโนมัติ จึงกำหนดให้ส่งข้อมูลของค่าดังกล่าวทั้งสองค่าออกไปโดยอัตโนมัติ ซึ่งชุดข้อมูลแต่ละชุดจะถูกส่งออกทุกๆ 12 วินาทีโดยประมาณ



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดค่า pH ของบริษัท WPA รุ่น CD7400

ในส่วนเครื่องวัดค่า pH อีก 1 เครื่องที่ต้องการนั้นได้ขอยืมจากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเป็นเครื่อง Potentiometric automatic titrator ของบริษัท KEM รุ่น AT-400 ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.8 ซึ่งสามารถวัดค่า pH และมีการชดเชยอุณหภูมิพร้อมแสดงค่าอุณหภูมิด้วยเช่นกันแต่ไม่สามารถส่งค่าข้อมูลดังกล่าวออกไปยังอุปกรณ์อื่นๆได้ เครื่องวัดค่า pH รุ่นนี้มีช่วงของค่า pH ที่วัดได้คือ 0.00 จนถึง 14.00 โดยมีความละเอียด 0.01 และช่วงของค่าอุณหภูมิที่วัดได้คือ 0.0 °C จนถึง 100.0 °C โดยมีความละเอียด 0.1 °C เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ภายนอกอื่นๆได้ ดังนั้นภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2 จึงต้องใช้วิธีการปรับค่าด้วยมือ แต่จะไม่ส่งผลกระทบต่อมากนัก เนื่องจากไม่ใช่ภาชนะปฏิกรณ์ตัวหลักที่ควบคุม pH ในระหว่างเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 3.8 เครื่อง Potentiometric automatic titrator ของบริษัท KEM รุ่น AT-400

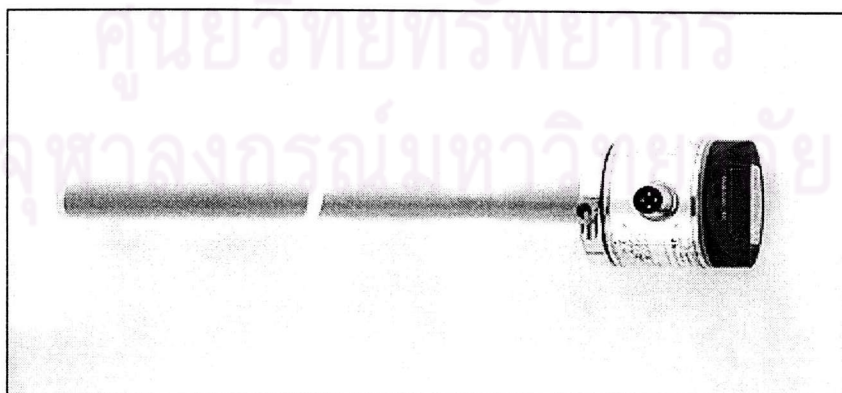
3.2.3.1.5 อุปกรณ์ตรวจวัดระดับ

อุปกรณ์ตรวจวัดระดับที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ กล่าวคือ อุปกรณ์ตรวจวัดระดับอย่างต่อเนื่อง และอุปกรณ์ตรวจวัดระดับตามที่กำหนด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้อุปกรณ์ตรวจวัดระดับทั้งสองรูปแบบ

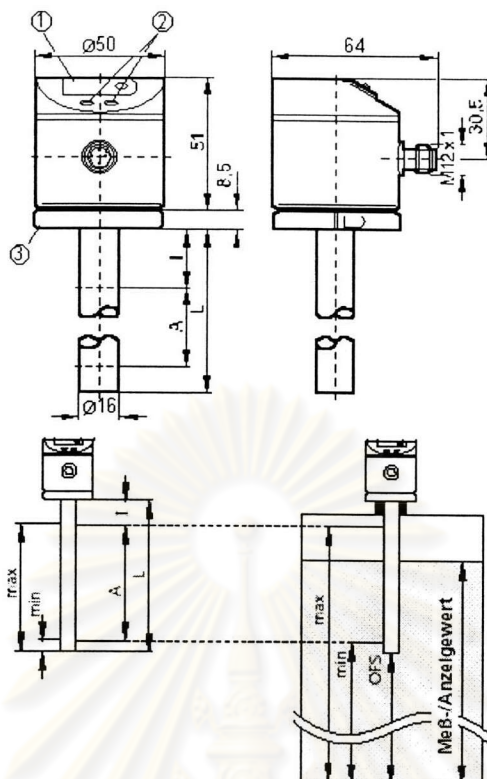
1) อุปกรณ์ตรวจวัดระดับอย่างต่อเนื่อง

อุปกรณ์ตรวจวัดระดับอย่างต่อเนื่องที่ใช้ในงานวิจัยนี้ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 ใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเมื่อระดับของสารละลายเปลี่ยนแปลงไป โดยจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งเป็นได้ทั้งสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ 0 – 10 V หรือเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้าขนาด 4 – 20 mA ในการออกแบบจะต้องมีการคำนวณเพื่อสอบเทียบระดับของสารละลายกับสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ อุปกรณ์ดังกล่าวนี้ส่วนที่จุ่มลงในสารละลายทำจาก Polypropylene ซึ่งทนต่อสภาวะที่ครอบคลุมทั้งหมดในงานวิจัย

สำหรับขนาดและสัดส่วนของอุปกรณ์ตรวจวัดระดับอย่างต่อเนื่องที่ใช้ในงานวิจัยนั้นแสดงอยู่ในรูปที่ 3.10 โดยระบุนรายละเอียดของตัวแปรต่างๆ เกี่ยวกับย่านการวัดนั้นไว้แล้วอยู่ในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ตรวจวัดระดับอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 3.10 แบบแสดงสัดส่วนและย่านการวัดของอุปกรณ์ตรวจวัดระดับอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 3.3 ค่ากำหนดของตัวแปรต่างๆ เกี่ยวกับย่านการวัด

L = probe length	cm	26.4
	inch	10.4
A = active zone / measuring length	cm	19.5
	inch	7.7
I = Inactive zone	cm	5.3
	inch	2.0
min = lowest measured value	cm	1.5
	inch	0.6
max = highest measured value	cm	21.0
	inch	8.3
OFS = offset	cm	0 ... 78.0
	inch	0 ... 30.7

หมายเหตุ เมื่อ $OFS > 0$ ค่า min กับ max จะรวมค่า OFS เข้าไปด้วย กำหนดค่า default คือ $OFS=0$

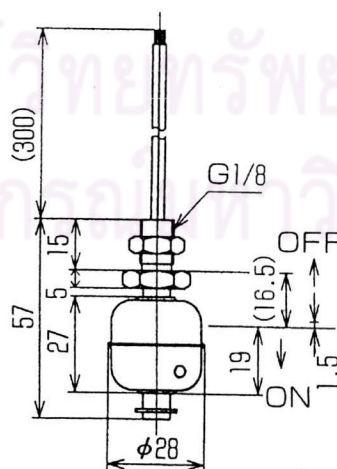
2) อุปกรณ์ตรวจวัดระดับตามที่กำหนด

อุปกรณ์ตรวจวัดระดับตามที่กำหนดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นสวิทช์ลูกลอย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.11 และ 3.12 ตัวเรือนทำจากสแตนเลสเกรด 316 ทั้งชิ้นโดยสามารถใช้งานได้ครอบคลุมสภาวะทั้งหมดในงานวิจัย มีหลักการคือเมื่อระดับน้ำอยู่สูงกว่าลูกลอยจะทำให้ลูกลอยลอยขึ้นด้านบนสวิทช์จะเปิดวงจร แต่เมื่อระดับน้ำลดลงจนถึงระดับที่ลูกลอยตกลงมา แม่เหล็กที่ฝังอยู่ในลูกลอยจะดูดให้สวิทช์ปิดวงจร ทำให้ครบวงจรและเกิดเป็นสัญญาณขาเข้าแบบดิจิตอล



รูปที่ 3.11 สวิทช์ลูกลอยวัดระดับตามที่กำหนด

● OLV-5形

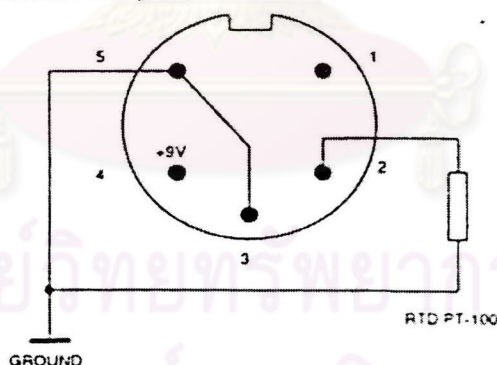


รูปที่ 3.12 แบบแสดงสัดส่วนเกี่ยวกับขนาดของสวิทช์ลูกลอย

3.2.3.2 การออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิ

การควบคุมอุณหภูมิของสารละลายสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องกวนสารระบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นทำความร้อนควบคุมอุณหภูมิของภาชนะปฏิกรณ์ทั้งสองใบเพื่อปรับสภาพของอุณหภูมิก่อนทำปฏิกิริยาให้เท่ากับอุณหภูมิที่กำหนดเสียก่อนและควบคุมอุณหภูมิของภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ในระหว่างเกิดปฏิกิริยา งานวิจัยนี้มีความจำเป็นต้องใช้ RTD เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิของสารละลายเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการตรวจวัดอุณหภูมิ ทั้งนี้อุปกรณ์ RTD ทั้งหมดจะต้องผ่านสอบเทียบเพื่อให้สามารถวัดค่าอุณหภูมิได้อย่างถูกต้องตามความเป็นจริงซึ่งรายละเอียดในการสอบเทียบอุปกรณ์ RTD ในงานวิจัยนี้ได้แสดงไว้อยู่ในภาคผนวก ง เรียบร้อยแล้ว จากข้อกำหนดของเครื่องกวนสารระบบอัตโนมัติพร้อมแผ่นทำความร้อนได้ระบุให้ใช้ RTD ชนิดแพลตินัม ความต้านทาน 100Ω ที่ 0°C เมื่อ RTD นี้ต้องแช่อยู่ในสถานะที่มีสารละลายแอมโมเนียผสมอยู่ จึงเลือกใช้ฝักโลหะที่ทำจากวัสดุสแตนเลส เกรด 316 ซึ่งมีความทนทานต่อสภาวะดังกล่าว อย่างไรก็ตาม เบ้าเสียบหัวสัญญาณวัดอุณหภูมิของเครื่องกวนสารระบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นทำความร้อนมีลักษณะที่เป็นมาตรฐานของ DIN ซึ่งมีหัวต่อทั้งหมด 5 หัว โดยต่อหัวต่างๆของ RTD ตามรูปที่ 3.13

Connection of PT100 probe:



รูปที่ 3.13 แผนภาพแสดงการต่อหัวต่างๆ ของ RTD เข้ากับเบ้าเสียบหัวสัญญาณวัดอุณหภูมิ

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเครื่องกวนสารระบบอัตโนมัติพร้อมแผ่นทำความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยอัตโนมัติ แต่ไม่สามารถส่งข้อมูลของอุณหภูมิที่วัดได้ออกไปยังอุปกรณ์อื่นๆ ได้ จึงมีความจำเป็นต้องดึงข้อมูลของอุณหภูมิจาก RTD ของเครื่องวัดค่า pH ของภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ซึ่งมีจุดประสงค์ในการวัดอุณหภูมิเพื่อการชดเชยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป นำไปแสดงในหน้าจอของคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์บันทึกผลเพื่อการติดตามแนวโน้มของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการผลิต

3.2.3.3 การออกแบบระบบควบคุมค่า pH

3.2.3.3.1 หลักการทำงาน

การควบคุมค่า pH ให้คงที่ในปฏิกิริยาสามารถทำได้โดยการเติมสารละลายแอมโมเนียจากภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ในปริมาณที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาค่า pH ในขณะเกิดปฏิกิริยานั้นพบว่าจะมีค่าที่ลดลงเนื่องจากการดึงโมเลกุลของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ไปใช้ในปฏิกิริยาเพื่อรวมตัวเป็นสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ ดังนั้นจึงสามารถออกแบบการควบคุมค่า pH โดยการเติมสารละลายแอมโมเนียเพียงอย่างเดียวเพื่อเพิ่มค่า pH ให้ได้ค่าตรงตามที่กำหนดได้

จากลักษณะการตรวจวัดที่เกิดขึ้น เครื่องวัดค่า pH ที่จะต้องนำไปสอบเทียบกับสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน 3 จุดก่อนการใช้งาน กล่าวคือที่ pH = 4.00, 7.00, และ 10.00 จะส่งชุดข้อมูลซึ่งประกอบด้วยค่า pH และค่าอุณหภูมิ ออกไปยังอุปกรณ์อื่นๆ ในทุกๆ 12 วินาที โดยประมาณ ค่า pH ที่ได้จะนำไปเก็บไว้ในฐานข้อมูล นำไปแสดงผลเพื่อการติดตามกระบวนการและนำไปเปรียบเทียบกับค่า pH ที่ต้องการควบคุมเพื่อกำหนดปริมาณสารละลายแอมโมเนียที่ต้องเติมลงไป ในภาชนะปฏิกรณ์ในแต่ละรอบของการตรวจวัด หลังจากที่เติมสารละลายแอมโมเนียลงไปเพื่อปรับค่า pH แล้ว ระบบก็จะตรวจสอบผลจากการเติมสารละลายแอมโมเนียเพื่อปรับค่า pH ในรอบการตรวจวัดปัจจุบันจากข้อมูลที่ส่งออกมาในรอบการตรวจวัดครั้งหน้า ซึ่งก็จะดำเนินการซ้ำในรูปแบบเดิม กล่าวคือ นำไปเก็บไว้ในฐานข้อมูล นำไปแสดงผลเพื่อการติดตามกระบวนการ และนำไปเปรียบเทียบกับค่า pH ที่ต้องการควบคุมเพื่อกำหนดปริมาณของสารละลายแอมโมเนียที่ต้องเติมลงไป เช่นเดียวกันกับรอบการตรวจวัดที่ผ่านมา ระบบการตรวจวัดจะวนเป็นวงรอบอย่างนี้ไปเรื่อยๆ ไปจนกว่าจะสิ้นสุดกระบวนการผลิต

3.2.3.3.2 การพิจารณาด้านวัสดุ

ในการออกแบบนั้นจะเริ่มต้นพิจารณาจากวัสดุของท่อทาง ข้อต่อ และวาล์วปิดเปิดที่ใช้เพื่อลำเลียงสารละลายแอมโมเนียไปยังภาชนะปฏิกรณ์ทั้งสอง ท่อทางที่ใช้เพื่อการลำเลียงนั้นควรเลือกใช้ท่ออ่อนเพื่อให้ระบบมีความยืดหยุ่นในการปรับเลื่อนตำแหน่ง ป้องกันมิให้ภาชนะจำพวกแก้ว กล่าวคือภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ซึ่งเป็นภาชนะเก็บสารละลายแอมโมเนียเกิดความเสียหายจากการแตกหัก อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการกันรั่ว (Seal) ไปในตัวอีกด้วย ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกท่อทางที่ทำจากวัสดุซิลิโคน ซึ่งเป็นวัสดุที่ทนความร้อนได้สูง (มีความจำเป็นสำหรับท่อทางในส่วนที่ติดตั้งอยู่ภายในภาชนะปฏิกรณ์เพื่อนำส่งสารละลายแอมโมเนีย) สามารถใช้ได้กับสารละลายแอมโมเนียความเข้มข้น 28% โดยมวลโดยไม่เกิดการกัดกร่อน สำหรับขนาดที่เลือกใช้นั้นจะต้องพิจารณาจากความเหมาะสมของระบบอีกครั้งหนึ่ง

สำหรับข้อต่อนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ที่ทำจากวัสดุโลหะจำพวกสเตนเลสเกรด 304 ซึ่งมีขายอยู่ทั่วไปตามท้องตลาด และมีขนาดให้เลือกมากกว่าวัสดุประเภทอื่น อีกทั้งยังทนต่ออุณหภูมิสูงและทนต่อสารละลายแอมโมเนีย 28% โดยมวลโดยไม่เกิดการกัดกร่อนอีกด้วย อย่างไรก็ตาม บริเวณข้อต่อเกลียวของสเตนเลสที่มีการเชื่อมต่อนั้นจำเป็นต้องมีการกันรั่ว (Seal) ด้วยเทปพันท่ออีกอย่างหนึ่ง ซึ่งเทปพันท่อนั้นโดยทั่วไปทำจากวัสดุเทฟลอนซึ่งมีความทนทานต่ออุณหภูมิสูงและการกัดกร่อนของสารละลายแอมโมเนีย 28% โดยมวลอยู่แล้ว จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในงานวิจัยนี้

ในกรณีของวาล์วนั้นจะประกอบด้วยวาล์วปรับด้วยมือและโซลินอยด์วาล์ว สำหรับวัสดุที่ใช้ทำตัวเรือนนั้นควรเลือกใช้สเตนเลสเนื่องจากเหตุผลด้านความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมในงานวิจัยและเกลียวที่เหมาะสมกับข้อต่อสเตนเลสต่างๆ นั้นสามารถหาได้ง่ายกว่าตามท้องตลาด อนึ่ง โซลินอยด์วาล์วนั้นจำเป็นต้องพิจารณาเพิ่มเติมเกี่ยวกับวัสดุกันรั่ว (Seal) ที่อยู่ภายในตัวเรือนของวาล์ว วัสดุกันรั่วนี้ซึ่งโดยปกติมักจะทำจากยางจะมีการสัมผัสโดยตรงกับสารละลายแอมโมเนียเช่นเดียวกับตัวเรือนของวาล์ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้โซลินอยด์วาล์วที่ใช้ซิลิโคนเป็นวัสดุกันรั่วภายในตัวเรือนของวาล์วซึ่งมีคุณสมบัติในด้านความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมในงานวิจัยดังที่ได้เคยกล่าวถึงแล้ว

นอกจากนี้แล้ว ฝาปิดภาชนะเป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่ง เนื่องจากช่วยป้องกันมิให้ไอระเหยของแอมโมเนียเล็ดรอดออกมาจากภาชนะปฏิกรณ์ ดังนั้นจึงต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญคือต้องสามารถกันรั่ว (Seal) ได้เป็นอย่างดี วัสดุที่สามารถกันรั่วได้ดีนั้นคือวัสดุจำพวกยาง ยางที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้นั้นได้แก่ยาง EPDM ยางบิวทิล และยางซิลิโคน ซึ่งมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมในงานวิจัยได้เป็นอย่างดีแต่มีราคาแพงมากและหาซื้อได้ยากกว่ามากเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ ในความเป็นจริงแล้วยางธรรมชาติสามารถใช้งานกับสารละลายแอมโมเนียความเข้มข้น 28% ได้ดี เพียงแต่จะทนอุณหภูมิที่สูงได้ไม่ดีนัก อย่างไรก็ตาม ฝาปิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างระบบปิดให้กับภาชนะปฏิกรณ์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น มิได้สัมผัสโดยตรงกับสารละลายที่อาจจะมีอุณหภูมิสูงจนเกือบถึงจุดเดือดของน้ำ จึงสามารถเลือกใช้ยางธรรมชาติเพื่อตัดกึ่งให้เป็นฝาปิดสำหรับภาชนะปฏิกรณ์ได้

3.2.3.3.3 การออกแบบระบบจ่ายสารละลายแอมโมเนีย

หลังจากที่พิจารณาถึงวัสดุที่ใช้แล้ว จึงทำการออกแบบขนาดและการเชื่อมต่อของท่อทาง ข้อต่อ และวาล์วต่างๆ เพื่อให้สามารถลำเลียงสารละลายแอมโมเนียจากภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ไปยังภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 ได้โดยไม่เกิดการรั่วและสามารถควบคุมการไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เริ่มต้นจากการพิจารณาขนาดของปลายท่อของขวด Funnel dropping สามารถสวมได้กับท่อซิลิโคนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน $\frac{1}{2}$ นิ้ว ปลายอีกด้านหนึ่งของท่อซิลิโคนจะนำไปต่อกับข้อต่อสามทางขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้วเพื่อแยกการจ่ายสารละลายแอมโมเนียไปยังภาชนะปฏิกรณ์ทั้งสองใบ ทางออกของสารละลายของข้อต่อทั้งสองทางนั้นต้องใช้ข้อลดเพื่อลดขนาดจาก $\frac{1}{2}$ นิ้ว เป็น $\frac{1}{4}$ นิ้ว เพื่อให้ตอบสนองต่ออัตราการไหลในขนาดต่างๆได้ (ขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้วเป็นขนาดมาตรฐานสำหรับอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ ท่อทาง ข้อต่อ และวาล์ว ที่ผู้ผลิตมักจะมีผลิตออกมา จึงสามารถหาอุปกรณ์ต่างๆ ในท้องตลาดได้ง่ายกว่าขนาดอื่นๆ ที่ไม่ใช่ขนาดมาตรฐานหรือเป็นขนาดมาตรฐานที่เล็กกว่า $\frac{1}{4}$ นิ้ว เช่น $\frac{1}{8}$ นิ้ว เป็นต้น) ด้านออกของข้อต่อสามทางทั้งสองด้านนั้นให้นำไปต่อกับท่อซิลิโคนขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้ว ซึ่งปลายอีกด้านหนึ่งจะต้องต่อกับวาล์วเพื่อควบคุมการเปิดปิดการไหลของสารละลายแอมโมเนีย

เมื่อลองพิจารณาในส่วนของวาล์วที่ใช้จะเป็นวาล์วขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้วทั้งหมด สำหรับภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 นั้นเนื่องจากสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆแบบอัตโนมัติได้จึงติดตั้งซิลิโคนยัดวาล์วชนิดควบคุมด้วยไฟฟ้ากระแสตรง 24V เพื่อควบคุมการเปิดปิดการไหลของสารละลายโดยต่อเชื่อมด้วยข้อต่อตรง (Nipple) เข้ากับวาล์วแบบยกชนิดปรับด้วยมือ (Globe valve) ซึ่งใช้ในการปรับอัตราการไหลอย่างหยาบๆให้คงที่ในระดับหนึ่ง ในขณะที่ภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2 นั้นจำเป็นต้องควบคุมตัวแปรต่างๆ ด้วยมือเนื่องจากข้อจำกัดด้านการส่งข้อมูลออกจากเครื่องวัดค่า pH จึงใช้เพียงวาล์วแบบยกชนิดปรับด้วยมือ (Globe valve) เท่านั้นเพื่อเปิดปิดการไหลและปรับอัตราการไหลของสารละลายแอมโมเนียอย่างหยาบๆ วาล์วแบบยก (Globe valve) มีลักษณะการปรับแบบหมุนเกลียวซึ่งในทางปฏิบัติสามารถปรับอัตราการไหลได้ละเอียดกว่าวาล์วแบบรูปทรงกลม (Ball valve) อย่างไรก็ตาม ทั้งวาล์วแบบยกและวาล์วแบบรูปทรงกลมนั้นไม่นิยมนำมาใช้ในการปรับอัตราการไหลอย่างละเอียด เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นในการปรับวาล์วสำหรับอัตราการไหลค่าใดๆ แต่ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้มีได้เน้นการควบคุมปริมาณการไหลโดยปรับอัตราการไหลหากแต่กำหนดอัตราการไหลให้คงที่ที่ค่าหนึ่งแล้วแปรผันเวลาในการเปิดวาล์วเพื่อให้ได้ปริมาณของสารละลายแอมโมเนียตามที่ต้องการ จึงได้เลือกวาล์วแบบยกเพื่อใช้ในการปรับอัตราการไหลอย่างหยาบๆ ปลายด้านทางออกของวาล์วแบบยกทั้งสองตัวนั้นต่อเข้ากับท่อซิลิโคนเพื่อเสียบทะลุผ่านรูที่เจาะไว้ที่ฝาปิดภาชนะปฏิกรณ์ทั้งสอง

ในการเชื่อมต่อระหว่างท่อซิลิโคนเข้ากับข้อต่อต่างๆ นั้นจะต้องใช้ข้อต่อชนิดทางปลาไหลเพื่อเสียบท่อซิลิโคนเข้ากับปลายด้านหนึ่งแล้วใช้แหวนรัดท่อให้แน่นเพื่อป้องกันการรั่ว ปลายด้านหนึ่งของข้อต่อทางปลาไหลจะมีลักษณะเป็นเกลียวตัวผู้ซึ่งก็จะสามารถนำไปต่อกับเกลียวตัวเมียในขนาดเดียวกันของอุปกรณ์อื่นๆได้

จุดหนึ่งที่สำคัญที่ต้องพิจารณาคือการแทนที่ของอากาศเพื่อให้เกิดการไหลของสารละลายแอมโมเนีย เนื่องจากระบบที่ออกแบบเป็นระบบปิด และใช้แรงโน้มถ่วงในการขับเคลื่อนการไหลของสารละลายแอมโมเนีย หากว่าปิดจุกด้านบนของภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 จนสนิท เมื่อปล่อยให้สารละลายไหลออกไปสักระยะหนึ่ง ความดันที่อยู่เหนือสารละลายจะลดลง เนื่องจากไม่มีอากาศเข้ามาแทนที่ จนกระทั่งในที่สุดความดันอากาศบริเวณปลายท่อที่ปล่อยสารละลายมีค่ามากกว่าความดันที่เกิดจากน้ำหนักของสารละลาย จึงทำให้สารละลายแอมโมเนียไม่ไหลอีกต่อไปถึงแม้ว่าจะเปิดวาล์วจนสุดก็ตาม นอกจากนี้แล้ว หากดำเนินการผลิตที่อุณหภูมิสูงๆ จะเกิดความดันไอที่สูงกว่าความดันบรรยากาศค่อนข้างมากพอสมควรเหนือระดับสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ ซึ่งถึงแม้ว่าภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 จะเปิดออกสู่บรรยากาศ (ให้มีความดันเหนือระดับของเหลวเท่ากับความดันบรรยากาศ) ก็เป็นไปได้ว่าเมื่อเปิดวาล์วแล้วสารละลายแอมโมเนียจะไม่สามารถไหลออกมาได้ด้วยแรงโน้มถ่วง ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อหากความดันไภายในระบบมีค่าสูงมากๆ อาจทำให้เกิดอันตรายต่อระบบได้ วิธีการแก้ไขปัญหาก็คือการเชื่อมต่อที่ว่างเหนือระดับสารละลายของภาชนะปฏิกรณ์ทั้งสามให้ถึงกันหมด เพื่อกระจายความดันให้เท่ากันหมด และก๊าซที่อยู่ภายในภาชนะปฏิกรณ์สามารถถ่ายเทความดันถึงกันได้ตลอด ดังนี้จะทำให้สารละลายแอมโมเนียสามารถไหลได้ด้วยความดันที่เกิดจากน้ำหนักของตัวเอง ในขณะที่ความดันภายนอกที่อยู่ด้านบนและด้านล่างจะหักล้างกันไปหมด ซึ่งจะเป็นการขจัดปัญหาเปิดวาล์วแล้วสารละลายแอมโมเนียไม่ไหล ยิ่งไปกว่านั้น เพื่อป้องกันมิให้ไอระเหยแอมโมเนียแพร่กระจายออกมาจากภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 มากเกินไป จึงต้องมีการติดตั้งโซลินอยด์วาล์วก่อนที่จะต่อกับท่อนำก๊าซเข้าไปยังภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 โดยกำหนดให้โซลินอยด์วาล์วตัวนี้เปิดปิดพร้อมกับโซลินอยด์วาล์วควบคุมการไหลของสารละลาย ดังนั้นเมื่อเปิดในขณะที่สารละลายกำลังไหล ความดันจะถูกปรับให้เท่ากัน และอากาศที่อยู่ในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 จะเข้าไปแทนที่ของเหลวที่ไหลออกมา เมื่อโซลินอยด์วาล์วทั้งสองตัวถูกปิดพร้อมกัน สารละลายแอมโมเนียก็จะไม่ไหลออก ในขณะที่ไอระเหยแอมโมเนียก็หลุดรอดออกไปไม่ได้ นอกจากนี้แล้ว หากว่าระบบมีความดันที่สูงมากเกินไป จำเป็นที่จะต้องมีการระบายความดันบางส่วนออกบ้างเพื่อความปลอดภัย ดังนั้นท่อเชื่อมความดันทั้ง 3 ภาชนะต้องนำไปต่อเข้ากับวาล์วระบายความดันอีกทางหนึ่ง ความดันที่ระบายออกนั้นไม่ควรปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยตรงเนื่องจากยังคงมีไอระเหยของแอมโมเนียบางส่วนปะปนอยู่ จึงต้องนำไปผ่านกรรมวิธีกำจัดไอระเหยของแอมโมเนียส่วนนี้เสียก่อน เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เจาะรูฝาหรือจุกปิดของภาชนะปฏิกรณ์ทั้งสามเพื่อต่อท่อซิลิโคนเชื่อมเข้าหากันโดยใช้ข้อต่อสี่ทาง และติดตั้งโซลินอยด์วาล์วไว้ระหว่างข้อต่อสี่ทางกับจุกปิดของภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ในขณะที่อีกทางที่เหลือได้ต่อเข้ากับวาล์วแบบรูปทรงกลมเพื่อใช้ในการเปิดระบายความดันโดยต่อท่อออกไปเข้าตู้กำจัดกลิ่น จะต้องเปิดวาล์วนี้เมื่อดำเนินการกระบวนการที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ปราศจากอันตรายที่เกิดจากความดันที่สูงเกินไป โดยได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.14 และ 3.15



รูปที่ 3.14 การต่อเชื่อมความดันอากาศภายในภาชนะปฏิกรณ์ถึงกันโดยใช้ท่อซิลิโคน



รูปที่ 3.15 ข้อต่อสี่ทางต่อเชื่อมความดันอากาศในภาชนะปฏิกรณ์ทั้งสามและท่อระบายความดัน

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการขับเคลื่อนให้เกิดการไหลโดยแรงโน้มถ่วงของโลก จึงต้องติดตั้งภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ในระดับที่สูงกว่าภาชนะปฏิกรณ์อื่นๆ นอกจากนี้แล้ว ข้อต่อ ท่อทาง และวาล์วก็ต้องติดตั้งในระดับความสูงที่ลดหลั่นกันมาตามลำดับเพื่อให้การไหลนั้นเกิด ประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงได้ใช้วิธียึดที่ยึดมือจับเหล็กไว้กับแท่นยึดอุปกรณ์ทดลองเพื่อติดตั้งมือจับ เหล็กโดยสามารถปรับเปลี่ยนความสูงได้ตามต้องการ

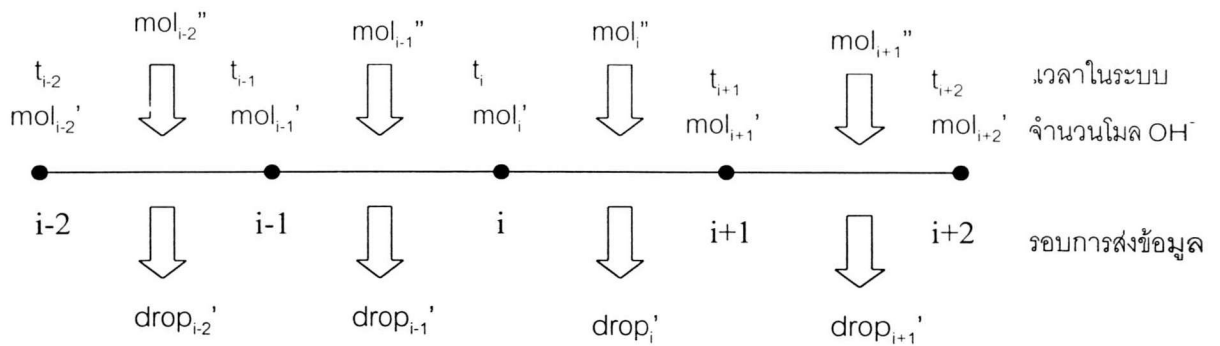
3.2.3.3.4 รูปแบบการคำนวณเพื่อกำหนดปริมาณการจ่ายสารละลาย แอมโมเนีย

ในงานวิจัยนี้ได้มีการกำหนดรูปแบบในการคำนวณเพื่อหาปริมาณสารละลาย แอมโมเนียที่ต้องเติมลงไปในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 เพื่อรักษาระดับของค่า pH ให้คงที่ตามที่ต้องการ โดยในการจ่ายสารละลายแอมโมเนียให้ได้ปริมาณตามที่คำนวณนั้นควรทำโดยใช้วิธีการปรับ อัตราการไหลของสารละลาย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวาล์วควบคุมชนิดปรับอัตราการไหลได้นั้นมี ราคาแพงมาก ด้วยงบประมาณที่จำกัด งานวิจัยนี้จึงได้ใช้วิธีการกำหนดค่าอัตราการไหลไว้คงที่ แล้วแปรเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการเปิดปิดโซลินอยด์วาล์วเพื่อให้ได้ปริมาณตามที่คำนวณออกมาได้ ในงานวิจัยนี้จะได้กำหนดการไหลให้มีอัตราที่คงที่โดยการเปิดวาล์วปรับด้วยมือแบบยกจนสุด เมื่อ ลองทดสอบเพื่อหาค่าอัตราการไหลในขณะที่เปิดโซลินอยด์วาล์วพบว่าอัตราการไหลโดยเฉลี่ยคือ 8.8 ml / sec รูปแบบการคำนวณที่ใช้นั้นมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีของกรดเบสและสมดุลของ ไอออน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากลักษณะของการส่งข้อมูลของเครื่องวัดค่า pH เพื่อนำไปประมวลผล ซึ่งจะมีการส่ง ข้อมูลออกทุกๆ 12 วินาที ในการคำนวณเพื่อกำหนดปริมาณการเติมสารละลายแอมโมเนียจึงได้ กำหนดให้เกิดขึ้นในทุกๆ รอบของการส่งข้อมูล กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ทุกๆ ครั้งที่มีข้อมูลส่งออกจาก เครื่องวัดค่า pH ซึ่งใช้เวลา 12 วินาทีโดยประมาณ ระบบควบคุมจะคำนวณปริมาณของ สารละลายแอมโมเนียที่ต้องเติมและคำนวณเวลาในการเปิดปิดโซลินอยด์วาล์วในรอบการส่ง ข้อมูลรอบหนึ่ง จากนั้นจึงดำเนินการเปิดปิดโซลินอยด์วาล์วตามเวลาที่คำนวณได้ในรอบการส่ง ข้อมูลนั้น แล้วจึงรอรับค่าข้อมูลถัดไปที่จะส่งเข้ามาในรอบใหม่ ซึ่งคล้ายกับเป็นข้อมูลตอบกลับ (Feedback data) เพื่อที่จะนำไปใช้ในการดำเนินการควบคุมในรอบการส่งข้อมูลถัดไปเป็นวัฏจักร อย่างนี้ไปเรื่อยๆ ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการผลิต

ค่า pH ตามที่ต้องการนั้นจะสามารถแสดงออกมาในอีกรูปแบบหนึ่งคือ ความเข้มข้น ของไฮดรอกไซด์ไอออน หรือ $[OH^-]$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 โดยก่อนอื่นจะต้องนิยามสัญลักษณ์และการเรียกชื่อต่างๆ ไว้ในเบื้องต้นดังต่อไปนี้

- กำหนดให้ ตัวห้อย (subscript) ระบุถึงรอบการส่งข้อมูลของเครื่องวัดค่า pH
- ตัวยก (superscript) ระบุถึงแหล่งที่มาของสารละลาย ดังต่อไปนี้คือ
- ตัวยก (superscript) ' หมายถึง สารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1
 - ตัวยก (superscript) " หมายถึง สายละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 (สารละลายแอมโมเนีย)
- V_i' (l) = ปริมาตรของสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ณ รอบการส่งข้อมูลที่ i
- V_i'' (l) = ปริมาตรของสารละลายแอมโมเนียในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ที่ใช้เติมเข้าไป ณ รอบการส่งข้อมูลที่ i
- H_i' (cm) = ระดับความสูงของสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ณ รอบการส่งข้อมูลที่ i
- Volt_i (V) = ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดระดับแบบต่อเนื่อง
- T_i' (°C) = อุณหภูมิของสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ณ รอบการส่งข้อมูลที่ i
- T_i'' (°C) = อุณหภูมิของสารละลายแอมโมเนียจากภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 หลังจากเติมผสมลงไป ในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ณ รอบการส่งข้อมูลที่ i
- pH_i' = ค่า pH ของสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ณ รอบการส่งข้อมูลที่ i
- pH_i'' = ค่า pH ของสารละลายแอมโมเนียในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ที่ใช้เติมเข้าไป ณ รอบการส่งข้อมูลที่ i
- $[\text{OH}^-]_i'$ (M) = ความเข้มข้นของ OH^- ในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ณ รอบการส่งข้อมูลที่ i
- $[\text{OH}^-]_i''$ (M) = ความเข้มข้นของ OH^- ในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ที่ใช้เติมเข้าไป ณ รอบการส่งข้อมูลที่ i
- mol_i' = จำนวนโมลของ OH^- ในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ณ รอบการส่งข้อมูลที่ i
- mol_i'' = จำนวนโมลของ OH^- ในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ที่ใช้เติมเข้าไป ณ รอบการส่งข้อมูลที่ i
- drop_i' = จำนวนโมลของ OH^- ที่ลดลงไปในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ณ รอบการส่งข้อมูลที่ i
- R_A (ml/min) = อัตราการเติมผสมสารตั้งต้น (Additional rate) จากภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2 ลงในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1
- t_i (sec) = เวลาในระบบ ณ รอบการส่งข้อมูลที่ i



รูปที่ 3.16 แผนภาพแสดงการควบคุมค่า pH ของสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1

จากแผนภาพการควบคุม pH ในแต่ละรอบการส่งข้อมูลของสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ดังรูปที่ 3.16 ณ รอบการส่งข้อมูลที่ i สำหรับสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1

พิจารณาอัตราการลดลงของโมลของ OH^- ใน 1 รอบการส่งข้อมูลดังต่อไปนี้

$$\text{mol}_i' = \text{mol}_{i-1}' + \text{mol}_{i-1}'' - \text{drop}_{i-1}'$$

$$\text{drop}_{i-1}' = \text{mol}_{i-1}' + \text{mol}_{i-1}'' - \text{mol}_i'$$

จาก $\text{mol} = [\text{OH}^-] V$

$$\therefore \text{drop}_{i-1}' = [\text{OH}^-]_{i-1}' V_{i-1}' + [\text{OH}^-]_{i-1}'' V_{i-1}'' - [\text{OH}^-]_i' V_i' \quad (3.1)$$

สมมติว่าสถานการณ์ปัจจุบันคือ รอบการส่งข้อมูลที่ i ดังนั้นรอบการส่งข้อมูลถัดไปคือรอบการส่งข้อมูลที่ $i+1$ ซึ่งข้อมูลต่างๆในรอบถัดไปนั้นจะมีผลเนื่องมาจากการเติมสารละลายแอมโมเนียและการลดลงของโมลของ OH^- ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{mol}_{i+1}' = \text{mol}_i' + \text{mol}_i'' - \text{drop}_i'$$

จาก $\text{mol} = [\text{OH}^-] V$

$$\text{จะได้ว่า } [\text{OH}^-]_{i+1}' V_{i+1}' = [\text{OH}^-]_i' V_i' + [\text{OH}^-]_i'' V_i'' - \text{drop}_i' \quad (3.2)$$

จากการพิจารณาสมการที่ (3.2) เนื่องจาก $[\text{OH}^-]_{i+1}'$ เป็นค่าที่อยู่ในสถานการณ์ของรอบการส่งข้อมูลถัดไปซึ่งค่าจริงนั้นยังไม่เกิดขึ้น แต่ค่านี้เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า pH ซึ่งเราได้กำหนดค่า pH ที่ต้องการควบคุมไว้เรียบร้อยแล้ว ในการคำนวณด้วยสมการที่ (3.2) จึงกำหนดค่า $[\text{OH}^-]_{i+1}'$ เป็นค่าคงที่เท่ากับความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนในสถานะที่ต้องการควบคุม ทั้งที่ในความเป็นจริงแล้ว ค่า $[\text{OH}^-]_{i+1}'$ ที่เกิดขึ้นจริงอาจจะมีค่าไม่เท่ากับค่าที่กำหนดไว้ได้ ซึ่งก็จะต้องควบคุมเป็นลักษณะวงรอบปิดอย่างนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนกว่าจะสิ้นสุดกระบวนการผลิต

เมื่อลองพิจารณา V_{i+1}' พบว่าในการคำนวณตามสมการที่ (3.2) แล้วจะต้องแยกคิดเป็นสองกรณี กรณีแรกคือในระหว่างขั้นตอนการเติมผสมสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2 ลงไปในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ปริมาตรของสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ที่จะเกิดขึ้นในรอบการส่งข้อมูลถัดไปนั้นคือผลรวมของปริมาตรของสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ในรอบการส่งข้อมูลปัจจุบัน ปริมาตรของสารละลายแอมโมเนียที่เติมเข้าไป และปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจากการเติมสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2 เข้าไปในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ด้วยซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของอัตราการเติมผสม (R_A) กับระยะเวลาในรอบการส่งข้อมูลปัจจุบันหรือ $t_{i+1} - t_i$ อย่างไรก็ตาม ค่า t_{i+1} นั้นยังไม่เกิดขึ้นและไม่สามารถระบุได้ แต่เป็นที่ทราบโดยประมาณแล้วเครื่องวัดค่า pH จะส่งข้อมูลออกทุกๆ 12 วินาที จึงสามารถกำหนดสมมติฐานได้ว่าผลต่างของเวลาในระบบสำหรับรอบการส่งข้อมูลถัดไปกับรอบการส่งข้อมูลปัจจุบันคือ 12 วินาที กรณีที่สองคือขั้นตอนอื่นๆ นอกเหนือจากกรณีแรก ปริมาตรของสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ที่จะเกิดขึ้นในรอบการส่งข้อมูลถัดไป คือผลรวมของปริมาตรของสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ในรอบการส่งข้อมูลปัจจุบัน กับปริมาตรของสารละลายแอมโมเนียที่เติมเข้าไปเพียงสองอย่างเท่านั้น อย่างไรก็ตามปริมาตรที่เกิดขึ้นจริงอาจจะมีความเป็นไปได้ว่ามีค่าไม่เท่ากับปริมาตรที่คำนวณไว้ เพราะว่าปริมาตรบางส่วนอาจหายไปเนื่องจากการกลายเป็นไอของของเหลว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการดำเนินกระบวนการผลิตที่อุณหภูมิสูง แต่ทั้งนี้ เนื่องจากเวลาในรอบการส่งข้อมูลนั้นถือว่าสั้น จึงสามารถกำหนดสมมติฐานได้ว่าปริมาตรส่วนที่หายไปนั้นมีค่าน้อยจนสามารถตัดทิ้งได้

สำหรับอัตราการลดลงไปโมลของ OH^- ในรอบการส่งข้อมูลปัจจุบันหรือ drop_i' นั้นเป็นค่าที่ยังไม่เกิดขึ้นจริงจึงมีความจำเป็นต้องคาดการณ์ล่วงหน้าเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในสมการที่ (3.2) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเวลาในรอบการส่งข้อมูลที่สั้น จึงสามารถกำหนดสมมติฐานได้เช่นกันว่าอัตราการลดลงของโมลของ OH^- ในรอบการส่งข้อมูลปัจจุบันหรือ drop_i' มีค่าใกล้เคียงกับอัตราการลดลงของโมลของ OH^- ในรอบการส่งข้อมูลก่อนหน้านั้นหรือ drop_{i-1}'

จากสมการที่ (3.1) กำหนดให้ $\text{drop}_{i-1}' = \text{drop}_i'$ แทนลงในสมการที่ (3.2) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 [\text{OH}]_{i+1}' V_{i+1}' &= [\text{OH}]_i' V_i' + [\text{OH}]_i'' V_i'' - ([\text{OH}]_{i-1}' V_{i-1}' + [\text{OH}]_{i-1}'' V_{i-1}'' - [\text{OH}]_i' V_i') \\
 &= [\text{OH}]_i' V_i' + [\text{OH}]_i'' V_i'' - [\text{OH}]_{i-1}' V_{i-1}' - [\text{OH}]_{i-1}'' V_{i-1}'' + [\text{OH}]_i' V_i' \\
 &= 2 [\text{OH}]_i' V_i' + [\text{OH}]_i'' V_i'' - [\text{OH}]_{i-1}' V_{i-1}' - [\text{OH}]_{i-1}'' V_{i-1}'' \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

ในกรณีที่อยู่ในขั้นตอนการเติมผสมสารตั้งต้นของภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2 ลงในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 จากสมการที่ (3.3) สามารถคำนวณหาปริมาตรของสารละลายแอมโมเนียจากภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ที่ต้องเติมลงไปในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 [\text{OH}^-]_{i+1}' (V_i' + V_i'' + 12R_A \times 10^{-3} / 60) &= 2 [\text{OH}^-]_i' V_i' + [\text{OH}^-]_i'' V_i'' - [\text{OH}^-]_{i-1}' V_{i-1}' - \\
 &\quad [\text{OH}^-]_{i-1}'' V_{i-1}'' \\
 [\text{OH}^-]_{i+1}' V_i' + [\text{OH}^-]_{i+1}'' V_i'' + 0.0002 [\text{OH}^-]_{i+1}' R_A &= 2 [\text{OH}^-]_i' V_i' + [\text{OH}^-]_i'' V_i'' - [\text{OH}^-]_{i-1}' V_{i-1}' - \\
 &\quad [\text{OH}^-]_{i-1}'' V_{i-1}'' \\
 V_i'' ([\text{OH}^-]_i'' - [\text{OH}^-]_{i+1}') &= V_i' ([\text{OH}^-]_{i+1}' - 2 [\text{OH}^-]_i') + [\text{OH}^-]_{i-1}' V_{i-1}' + \\
 &\quad [\text{OH}^-]_{i-1}'' V_{i-1}'' + 0.0002 [\text{OH}^-]_{i+1}' R_A \\
 V_i'' &= \frac{V_i' ([\text{OH}^-]_{i+1}' - 2 [\text{OH}^-]_i') + [\text{OH}^-]_{i-1}' V_{i-1}' + [\text{OH}^-]_{i-1}'' V_{i-1}'' + 0.2 [\text{OH}^-]_{i+1}' R_A}{([\text{OH}^-]_i'' - [\text{OH}^-]_{i+1}')}
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

อย่างไรก็ดี เนื่องจากช่วงที่มีการเติมผสมสารจากภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2 ไปยังภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 นั้น จะมีช่วงเวลาหน่วงอยู่ช่วงหนึ่งก่อนที่สารตั้งต้นจะเริ่มผสมกันเนื่องจากทันทีที่เริ่มต้นขั้นตอนการเติมผสมนั้น ปัมควบคุมการไหลจะเริ่มทำงานโดยดูดสารตั้งต้นจากภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2 เข้ามาในท่อซิลิโคน เช่นเดียวกันกับในตอนสิ้นสุดการเติมผสม ถึงแม้ว่าสารตั้งต้นในภาชนะปฏิกรณ์จะหมดแล้ว แต่สารตั้งต้นดังกล่าวยังคงค้างอยู่เต็มท่อซิลิโคนซึ่งยังคงต้องใช้เวลาอีกระยะหนึ่งให้ปัมทำงานจนกระทั่งไม่มีสารตั้งต้นค้างอยู่ในท่อซิลิโคน ช่วงเวลาดังกล่าวทั้งสองกรณีถือได้ว่ามากอย่างมีนัยสำคัญและมีขนาดที่เท่ากัน และสามารถคำนวณได้จากความยาวของท่อซิลิโคน เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ และอัตราการเติมผสม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

กำหนดให้ t_{D1} (sec) คือเวลาหน่วงช่วงเริ่มต้นและสิ้นสุดการเติมผสมสารตั้งต้น

$$\begin{aligned}
 \text{ความยาวของท่อซิลิโคน (cm)} &= 132.560 \text{ cm} \\
 \text{เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (cm)} &= 0.480 \text{ cm} \\
 \text{ปริมาตรของท่อ (ml)} &= \frac{\pi \times 0.480^2}{4} \times 132.560 \\
 &= 23.987 \text{ ml} \\
 \therefore \text{เวลาหน่วงที่เกิดขึ้น (} t_{D1}, \text{ sec)} &= 23.987 \times 60 / R_A \\
 &= 1,439.22 / R_A
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

ในกรณีที่อยู่ในขั้นตอนอื่นๆ นอกเหนือจากขั้นตอนการเติมผสมสารตั้งต้น จากสมการที่ (3.3) สามารถคำนวณหาปริมาตรของสารละลายแอมโมเนียจากภาวะปฏิกิริยาที่ 3 ที่ต้องเติมลงไป ในภาวะปฏิกิริยาที่ 1 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 [\text{OH}^-]_{i+1}' (V_i' + V_i'') &= 2 [\text{OH}^-]_i' V_i' + [\text{OH}^-]_i'' V_i'' - [\text{OH}^-]_{i-1}' V_{i-1}' - [\text{OH}^-]_{i-1}'' V_{i-1}'' \\
 [\text{OH}^-]_{i+1}' V_i' + [\text{OH}^-]_{i+1}'' V_i'' &= 2 [\text{OH}^-]_i' V_i' + [\text{OH}^-]_i'' V_i'' - [\text{OH}^-]_{i-1}' V_{i-1}' - [\text{OH}^-]_{i-1}'' V_{i-1}'' \\
 V_i'' ([\text{OH}^-]_i'' - [\text{OH}^-]_{i+1}') &= V_i' ([\text{OH}^-]_{i+1}' - 2 [\text{OH}^-]_i') + [\text{OH}^-]_{i-1}' V_{i-1}' + [\text{OH}^-]_{i-1}'' V_{i-1}''
 \end{aligned}$$

$$V_i'' = \frac{V_i' ([\text{OH}^-]_{i+1}' - 2 [\text{OH}^-]_i') + [\text{OH}^-]_{i-1}' V_{i-1}' + [\text{OH}^-]_{i-1}'' V_{i-1}''}{([\text{OH}^-]_i'' - [\text{OH}^-]_{i+1}')} \quad (3.6)$$

หลังจากที่ได้ทราบสูตรคำนวณปริมาตรของสารละลายแอมโมเนียที่ต้องเติมลงไป ในภาวะปฏิกิริยาที่ 1 เพื่อการปรับค่า pH แล้วตั้งสมการที่ (3.4) และ (3.6) พบว่า จะต้องมีการแปลงค่า $[\text{OH}^-]$ ต่างๆ เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลนำเข้า โดยแยกพิจารณาดังต่อไปนี้

ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนในภาวะปฏิกิริยาที่ 1 หรือ $[\text{OH}^-]'$ สามารถเปลี่ยนรูปให้อยู่ในเทอมของค่า pH' ซึ่งเป็นข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องวัดค่า pH ได้ดังนี้

จากสมการที่ (2.23) แทนลงในสมการที่ (2.24) จะได้ว่า

$$\text{pH} + \text{pOH} = \text{pK}_w$$

$$\text{pH} + (-\log [\text{OH}^-]) = \text{pK}_w$$

$$-\log [\text{OH}^-] = \text{pK}_w - \text{pH}$$

$$[\text{OH}^-] = 10^{\text{pH} - \text{pK}_w}$$

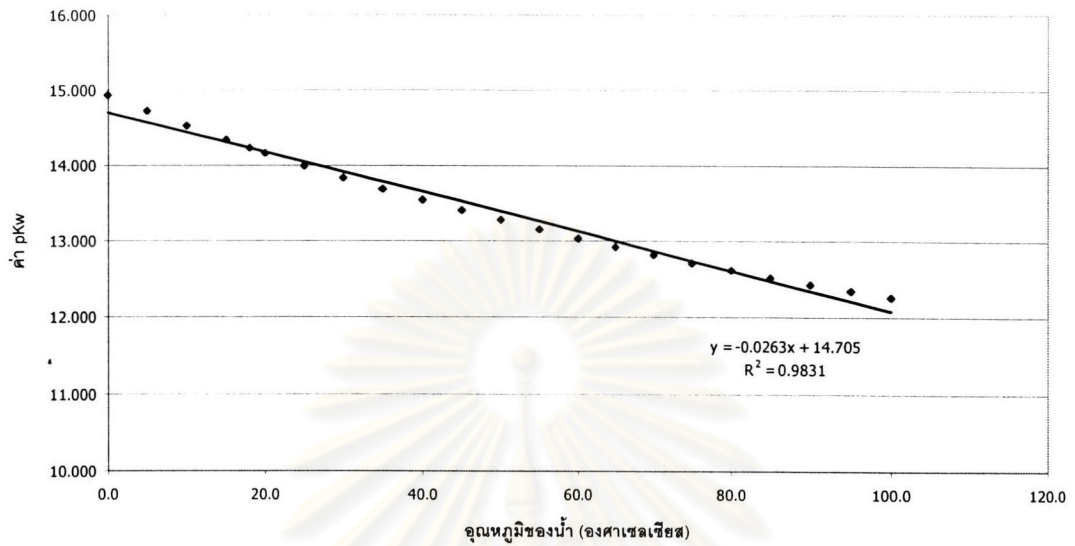
$$\therefore [\text{OH}^-]_{i-1}' = 10^{\text{pH}_{i-1}' - \text{pK}_{w,i-1}} \quad (3.7)$$

$$[\text{OH}^-]_i' = 10^{\text{pH}_i' - \text{pK}_{w,i}} \quad (3.8)$$

$$[\text{OH}^-]_{i+1}' = 10^{\text{pH}_{i+1}' - \text{pK}_{w,i+1}} \quad (3.9)$$

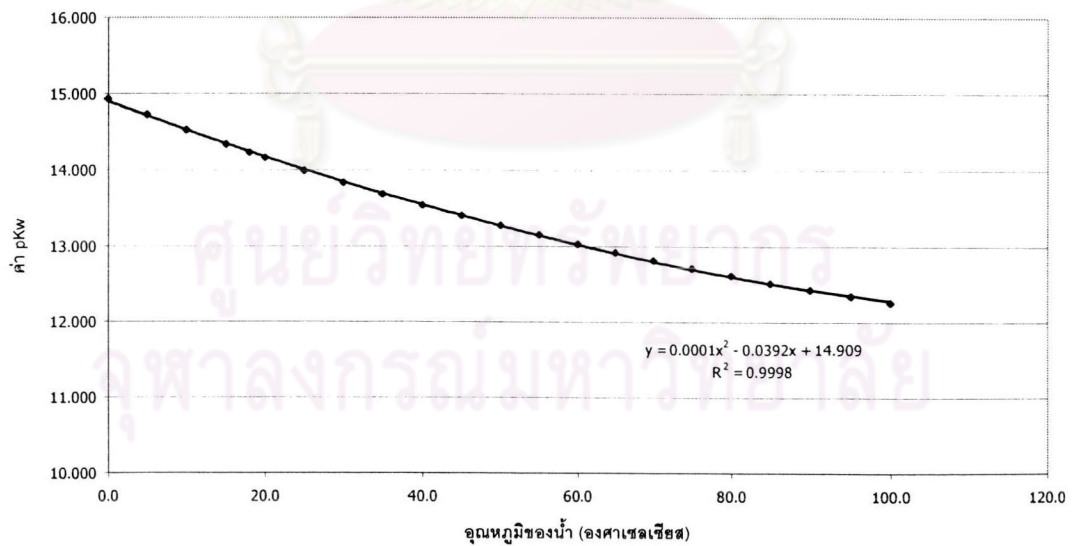
จากตารางที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าค่า pK_w นั้นแปรผันตามอุณหภูมิของสารละลาย และสามารถนำไปพล็อตกราฟเพื่อหาสมการเส้นแนวโน้มโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) เพื่อเลือกสมการที่ดีที่สุดในการทำนายค่า pK_w ในช่วงอุณหภูมิ 0 °C จนถึง 100 °C ได้ดังต่อไปนี้

ค่า pKw ของน้ำ



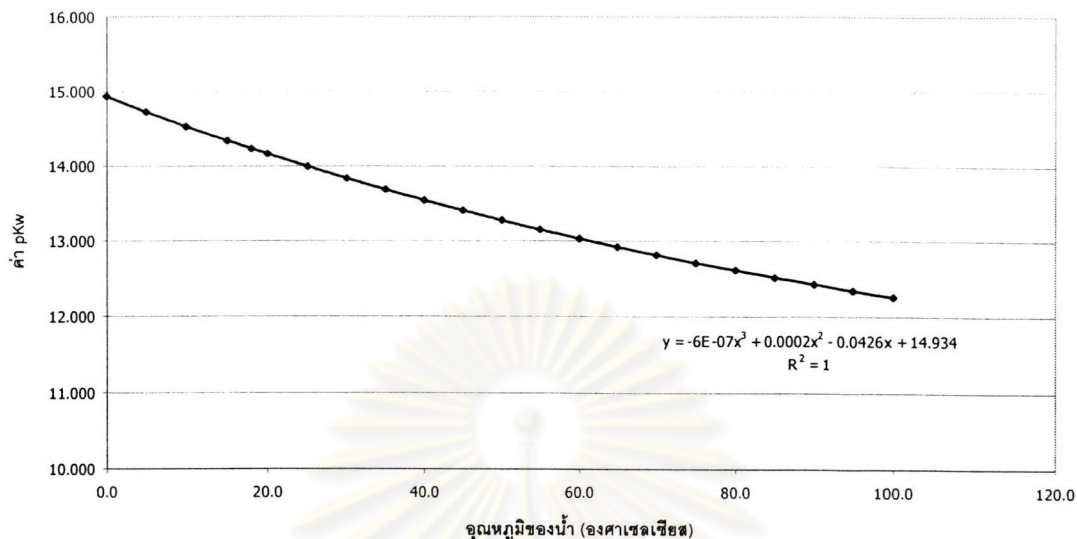
(ก)

ค่า pKw ของน้ำ



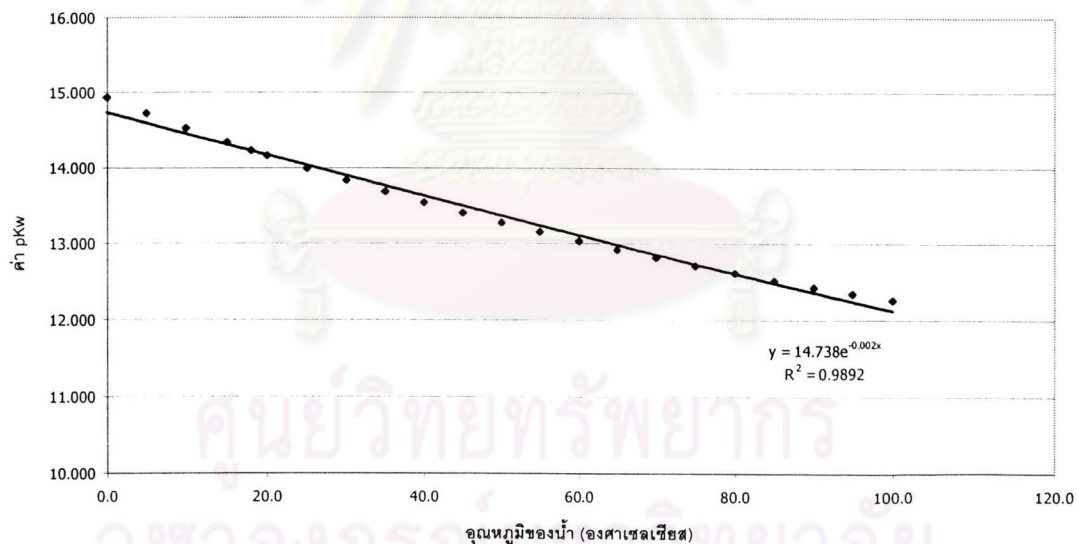
(ข)

ค่า pKw ของน้ำ



(ค)

ค่า pKw ของน้ำ



(ง)

รูปที่ 3.17 การพล็อตกราฟระหว่างค่า pK_w และอุณหภูมิของน้ำเพื่อหาเส้นแนวโน้ม สมการ ความสัมพันธ์ และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2)

- (ก) พล็อตด้วยสมการเส้นตรง
- (ข) พล็อตด้วยสมการพหุนามกำลัง 2
- (ค) พล็อตด้วยสมการพหุนามกำลัง 3
- (ง) พล็อตด้วยสมการเอ็กซ์โปเนนเชียล

จากการพิจารณารูปที่ 3.17 จะเห็นได้ว่าสมการที่เป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมดได้ดีที่สุดคือ สมการพหุนามกำลัง 3 (รูปที่ 3.17ค) ซึ่งมีค่า R^2 สูงที่สุด จึงได้เลือกใช้สมการนี้ในการทำนายค่า pK_w ในช่วงอุณหภูมิดำเนินการของงานวิจัยนี้ นั่นคือ

$$pK_w = (-6E-07)T^3 + 0.0002T^2 - 0.0426T + 14.934$$

$$\therefore pK_{w_{i-1}} = (-6E-07)T_{i-1}^3 + 0.0002T_{i-1}^2 - 0.0426T_{i-1} + 14.934 \quad (3.10)$$

$$pK_{w_i} = (-6E-07)T_i^3 + 0.0002T_i^2 - 0.0426T_i + 14.934 \quad (3.11)$$

$$pK_{w_{i+1}} = (-6E-07)T_{i+1}^3 + 0.0002T_{i+1}^2 - 0.0426T_{i+1} + 14.934 \quad (3.12)$$

เนื่องจากอุณหภูมิในรอบการส่งข้อมูลถัดไปหรือ T_{i+1} นั้นยังไม่สามารถระบุได้แน่ชัด จำเป็นต้องคาดการณ์เพิ่มเติม แต่เนื่องจากเวลาในวงรอบการส่งข้อมูลที่สั้น จึงสามารถกำหนดสมมติฐานได้ว่าอุณหภูมิในรอบการส่งข้อมูลปัจจุบันหรือ T_{i+1} มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิในรอบการส่งข้อมูลปัจจุบันหรือ T_i ดังนั้น สมการที่ (3.12) จึงสามารถประมาณค่าได้ตามสมการนี้

$$pK_{w_{i+1}} = (-6E-07)T_i^3 + 0.0002T_i^2 - 0.0426T_i + 14.934 \quad (3.13)$$

นำสมการที่ (3.10) (3.11) และ (3.13) ไปแทนในสมการที่ (3.7) (3.8) และ (3.9) ตามลำดับ จะได้ว่า

$$[OH^-]_{i-1}' = 10^{pH_{i-1}' + (6 \times 10^{-7})T_{i-1}^3 - 0.0002T_{i-1}^2 + 0.0426T_{i-1}' - 14.934} \quad (3.14)$$

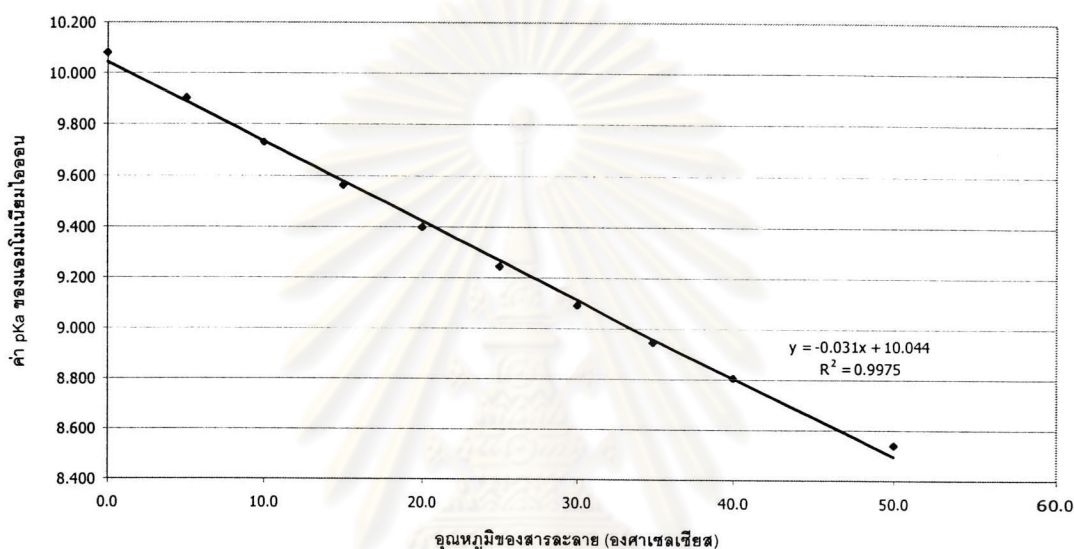
$$[OH^-]_i' = 10^{pH_i' + (6 \times 10^{-7})T_i^3 - 0.0002T_i^2 + 0.0426T_i' - 14.934} \quad (3.15)$$

$$[OH^-]_{i+1}' = 10^{pH_{i+1}' + (6 \times 10^{-7})T_i^3 - 0.0002T_i^2 + 0.0426T_i' - 14.934} \quad (3.16)$$

พิจารณาอีกด้านหนึ่งเกี่ยวกับความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนจากสารละลายแอมโมเนียในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ที่เติมเข้าไปในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 หรือ $[OH^-]$ พบว่ามีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ของการแตกตัวเป็นไอออนของเบสหรือ K_b ซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อเติมสารละลายแอมโมเนียในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ลงไปในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้ค่า K_b เพิ่มขึ้นมีผลให้การแตกตัวเป็นไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงไม่สามารถละลายปัจจัยด้านอุณหภูมิได้ ต้องนำมาเป็นตัวแปรหนึ่งในการคำนวณหาความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนจากสารละลายแอมโมเนีย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสารละลายแอมโมเนียที่เติมลงไปในแต่ละรอบการส่งข้อมูลนั้นถือว่ามีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับสารละลายที่อยู่ในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ดังนั้นจึงกำหนดสมมติฐานว่าหลังจากที่ผสมสารละลายแอมโมเนียลงไปในรอบการส่งข้อมูลหนึ่งแล้ว สารละลายแอมโมเนียจะทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมอย่างไม่มีนัยสำคัญ จึงประมาณได้ว่า $T_i' \cong T_i$

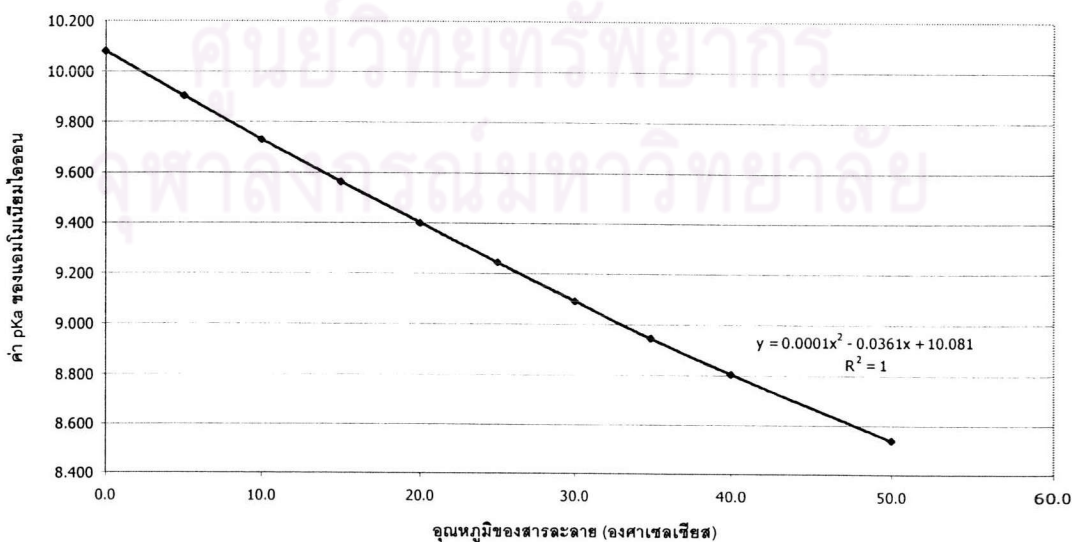
จากตารางที่ 2.6 ซึ่งแสดงข้อมูลของค่า pK_a ค่า ของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ตั้งแต่ $0 - 50\text{ }^{\circ}C$ จะสามารถนำไปพล็อตกราฟเพื่อหาสมการเส้นแนวโน้มโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) เพื่อหาสมการที่ดีที่สุดในการทำนายค่า pK_a ของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ในช่วงอุณหภูมิ $0\text{ }^{\circ}C$ จนถึง $50\text{ }^{\circ}C$ ได้ดังต่อไปนี้

ค่า pK_a ของแอมโมเนียมไอออนที่อุณหภูมิต่างๆ



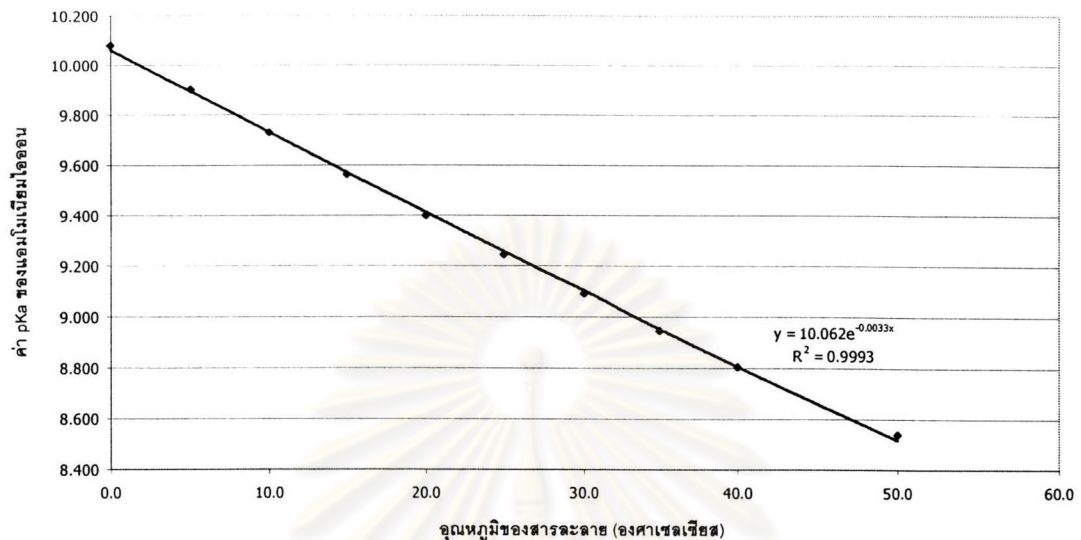
(ก)

ค่า pK_a ของแอมโมเนียมไอออนที่อุณหภูมิต่างๆ



(ข)

ค่า pKa ของแอมโมเนียมไอออนที่อุณหภูมิต่างๆ



(ค)

รูปที่ 3.18 การพล็อตกราฟระหว่างค่า pK_a ของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และอุณหภูมิของสารละลายเพื่อหาเส้นแนวโน้ม สมการความสัมพันธ์ และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2)

- (ก) พล็อตด้วยสมการเส้นตรง
- (ข) พล็อตด้วยสมการพหุนามกำลัง 2
- (ค) พล็อตด้วยสมการเอ็กซ์โปเนนเชียล

จากการพิจารณารูปที่ 3.18 จะเห็นได้ว่าสมการที่เป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมดได้ดีที่สุดคือ สมการพหุนามกำลัง 2 (รูปที่ 3.18ข) ซึ่งมีค่า R^2 สูงที่สุด จึงได้เลือกใช้สมการนี้ในการทำนายค่า pK_a ของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ในช่วงอุณหภูมิ $0^\circ C$ ถึง $50^\circ C$ นั่นคือ

$$pK_a = 0.0001T^2 - 0.0361T + 10.081$$

$$\therefore pK_{a,i-1} = 0.0001T_{i-1}^2 - 0.0361T_{i-1} + 10.081 \quad (3.17)$$

$$pK_{a,i} = 0.0001T_i^2 - 0.0361T_i + 10.081 \quad (3.18)$$

หาค่า pK_b ได้จากสมการที่ (2.22) จะได้ว่า

$$pK_b = pK_w - pK_a \quad (3.19)$$

นำสมการที่ (3.10) และสมการที่ (3.17) ไปแทนค่าในสมการที่ (3.19);

$$pK_{b_{i-1}} = (-6E-07)T_{i-1}'^3 + 0.0001T_{i-1}'^2 - 0.0065T_{i-1}' + 4.853 \quad (3.20)$$

นำสมการที่ (3.11) และสมการที่ (3.18) ไปแทนค่าในสมการที่ (3.19);

$$pK_{b_i} = (-6E-07)T_i'^3 + 0.0001T_i'^2 - 0.0065T_i' + 4.853 \quad (3.21)$$

สมการที่ (3.20) และ (3.21) เป็นสมการที่ใช้ในการทำนายค่า pK_b ของสารละลายแอมโมเนีย ในช่วงอุณหภูมิ 0°C จนถึง 50°C แต่งานวิจัยนี้ดำเนินการบรรณการผลิตที่อุณหภูมิสูงกว่าช่วงดังกล่าว การใช้สมการที่ (3.20) และ (3.21) ในการประมาณค่า pK_b นอกช่วงการใช้งานดังกล่าวอาจทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้ ดังนั้นจึงได้นำทฤษฎีการคำนวณมาประยุกต์ใช้เพื่อประมาณหาค่า pK_b ในช่วงอุณหภูมิ 50°C ถึง 100°C จากสมการที่ (2.17) โดยตั้งสมมติฐานว่าอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก (ในงานวิจัยนี้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปไม่เกิน 100 K) จึงกำหนดให้

$$\Delta C_p \text{ (ที่อุณหภูมิใดๆ)} \cong \Delta C_p^0$$

$$\Delta H^0 \text{ (ที่อุณหภูมิใดๆ)} \cong \Delta H_{298}^0$$

$$\Delta S \text{ (ที่อุณหภูมิใดๆ)} \cong \Delta S^0$$

จากสมการสมดุลไอออน



เมื่อพิจารณาตารางที่ 2.4 สามารถคำนวณหาค่าต่างๆทางอุณหพลศาสตร์ได้ดังนี้

$$\Delta H^0 = (-133.26) + (-230.015) - (-80.29) - (-285.830)$$

$$= 2.845 \text{ kJ / mol}$$

$$\Delta S^0 = 111.17 + (-10.90) - 111.3 - 69.95$$

$$= -80.98 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$$

จากสมการที่ (2.17) เมื่อให้ T หน่วยเป็นองศาเซลเซียสจะได้ว่า

$$\ln K_b = -\frac{\Delta H^0}{R(T+273)} + \frac{\Delta S^0}{R}$$

$$2.303 \log K_b = -\frac{\Delta H^0}{R(T+273)} + \frac{\Delta S^0}{R}$$

$$-\log K_b = \frac{\Delta H^0}{2.303R(T+273)} - \frac{\Delta S^0}{2.303R}$$

$$pK_b = \frac{\Delta H^0}{2.303R(T+273)} - \frac{\Delta S^0}{2.303R} \quad (3.22)$$

แทนค่า $\Delta H^0 = 2,845 \text{ J/mol}$, $\Delta S^0 = -80.98 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ และ $R = 8.3143 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ ลงในสมการที่ (3.22);

$$pK_b = \frac{2,845}{2.303 \times 8.3143 \times (T + 273)} - \frac{(-80.98)}{2.303 \times 8.3143}$$

$$pK_b = \frac{148.581}{T + 273} + 4.229$$

$$\therefore pK_{b_{i-1}} = \frac{148.581}{T_{i-1} + 273} + 4.229 \quad (3.23)$$

$$pK_{b_i} = \frac{148.581}{T_i + 273} + 4.229 \quad (3.24)$$

จะได้ว่าสมการที่ (3.23) และ (3.24) เป็นสมการที่ใช้ในการทำนายค่า pK_b ในช่วงอุณหภูมิ 50°C จนถึง 100°C

จากการคำนวณความเข้มข้นของเบส (C_0) เมื่อสารละลายแอมโมเนีย 28% โดยมวลมีความเข้มข้น 14.632 M ดังนั้น $C_0 = 14.632 \text{ M}$

จากสมการที่ (3.21)

$$\begin{aligned} pK_b (\text{ที่ } 0^\circ\text{C}) &= (-6\text{E-}07)(0)^3 + 0.0001(0)^2 - 0.0065(0) + 4.853 \\ &= 4.853 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_b (\text{ที่ } 0^\circ\text{C}) &= 10^{-4.853} \\ &= 1.403 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (3.24)

$$\begin{aligned} pK_b (\text{ที่ } 100^\circ\text{C}) &= 148.581/(100+273) + 4.229 \\ &= 4.627 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_b (\text{ที่ } 100^\circ\text{C}) &= 10^{-4.627} \\ &= 2.360 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

ในช่วงอุณหภูมิ 0°C จนถึง 100°C เนื่องจาก $1,000 < 620,000 \leq C_0 / K_b \leq 1,042,908.054$ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 มีค่าคงที่จึงสามารถคำนวณค่า $[\text{OH}^-]$ จากสมการที่ (2.26) ได้ดังต่อไปนี้

$$[\text{OH}^-]'' = \sqrt{14.632K_b} \quad (3.25)$$

ที่อุณหภูมิ 0 °C จนถึง 50 °C จะสามารถคำนวณหา $[\text{OH}^-]''$ ได้โดยการแทนสมการที่ (3.20) และ (3.21) ลงในสมการที่ (3.25) จะได้ว่า

$$[\text{OH}^-]_{i-1}'' = \sqrt{14.632 \times 10^{(6 \times 10^{-7})T_{i-1}'^3 - 0.0001T_{i-1}'^2 + 0.0065T_{i-1}' - 4.853}} \quad (3.26)$$

$$[\text{OH}^-]_i'' = \sqrt{14.632 \times 10^{(6 \times 10^{-7})T_i'^3 - 0.0001T_i'^2 + 0.0065T_i' - 4.853}} \quad (3.27)$$

ที่อุณหภูมิ 50 °C จนถึง 100 °C จะสามารถคำนวณหา $[\text{OH}^-]''$ ได้โดยการแทนสมการที่ (3.23) และ (3.24) ลงในสมการที่ (3.25) จะได้ว่า

$$[\text{OH}^-]_{i-1}'' = \sqrt{14.632 \times 10^{\frac{-148.581}{T_{i-1}'+273} - 4.229}} \quad (3.28)$$

$$[\text{OH}^-]_i'' = \sqrt{14.632 \times 10^{\frac{-148.581}{T_i'+273} - 4.229}} \quad (3.29)$$

ในส่วนของการหาค่า V_i' นั้นจำเป็นต้องมีการสอบเทียบจากอุปกรณ์ตรวจวัดระดับอย่างต่อเนื่อง ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดระดับอย่างต่อเนื่องนี้จะกำหนดให้ปลายของแท่งตรวจวัดติดอยู่ที่ก้นภาชนะ เมื่อพิจารณารูปที่ 3.10 และตารางที่ 3.4 ประกอบ พบว่าเมื่อกำหนดอุปกรณ์ตรวจวัดจะส่งสัญญาณเป็นศักย์ไฟฟ้า อุปกรณ์ตรวจวัดจะส่งสัญญาณขนาด 0.00 – 10.00 V โดยสามารถวัดระดับได้ตั้งแต่ 1.5 cm จนถึง 21.0 cm เมื่อสัญญาณขาเข้าแบบอนาล็อก (Volt_i) แปรผันในลักษณะเชิงเส้นกับระดับความสูงของสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 (H_i') จึงสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

$$H_i' = m \text{ Volt}_i + c$$

$$\text{ค่าความชัน (m)} = (21.0 - 1.5) / (10.00 - 0.00) = 1.95$$

$$\text{ค่าจุดตัดแกน (c)} = 1.5$$

$$\therefore H_i' = 1.95 \text{ Volt}_i + 1.5 \quad (3.30)$$

$$\text{เนื่องจาก } V_i' = \pi D^2 H_i' \times 10^{-3} / 4$$

$$\text{เมื่อ } D = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1}$$

$$= 4 \text{ นิ้ว} = 2.54 \times 4 \text{ cm} = 10.16 \text{ cm}$$

$$\text{จะได้ว่า } V_i' = \pi \times 10.16^2 \times H_i' \times 10^{-3} / 4 \quad \text{แทนค่าด้วย (3.30);}$$

$$V_i' = 10.16^2 \pi (1.95 \text{ Volt}_i + 1.5) / 4,000$$

$$V_i' = 0.158 \text{ Volt}_i + 0.122 \quad (3.31)$$

ดังนั้นจากแนวทางในการคำนวณทั้งหมดสามารถหาข้อสรุปต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

• ข้อกำหนดสมมติฐาน

- 1) ให้สถานภาพ i เป็นสถานภาพของรอบการส่งข้อมูลปัจจุบัน
- 2) $t_{i+1} - t_i \cong 12$ เนื่องจากเครื่องวัดค่า pH ซึ่งจะมีการส่งข้อมูลออกทุกๆ 12 วินาที โดยประมาณ
- 3) $V_{i+1}' \cong V_i' + V_i'' + 12R_A \times 10^{-3} / 60$ ในกรณีที่เป็นขั้นตอนการเติมผสมสารตั้งต้น
 $V_{i+1}' \cong V_i' + V_i''$ ในกรณีที่เป็นขั้นตอนอื่นๆ นอกเหนือจากขั้นตอนการเติมผสม โดยข้อกำหนดดังกล่าวจะถือว่าไม่คิดว่ามีปริมาตรบางส่วนที่หายไปจากการกลายเป็นไอเนื่องจากเวลาในวงรอบการส่งข้อมูลสั้น
- 4) $drop_{i+1}' \cong drop_i'$ เนื่องจากเวลาในวงรอบการส่งข้อมูลสั้น จึงประมาณค่าอัตราการลดลงของโมลไฮดรอกไซด์ไอออนว่าใกล้เคียงกับวงรอบที่ผ่านมา
- 5) $T_{i+1}' \cong T_i'$ เนื่องจากเวลาในวงรอบการส่งข้อมูลที่สั้น จึงประมาณค่าอุณหภูมิของสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ในรอบการส่งข้อมูลถัดไปว่าใกล้เคียงกับรอบการส่งข้อมูลปัจจุบัน
- 6) $T_i' \cong T_i''$ เนื่องจากถือว่าปริมาณสารละลายแอมโมเนียที่เติมเข้าไปในรอบการส่งข้อมูลที่ i มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของสารละลายทั้งหมดในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1
- 7) ΔC_p (ที่อุณหภูมิใดๆ) $\cong \Delta C_p^0$
 ΔH^0 (ที่อุณหภูมิใดๆ) $\cong \Delta H_{298}^0$
 ΔS (ที่อุณหภูมิใดๆ) $\cong \Delta S^0$
 เนื่องจากถือว่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก
- 8) $[OH]'' \cong \sqrt{14.632K_b}$ เนื่องจาก $C_0 / K_b > 1,000$
- 9) กำหนดให้อัตราการไหลของสารละลายแอมโมเนียเมื่อเปิดวาล์วสุดมีค่าคงที่ตลอดเท่ากับอัตราการไหลเฉลี่ยคือ 8.8 ml / sec เนื่องจากเมื่อลองคำนวณจากทฤษฎีโดยใช้สมการของเบอร์นูลลีและสมการความต่อเนื่องพบว่าค่าที่คำนวณได้มากกว่าค่าจริงประมาณ 10 เท่า เพราะช่องทางการไหลบางจุดมีขนาดเล็กและแคบจึงเกิดความเสียดทานมาก และบางจุดเกิดการจำกัดการไหล เช่นการไหลผ่านวาล์ว และไม่สามารถไหลได้ตามทฤษฎีการไหลของของไหลแบบอุดมคติซึ่งไม่คำนึงถึงความเสียดทานที่เกิดขึ้น

• สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณของสารละลายแอมโมเนีย

1) ในกรณีที่อยู่ในขั้นตอนการเติมผสมสารตั้งต้นของภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2 ลงในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1

กำหนดช่วงเวลาน้อง (t_{D1} , sec) เพื่อให้ปั๊มทำงานก่อนและหลังขั้นตอนการเติมผสมสารตั้งต้นดังสมการที่ (3.5) โดยที่

$$\text{เวลาน้องที่เกิดขึ้น } (t_{D1}, \text{ sec}) = 1,439.22 / R_A$$

(ก) เมื่ออุณหภูมิของสารละลายอยู่ในช่วง 0°C จนถึง 50°C แทนสมการที่ (3.14), (3.15), (3.16), (3.26), (3.27) และ (3.31) ลงในสมการที่ (3.4) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} V_i'' = & ((0.158 \text{ Volt}_i + 0.122)(10^{\text{pH}_{i+1}' + (6 \times 10^{-7})T_i'^3 - 0.0002T_i'^2 + 0.0426T_i' - 14.934} - \\ & 2 \times 10^{\text{pH}_i' + (6 \times 10^{-7})T_i'^3 - 0.0002T_i'^2 + 0.0426T_i' - 14.934}) + \\ & 10^{\text{pH}_{i-1}' + (6 \times 10^{-7})T_{i-1}'^3 - 0.0002T_{i-1}'^2 + 0.0426T_{i-1}' - 14.934} \times (0.158 \text{ Volt}_{i-1} + 0.122) + \\ & \sqrt{14.632 \times 10^{(6 \times 10^{-7})T_{i-1}'^3 - 0.0001T_{i-1}'^2 + 0.0065T_{i-1}' - 4.853}} \times V_{i-1}'' + 0.2 \times \\ & 10^{\text{pH}_{i+1}' + (6 \times 10^{-7})T_i'^3 - 0.0002T_i'^2 + 0.0426T_i' - 14.934} \times R_A) / \\ & (\sqrt{14.632 \times 10^{(6 \times 10^{-7})T_i'^3 - 0.0001T_i'^2 + 0.0065T_i' - 4.853}} - \\ & 10^{\text{pH}_{i+1}' + (6 \times 10^{-7})T_i'^3 - 0.0002T_i'^2 + 0.0426T_i' - 14.934}) \end{aligned} \quad (3.32)$$

(ข) เมื่ออุณหภูมิของสารละลายอยู่ในช่วง 50°C จนถึง 100°C แทนสมการที่ (3.14), (3.15), (3.16), (3.28), (3.29) และ (3.31) ลงในสมการที่ (3.4) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} V_i'' = & ((0.158 \text{ Volt}_i + 0.122)(10^{\text{pH}_{i+1}' + (6 \times 10^{-7})T_i'^3 - 0.0002T_i'^2 + 0.0426T_i' - 14.934} - \\ & 2 \times 10^{\text{pH}_i' + (6 \times 10^{-7})T_i'^3 - 0.0002T_i'^2 + 0.0426T_i' - 14.934}) + \\ & 10^{\text{pH}_{i-1}' + (6 \times 10^{-7})T_{i-1}'^3 - 0.0002T_{i-1}'^2 + 0.0426T_{i-1}' - 14.934} \times (0.158 \text{ Volt}_{i-1} + 0.122) + \\ & \sqrt{14.632 \times 10^{\frac{-148.581}{T_{i-1}' + 273} - 4.229}} \times V_{i-1}'' + 0.2 \times \\ & 10^{\text{pH}_{i+1}' + (6 \times 10^{-7})T_i'^3 - 0.0002T_i'^2 + 0.0426T_i' - 14.934} \times R_A) / (\sqrt{14.632 \times 10^{\frac{-148.581}{T_i' + 273} - 4.229}} - \\ & 10^{\text{pH}_{i+1}' + (6 \times 10^{-7})T_i'^3 - 0.0002T_i'^2 + 0.0426T_i' - 14.934}) \end{aligned} \quad (3.33)$$

2) ในกรณีที่อยู่ในขั้นตอนอื่นๆ นอกเหนือจากขั้นตอนการเติมผสมสารตั้งต้น

(ก) เมื่ออุณหภูมิของสารละลายอยู่ในช่วง 0°C จนถึง 50°C แทนสมการที่ (3.14), (3.15), (3.16), (3.26), (3.27) และ (3.31) ลงในสมการที่ (3.6) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 V_i'' &= ((0.158 \text{ Volt}_i + 0.122)(10^{\text{pH}_{i+1} + (6 \times 10^{-7})T_i^3 - 0.0002T_i^2 + 0.0426T_i - 14.934} - \\
 & 2 \times 10^{\text{pH}_i + (6 \times 10^{-7})T_i^3 - 0.0002T_i^2 + 0.0426T_i - 14.934}) + \\
 & 10^{\text{pH}_{i-1} + (6 \times 10^{-7})T_{i-1}^3 - 0.0002T_{i-1}^2 + 0.0426T_{i-1} - 14.934} \times (0.158 \text{ Volt}_{i-1} + 0.122) + \\
 & \sqrt{14.632 \times 10^{(6 \times 10^{-7})T_{i-1}^3 - 0.0001T_{i-1}^2 + 0.0065T_{i-1} - 4.853}} \times V_{i-1}'' / \\
 & (\sqrt{14.632 \times 10^{(6 \times 10^{-7})T_i^3 - 0.0001T_i^2 + 0.0065T_i - 4.853}} - \\
 & 10^{\text{pH}_{i+1} + (6 \times 10^{-7})T_i^3 - 0.0002T_i^2 + 0.0426T_i - 14.934}) \quad (3.34)
 \end{aligned}$$

(ข) เมื่ออุณหภูมิของสารละลายอยู่ในช่วง 50°C จนถึง 100°C แทนสมการที่ (3.14), (3.15), (3.16), (3.28), (3.29) และ (3.31) ลงในสมการที่ (3.6) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 V_i'' &= ((0.158 \text{ Volt}_i + 0.122)(10^{\text{pH}_{i+1} + (6 \times 10^{-7})T_i^3 - 0.0002T_i^2 + 0.0426T_i - 14.934} - \\
 & 2 \times 10^{\text{pH}_i + (6 \times 10^{-7})T_i^3 - 0.0002T_i^2 + 0.0426T_i - 14.934}) + \\
 & 10^{\text{pH}_{i-1} + (6 \times 10^{-7})T_{i-1}^3 - 0.0002T_{i-1}^2 + 0.0426T_{i-1} - 14.934} \times (0.158 \text{ Volt}_{i-1} + 0.122) + \\
 & \sqrt{14.632 \times 10^{\frac{148.581}{T_{i-1} + 273} - 4.229}} \times V_{i-1}'' / (\sqrt{14.632 \times 10^{\frac{148.581}{T_i + 273} - 4.229}} - \\
 & 10^{\text{pH}_{i+1} + (6 \times 10^{-7})T_i^3 - 0.0002T_i^2 + 0.0426T_i - 14.934}) \quad (3.35)
 \end{aligned}$$

หลังจากที่หาปริมาณของสารละลายแอมโมเนียที่เติมจากภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ไปยังภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ได้แล้วจะสามารถนำไปหาเวลาที่ใช้ในการเปิดโซลินอยด์วาล์ว โดยกำหนดสมมติฐานให้เวลาในการเปิดโซลินอยด์วาล์วกับปริมาตรที่เติมมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น เมื่อลองทดสอบเพื่อหาอัตราการไหลเมื่อเปิดวาล์วปรับด้วยมือแบบยกจนสุด พบว่าอัตราการไหลค่อนข้างคงที่และมีอัตราการไหลเฉลี่ย $8.8 \text{ ml} / \text{sec}$ ดังนั้น เวลาในการเปิดโซลินอยด์วาล์วในรอบการส่งข้อมูลที่ i (t_{si}) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$t_{si} \text{ (sec)} = V_i'' / (8.8 \times 10^{-3}) \quad (3.36)$$

3.2.3.4 การออกแบบระบบควบคุมอัตราการเติมผสมสารตั้งต้น

อัตราการเติมผสมสารตั้งต้นจากภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2 ไปยังภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ถือว่าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องมีการควบคุม เนื่องจากมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาซึ่งจะทำให้ลักษณะสมบัติของสารที่ผลิตได้เปลี่ยนแปลงไป การควบคุมอัตราการเติมผสมสารตั้งต้นทำได้โดยการใช้ปั๊มควบคุมการไหล ซึ่งจะสามารถแปรผันความเร็วรอบได้ตั้งแต่ 2.5 rpm จนถึง 50 rpm ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าช่วงของอัตราการไหลนั้นสามารถเลือกได้จากขนาดของท่อซิลิโคนที่ใช้กับปั๊มควบคุมการไหล ซึ่งในงานวิจัยนี้มีความต้องการอัตราการไหลของการเติมผสมอยู่ที่ประมาณไม่เกิน 100 rpm จากตารางที่ 3.3 จึงได้เลือกท่อซิลิโคนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4.8 mm หรือ 3/16 นิ้ว และมีช่วงของอัตราการไหลคือ 5.5 – 110 rpm ซึ่งถือว่าเป็นขนาดที่มีความเหมาะสมทั้งในด้านช่วงอัตราการไหลใช้งานและด้านการติดตั้งกับภาชนะปฏิกรณ์ซึ่งมีพื้นที่ค่อนข้างจำกัด

ปั๊มควบคุมการไหลสามารถควบคุมแบบอัตโนมัติผ่านอุปกรณ์ PLC ได้ ค่าอัตราการเติมผสมที่ผู้ใช้ระบบกำหนดไว้จะนำไปปรับเทียบเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งจะให้อุปกรณ์ PLC จะส่งสัญญาณอนาล็อกออกไปควบคุมยังปั๊มควบคุมการไหล เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.4 ให้ต่อขั้วหมายเลข 4 ของปั๊มเข้ากับขั้วบวกของสัญญาณขาออกแบบอนาล็อกของ PLC และต่อขั้วหมายเลข 17 ของปั๊มเข้ากับขั้วลบของสัญญาณขาออกแบบอนาล็อกของ PLC ซึ่ง PLC จะส่งสัญญาณอนาล็อกออกเป็นรูปของศักย์ไฟฟ้าโดยแปรค่าตั้งแต่ 0 – 10 V ซึ่งจะทำให้อัตราการไหลแปรเปลี่ยนได้ตั้งแต่ 5.5 – 110 rpm โดยมีการแปรผันในลักษณะเชิงเส้น สามารถคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้า ($Volt_{ao}$) ที่ส่งเป็นสัญญาณขาออกแบบอนาล็อกไปยังปั๊มได้ดังนี้

$$Volt_{ao} = R_A \times 10 / 110 = R_A / 11 \quad (3.37)$$

รีเลย์แบบสองทางเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการตัดต่อการทำงานของปั๊มให้สามารถเริ่มต้นและหยุดการทำงานได้ตามที่ต้องการ รีเลย์จะถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ PLC โดยการตัดต่อวงจรตามสัญญาณศักย์ไฟฟ้าแบบดิจิตอล กล่าวคือจะไม่ทำงานหรือเปิดวงจรที่ 0 V และจะทำงานหรือปิดวงจรเมื่อได้รับศักย์ไฟฟ้าประมาณ 24 V กำหนดให้มีการตัดต่อการทำงานของปั๊มควบคุมการไหล (พิจารณารูปที่ 3.5) โดยการต่อขั้วหมายเลข 7 และ 14 ของปั๊มเข้ากับรีเลย์แบบสองทาง เมื่อวงจรต่อถึงกันจะเป็นการตัดการทำงานของปั๊ม ในขณะที่เมื่อเปิดวงจร ปั๊มจะทำงานตามปกติ

อุปกรณ์ตรวจวัดระดับตามที่กำหนดเป็นอุปกรณ์ที่ส่งสัญญาณขาเข้าไปยังอุปกรณ์ PLC โดยจะมีลักษณะเป็นลูกลอย ติดตั้งเข้ากับภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2 โดยยึดเข้าฝาปิดให้ก้านลูกลอยแช่อยู่ในสารละลายในภาชนะ วัดคุณสมบัติของการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดระดับตามที่กำหนดนี้คือการตรวจสอบว่าสารละลายในภาชนะปฏิกรณ์ถูกดูดออกไปหมดแล้วหรือยัง หากว่าหมดแล้วจึงจะส่งสัญญาณไปยัง PLC เพื่อสั่งให้ปั๊มหยุดการทำงาน อย่างไรก็ตาม การใช้งานอุปกรณ์ตรวจวัดระดับตามที่กำหนดนี้มีปัญหาเกี่ยวกับการใช้งานเกิดขึ้นอยู่ 2 ประการ กล่าวคือ ประการแรก เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าระดับต่ำสุดที่อุปกรณ์สามารถตรวจวัดได้นั้น เป็นระดับที่ยังคงมีสารละลายหลงเหลืออยู่ส่วนหนึ่งที่กั้นภาชนะซึ่งมีปริมาตรที่คงที่เสมอ ในขณะที่ปัญหาอีกประการหนึ่งนั้น เนื่องจากภายในลูกลอยนั้นมีการควบคุมการเปิดปิดสวิทช์ด้วยแม่เหล็ก ดังนั้นเมื่อติดตั้งอยู่ใกล้กับแท่งแม่เหล็กที่ใช้กวนสารของเครื่องกวนสารระบบแม่เหล็ก จะทำให้เกิดการรบกวนสวิทช์ลูกลอยนี้และทำให้อุปกรณ์ตรวจวัดระดับทำงานผิดพลาดได้ ในการแก้ปัญหาทั้งสองประการทำได้โดยการเลื่อนระดับการติดตั้งลูกลอยให้สูงขึ้นจนพ้นจากการรบกวนจากสนามแม่เหล็กของแท่งกวนแม่เหล็ก กำหนดระดับตายตัวในการติดตั้ง และทดลองวัดปริมาตรสารละลายที่ยังเหลือค้างอยู่ในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อระดับสารละลายลดลงมาจนกระทั่งสวิทช์ลูกลอยเลื่อนลงมาต่อวงจร ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดระดับในการติดตั้งไว้ที่ระดับหนึ่งโดยพบว่าเมื่อถึงระดับที่สวิทช์ลูกลอยทำงาน (เลื่อนตกลงมาต่อวงจร) ทดลองหาปริมาตรที่เหลือในภาชนะออกมาได้เท่ากับ 154.0 ml ซึ่งสามารถคำนวณหาเวลาหน่วงการทำงานเพื่อดูดสารละลายในส่วนที่เหลือ (t_{D2}) ดังสูตรต่อไปนี้

$$\begin{aligned} t_{D2} \text{ (sec)} &= 60 \times 154.0 / R_A \\ &= 9240 / R_A \end{aligned} \quad (3.38)$$

ศูนย์วิทยพัชร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลักการควบคุมอัตราการเติมผสมสารตั้งต้นนั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) เริ่มต้นจากการตั้งค่าอัตราการเติมผสมตามต้องการโดยให้อยู่ในช่วงการใช้งานของระบบ ซึ่งค่าที่ตั้งไว้นั้นอุปกรณ์ PLC จะนำไปปรับเทียบเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าแล้วส่งสัญญาณศักย์ไฟฟ้าไปยังปั๊มควบคุมการไหลเพื่อให้ได้อัตราการเติมผสมตามต้องการ
- 2) เริ่มต้นกระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติจะเป็นการตรวจสอบค่าปัจจัยด้านอุณหภูมิและค่า pH ในช่วงของการปรับสภาพสารตั้งต้นทั้งในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 เมื่อค่าปัจจัยดังกล่าวยังไม่ได้ตามที่กำหนด ก็ยังคงต้องตัดการทำงานของปั๊มตามวิธีการที่กล่าวไว้แล้ว แต่เมื่อค่าปัจจัยดังกล่าวมีค่าถึงตามที่กำหนดแล้ว PLC จะสั่งให้เปิดวงจรรีเลย์เพื่อให้ปั๊มเริ่มทำงานตามอัตราการไหลที่ถูกกำหนดไว้
- 3) เมื่อปั๊มควบคุมการไหลเริ่มทำงาน อุปกรณ์ตรวจวัดระดับตามที่กำหนดจะคอยตรวจสอบระดับของของเหลวในภาชนะ โดยลูกลอยจะยังคงลอยและเปิดวงจรรีเลย์ถ้าระดับสารละลายยังคงลดลงไม่ถึงระดับที่ตั้งไว้ เมื่อถึงระดับที่ตั้งไว้ดังกล่าว ลูกลอยจะเคลื่อนตกลงมาพร้อมกับปิดวงจรรีเลย์ให้กระแสไหลผ่าน
- 4) หลังจากที่ลูกลอยปิดวงจรรีเลย์แล้ว รีเลย์จะยังคงเปิดวงจรรีเลย์ให้ปั๊มทำงานอยู่ โดยกำหนดให้มีการหน่วงเวลาเท่ากับ $t_{D1} + t_{D2}$ เพื่อให้สารละลายตั้งต้นที่เหลือค้างอยู่ในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2 และในท่อซิลิโคนถูกดูดไปผสมกับสารละลายตั้งต้นในภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 จนหมด
- 5) หลังจากครบเวลาตามที่กำหนดแล้วอุปกรณ์ PLC จะสั่งให้รีเลย์ปิดวงจรรีเลย์เพื่อตัดการทำงานของปั๊ม เป็นอันสิ้นสุดระบบควบคุมการเติมผสมสารตั้งต้น

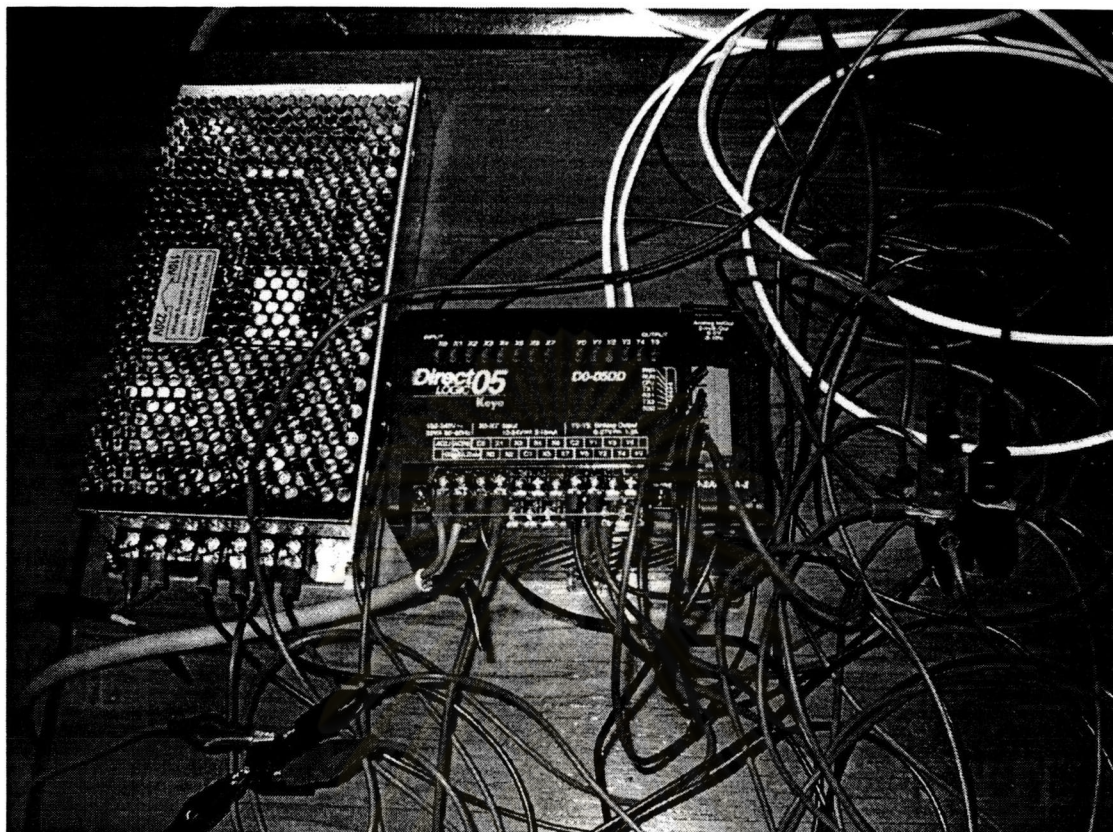
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.4 การออกแบบระบบอุปกรณ์ควบคุมและซอฟต์แวร์ (Software)

3.2.4.1 การสำรวจลักษณะโดยทั่วไปของอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม

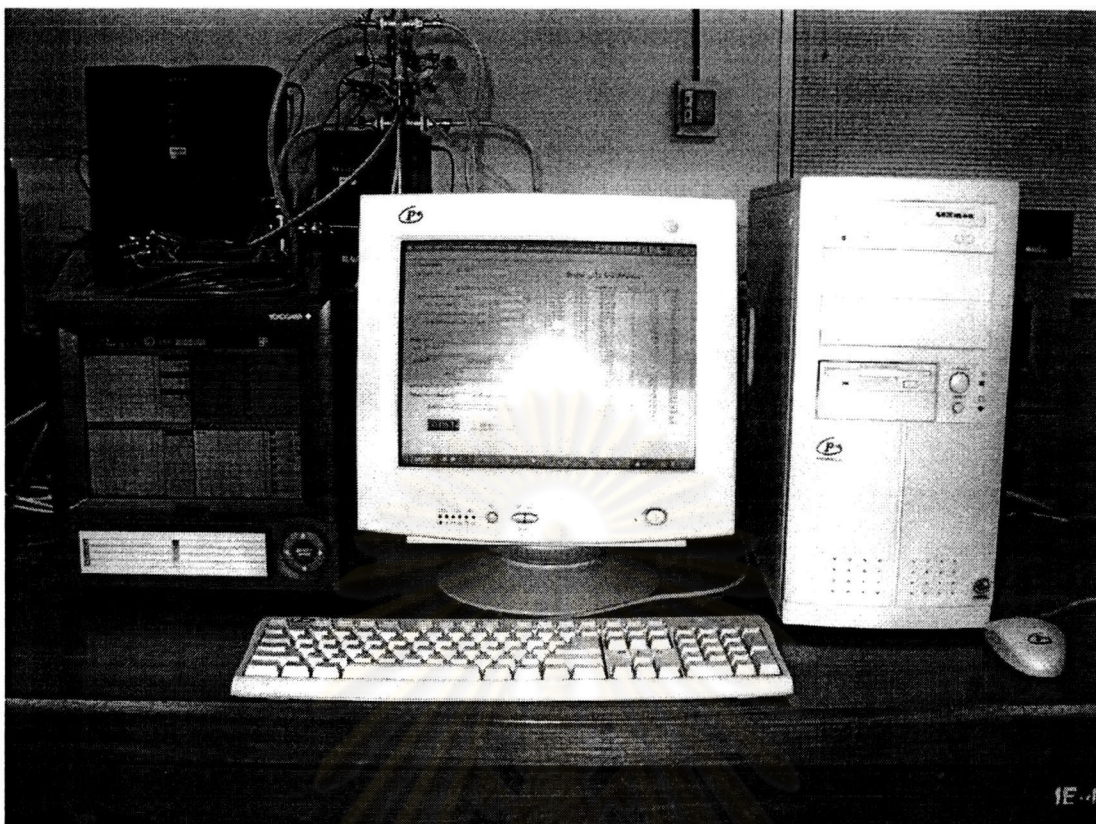
งานวิจัยนี้กำหนดให้มีการควบคุมกระบวนการด้วยอุปกรณ์ PLC ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมลำดับการทำงานต่างๆให้เป็นไปตามต้องการ อุปกรณ์ PLC ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นอุปกรณ์ PLC ยี่ห้อ Koyo รุ่น D0-05DD ซึ่งเป็น PLC ขนาดเล็ก สามารถรับสัญญาณขาเข้าแบบดิจิตอลได้ 8 ช่องทางและสัญญาณขาออกแบบดิจิตอลได้ 6 ช่องทาง ใช้กระแสไฟเลี้ยงเป็นกระแสไฟตรงขนาด 24 V จึงจำเป็นต้องต่อเข้ากับอุปกรณ์จ่ายไฟกระแสตรงขนาด 24 V โดยเฉพาะ นอกจากนี้ยังสามารถต่อพ่วงกับการ์ดสัญญาณขาเข้า / ขาออกแบบอนาล็อกได้อีกด้วยซึ่งการ์ดดังกล่าวเป็นการ์ดรุ่น F0-2AD2DA-2 สามารถรับสัญญาณขาเข้า / ขาออกแบบอนาล็อกได้อย่างละ 2 ช่องทาง และสามารถเลือกได้ว่าต้องการให้ช่วงการทำงานเป็น 0-5V หรือ 0-10V นอกจากนี้แล้วยังมีพอร์ตรับส่งข้อมูลแบบ RS232 จำนวนทั้งสิ้น 2 พอร์ต ดังนั้นอุปกรณ์ PLC ดังกล่าวจึงสามารถนำไปใช้กับระบบอัตโนมัติในงานวิจัยนี้ได้เป็นอย่างดีโดยได้แสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 3.19

อุปกรณ์ PLC รุ่นนี้สามารถใช้งานร่วมกับซอฟต์แวร์ที่บริษัทผู้ผลิตเตรียมไว้ให้แล้ว โดยมีซอฟต์แวร์ที่จำเป็นทั้งหมด 2 ตัว ซอฟต์แวร์ตัวแรกมีชื่อว่า DirectSOFT32 Version 4.0 Build 22 เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการเขียนชุดคำสั่งต่างๆในการควบคุมเข้าไปในอุปกรณ์ PLC โดยตรง ในการเขียนชุดคำสั่งในโปรแกรม DirectSOFT32 นั้นสามารถเลือกรูปแบบการเขียนชุดคำสั่งที่ละบรรทัดหรือรูปแบบแผนภาพแลดเดอร์ (Ladder diagram) ก็ได้ สำหรับการเขียนชุดคำสั่งด้วยแผนภาพแลดเดอร์ (Ladder diagram) นั้นถือว่าง่ายกว่าและทำความเข้าใจกับระบบได้ดีกว่า ในงานวิจัยนี้จึงได้เขียนชุดคำสั่งต่างๆ ออกมาเป็นแผนภาพแลดเดอร์ ดังจะได้แสดงตัวอย่างไว้ในภาคผนวก จ ซอฟต์แวร์อีกตัวหนึ่งมีชื่อว่า DSData Server Version 3.0 Build 80 เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการเชื่อมโยงรับส่งข้อมูลต่างๆจากเครื่องคอมพิวเตอร์ไปยัง PLC ซึ่งถือว่ามีคามจำเป็นในงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีข้อมูลบางส่วนที่ต้องนำเข้ามาประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์แล้วจะต้องส่งข้อมูลส่วนนี้ไปใช้ในการควบคุมด้วยอุปกรณ์ PLC ซอฟต์แวร์ชนิดนี้จึงมีลักษณะเป็นตัวกลางในการสื่อสารข้อมูลระหว่าง PLC กับเครื่องคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้มีความจำเป็นที่จะต้องเขียนโปรแกรมขึ้นอีกส่วนหนึ่งเพื่อกำหนดการรับส่งข้อมูลให้เป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สร้างโปรแกรมสำเร็จรูปขึ้นมาในการกำหนดการรับส่งข้อมูลดังกล่าวโดยเขียนขึ้นจากโปรแกรม Visual Basic 6.0



รูปที่ 3.19 อุปกรณ์ PLC และอุปกรณ์จ่ายไฟกระแสตรงขนาด 24V ที่ใช้ในงานวิจัย

เนื่องจากอุปกรณ์ PLC นี้มีพอร์ตรับส่งข้อมูลแบบ RS232 จำนวน 2 พอร์ต เมื่อพอร์ตหนึ่งนำไปใช้ในการเชื่อมโยงรับส่งข้อมูลกับเครื่องคอมพิวเตอร์ จึงยังคงเหลืออีก 1 พอร์ตที่สามารถนำไปใช้ในการติดต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูลยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DaqStation DX-200 เพื่อใช้ในการแสดงผลออกมาในรูปแบบกราฟิกในขณะที่ดำเนินการผลิต (Real time) เพื่อให้สามารถมองเห็นแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงในขณะใดๆ ระหว่างกระบวนการผลิตได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ในการตั้งค่ากำหนดต่างๆ นั้นจะกำหนดให้เครื่องบันทึกข้อมูลติดต่อกับอุปกรณ์ PLC ผ่านทาง Modbus Protocol โดยให้เครื่องบันทึกข้อมูลมีสถานะภาพเป็น Master และอุปกรณ์ PLC มีสถานะภาพเป็น Slave เพื่อให้เครื่องบันทึกข้อมูลสามารถเข้าไปดึงข้อมูลจากอุปกรณ์ PLC ได้ทันที ทั้งนี้จะต้องมีการกำหนดที่อยู่ (Address) ของ Modbus ให้ตรงกับที่อยู่ของตัวแปรที่เก็บอยู่ใน PLC ซึ่งต้องการให้แสดงผลออกมายังเครื่องบันทึกข้อมูลตามวิธีการมาตรฐาน ดังนั้นในการติดตามกระบวนการจึงสามารถพิจารณาข้อมูลได้เป็นทั้งลักษณะตัวเลขและในรูปแบบกราฟิกไปพร้อมๆ กัน ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ระบบการแสดงผลข้อมูลสำหรับการติดตามกระบวนการด้วยคอมพิวเตอร์
ผนวกกับเครื่องบันทึกข้อมูล

3.2.4.2 การจำแนกสัญญาณที่ต่อเข้ากับอุปกรณ์ควบคุม PLC

จากการออกแบบระบบเครื่องกลไกที่ผ่านมา สามารถจำแนกชนิดของสัญญาณของ
อุปกรณ์ที่ต่อกับอุปกรณ์ PLC เพื่อใช้ในการควบคุมได้ดังต่อไปนี้

- 1) สัญญาณขาเข้าแบบดิจิทัล มี 1 สัญญาณ ประกอบด้วย
 - สัญญาณจากสวิทช์ลูกลอยวัดระดับตามที่กำหนด (X1)
- 2) สัญญาณขาออกแบบดิจิทัล มี 3 สัญญาณ ประกอบด้วย
 - สัญญาณควบคุมโซลินอยด์วาล์วแบบปกติปิด เพื่อปรับสภาพความดันภายในระบบ (Y0)
 - สัญญาณควบคุมโซลินอยด์วาล์วแบบปกติปิด เพื่อควบคุมการไหลของสารละลายแอมโมเนีย (Y1)
 - สัญญาณควบคุมรีเลย์สองทางแบบปกติเปิด เพื่อตัดต่อการทำงานของปั๊มควบคุมการไหล (Y2)

- 3) สัญญาณขาเข้าแบบอนาล็อก มี 1 สัญญาณ ประกอบด้วย
 - สัญญาณอนาล็อก 0-10V จากอุปกรณ์ตรวจวัดระดับอย่างต่อเนื่อง
- 4) สัญญาณขาออกแบบอนาล็อก มี 1 สัญญาณ ประกอบด้วย
 - สัญญาณอนาล็อก 0-10V เพื่อใช้ควบคุมความเร็วรอบของปั๊มควบคุมการไหล
- 5) ข้อมูลที่รับส่งจากพอร์ตชนิด RS232 ติดต่อกับอุปกรณ์ 2 อย่าง ประกอบด้วย
 - เครื่องคอมพิวเตอร์ PC รับส่งข้อมูลผ่านทางซอฟต์แวร์ DSData Server
 - เครื่องบันทึกข้อมูล รับส่งข้อมูลผ่านทาง Modbus Protocol

3.2.4.3 การออกแบบโปรแกรมสำหรับผู้ใช้งาน (User interface)

3.2.4.3.1 การพิจารณาปัจจัยที่ต้องกำหนดสำหรับผู้ใช้งาน

ในเบื้องต้นผู้ใช้งานจะต้องมีการกำหนดปัจจัยต่างๆ ที่ต้องการควบคุม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ระบุช่วงและความละเอียดที่ผู้ใช้งานสามารถกำหนดได้ในแต่ละปัจจัย ช่วงของการกำหนดปัจจัยนี้เกิดขึ้นมาจากสาเหตุต่างๆ เช่น เหตุผลด้านการใช้งาน ข้อจำกัดของระบบ เป็นต้น โดยสามารถพิจารณารายละเอียดแยกเป็นแต่ละปัจจัยดังต่อไปนี้

1) กำลังการผลิตในแต่ละรอบการผลิต

ในงานวิจัยนี้ ระบบอัตโนมัติสามารถผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้โดยประมาณ 20 – 40 กรัมต่อรอบการผลิต เนื่องจากภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 มีความจุสารละลายที่จำกัด จึงไม่สามารถผลิตได้มากกว่า 40 กรัมต่อรอบการผลิตได้ ในขณะที่หากผลิตต่ำกว่า 20 กรัมต่อรอบการผลิต จะเกิดปัญหาในการใช้งานอุปกรณ์ตรวจวัดค่า pH และอุณหภูมิ เนื่องจากระดับของสารละลายต่ำเกินกว่าที่อุปกรณ์ตรวจวัดเหล่านั้นจะหยั่งเข้าไปถึงได้ วิธีการแก้ปัญหาหากต้องการที่จะผลิตให้ได้ปริมาณมากกว่าหรือน้อยกว่าช่วงที่กำหนดก็คือการแปรผันความเข้มข้นของสารละลาย เช่นในกรณีที่ต้องการผลิตมากกว่า 40 กรัมต่อรอบการผลิตก็ให้ปรับความเข้มข้นของสารละลายให้เข้มข้นมากขึ้น กล่าวคือสารละลายมีปริมาตรเท่าเดิมแต่มีโมลสารเพิ่มขึ้น ในกรณีตรงกันข้าม หากต้องการผลิตน้อยกว่า 20 กรัมต่อรอบการผลิตก็สามารถปรับความเข้มข้นของสารละลายให้เจือจางมากขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ใช้สารน้อยแต่เติมน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายเข้าไปมากกว่าปกติ

2) อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา

อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้นโดยทั่วไปจะอยู่ที่ 30 °C จนถึง 95 °C จึงได้กำหนดให้งานวิจัยนี้สามารถปรับค่าอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 30 °C จนถึง 90 °C เนื่องจากมีข้อจำกัดว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 °C นั้นสารละลายจะเริ่มเดือดและระเหยกลายเป็นไออย่างรวดเร็ว สารละลายแอมโมเนียที่ใช้เติมจึงมีปริมาณไม่เพียงพอกับความต้องการ นอกจากนี้ ผู้ใช้ระบบจำเป็นต้องปรับอุณหภูมิโดยตรงที่เครื่องกวนสารระบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นทำความร้อน เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวไม่สามารถส่งข้อมูลออกไปยังอุปกรณ์ภายนอกอื่น ๆ ได้ ทั้งนี้ ผู้ใช้ระบบต้องทำการปรับค่าอุณหภูมิที่ตัวเครื่องกวนสารฯ ให้สอดคล้องกับอุณหภูมิควบคุมที่กำหนดในโปรแกรมควบคุมซึ่งจะกำหนดช่วงตั้งแต่ 30 °C จนถึง 90 °C โดยมีช่วงห่างหรือความละเอียดในการปรับค่าช่วงละ 10 °C มิฉะนั้นแล้วจะเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบควบคุม

3) ค่า pH ในการเกิดปฏิกิริยา

ค่า pH ในการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ในการควบคุมการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้นอยู่ในช่วง 7.00 – 11.00 โดยเฉพาะค่า pH ที่ 9.00 นั้นเป็นค่าที่สำคัญที่จะทำให้ได้เฟสที่บริสุทธิ์ แต่หากว่า pH มีค่าที่เกิน 9.00 ขึ้นไป อาจมีผลให้เกิดเฟสบางเฟสขึ้นมาเจือปนทำให้สมบัติของสารที่ผลิตได้แย่งลง นอกเหนือจากนั้นเมื่อพิจารณาระบบอัตโนมัติในงานวิจัยนี้พบว่าภาชนะปฏิกรณ์ที่ 3 ซึ่งบรรจุสารละลายแอมโมเนียสามารถควบคุมค่า pH ได้ไม่เกิน 9.00 โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากมีความจุสารละลายแอมโมเนียในปริมาตรที่จำกัด ดังนั้นจึงได้กำหนดช่วงของค่า pH อยู่ที่ 7.00 – 9.00 ออกแบบให้ผู้ใช้ระบบสามารถเลือกได้จากเมนูโดยกำหนดความละเอียดที่ 0.50 เพื่อความสะดวกและเป็นการป้องกันการใส่ค่าผิดของผู้ใช้ระบบ

4) อัตราการเติมผสมสารตั้งต้น

อัตราการเติมผสมสารตั้งต้นนั้นได้กำหนดให้ผู้ใช้ระบบสามารถเลือกได้ตั้งแต่ 10 ml / min จนถึง 110 ml / min ซึ่งเป็นค่าสูงสุด โดยกำหนดความละเอียดให้แต่ละค่าที่สามารถเลือกได้ห่างกันค่าละ 10 ml /min เพื่อความสะดวกที่ผู้ใช้ระบบไม่ต้องเสียเวลาในการพิมพ์และเป็นการป้องกันการป้อนค่าผิดรูปแบบไปในตัวด้วย ทั้งนี้ช่วงดังกล่าวถูกกำหนดขึ้นจากข้อจำกัดด้านความเร็วรอบของปั๊มควบคุมการไหลและการเลือกขนาดของท่อซิลิโคนดั่งที่เคยได้กล่าวมาแล้ว

5) อัตราเร็วรอบในการกวนสารละลาย

ปัจจุบันนี้ไม่สามารถควบคุมได้ด้วยระบบอัตโนมัติ เนื่องจากเครื่องกวนสารระบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นทำความร้อนที่ใช้งานนั้นไม่สามารถส่งข้อมูลออกไปยังอุปกรณ์ภายนอกได้ ดังนั้นผู้ใช้

ระบบจำเป็นต้องปรับโดยตรงที่เครื่องกวนสารฯ โดยพิจารณาจากความเหมาะสมในการกวน ซึ่งโดยปกติแล้ว ภาชนะปฏิกรณ์ที่ 2 จะใช้ความเร็วรอบประมาณ 800 – 1,000 rpm (โดยใช้แท่งกวนขนาดความยาว 3 cm) และภาชนะปฏิกรณ์ที่ 1 ในขณะก่อนเติมผสม (สารละลายไอ) จะใช้ความเร็วรอบประมาณ 400-500 rpm (ใช้แท่งกวนขนาดความยาว 5 cm) และในขณะที่เกิดปฏิกิริยา (สารละลายเปลี่ยนเป็นขาวขุ่น) จะต้องเพิ่มความเร็วรอบในการกวนให้เร็วขึ้นประมาณ 2 เท่าตัวเนื่องจากสารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น

6) เวลาปรับสภาพสารผลิตภัณฑ์หลังการเกิดปฏิกิริยา

เวลาปรับสภาพสารผลิตภัณฑ์หลังการเกิดปฏิกิริยาที่ควบคุมได้โดยระบบอัตโนมัติสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ เวลาในการกวนสารผลิตภัณฑ์ เวลาตั้งสารผลิตภัณฑ์ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิกำหนด และเวลาตั้งสารผลิตภัณฑ์ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเวลาในแต่ละช่วงนี้โดยปกติแล้วจะมีค่าไม่เกิน 1 วันหรือ 24 ชั่วโมง ดังนั้นจึงกำหนดรูปแบบในการเลือกค่าปัจจัยทั้งสามนี้ให้ผู้ใช้ระบบสามารถเลือกจำนวนชั่วโมงและจำนวนนาฬิกาได้โดยกำหนดให้ความละเอียดของเวลาที่เลือกได้เป็น 1 นาที และเลือกได้ไม่เกิน 24 ชั่วโมงสำหรับเวลาแต่ละช่วง ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้ระบบมีความสะดวกยิ่งขึ้นเนื่องจากไม่ต้องพิมพ์ป้อนข้อมูลเอง

ปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวมานั้นสามารถสรุปรายละเอียดในการกำหนดค่าของผู้ใช้ระบบได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ปัจจัยที่ผู้ใช้ระบบต้องกำหนดในกระบวนการผลิต

ปัจจัย (Parameter)	หน่วย (Unit)	พิสัย (Range)	ความละเอียด (Resolution)
กำลังการผลิตในแต่ละรอบ	กรัม	20 - 40	10
อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา	°C	30.0 – 90.0	10.0
ค่า pH ในการเกิดปฏิกิริยา	-	7.00 – 9.00	0.50
อัตราการเติมผสมสารตั้งต้น	ml / min	10 - 110	10
อัตราเร็วรอบในการกวนสารตั้งต้น	rpm	50 - 1600	10
อัตราเร็วรอบในการกวนระหว่างปฏิกิริยา	rpm	50 - 1600	10
เวลาในการกวนสารผลิตภัณฑ์	ชั่วโมง	0 - 24	1 / 60
เวลาตั้งสารผลิตภัณฑ์ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิกำหนด	ชั่วโมง	0 - 24	1 / 60
เวลาตั้งสารผลิตภัณฑ์ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง	ชั่วโมง	0 - 24	1 / 60

3.2.4.3.2 องค์ประกอบของระบบติดต่อผู้ใช้งาน

หลังจากที่ผู้ใช้ระบบกำหนดค่าปัจจัยต่างๆ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ระบบจะเริ่มดำเนินการกระบวนการไปตามขั้นตอนต่างๆ ทั้งนี้ข้อมูลสำคัญที่จะต้องมีการวัดและควบคุมให้คงที่อยู่ที่ขอบตลอดทั้งกระบวนการคือค่า pH และอุณหภูมิ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ยากที่สุดในบรรดาปัจจัยทั้งหมด ดังนั้นจึงต้องมีการติดตามค่าปัจจัยที่ส่งเข้ามาในแต่ละช่วงว่ามีความปกติอยู่หรือไม่ มีแนวโน้มใดเกิดขึ้นบ้างหรือไม่ งานวิจัยนี้จึงได้สร้างโปรแกรมโดยใช้ Visual Basic 6.0 เพื่อกำหนดให้หน้าจอที่ติดต่อกับผู้ใช้งานมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนดังต่อไปนี้

1) ข้อมูลค่ากำหนดเริ่มต้น

ข้อมูลส่วนนี้มีความสำคัญในการย้ำเตือนความจำสำหรับผู้ใช้งานว่าได้กำหนดค่าปัจจัยอย่างไรบ้างในตอนเริ่มต้น เพื่อสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ความผิดปกติต่างๆ หรือจุดที่น่าสนใจต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ ข้อมูลเหล่านี้จะแสดงให้ผู้ใช้งานเห็นอยู่บนหน้าจอตลอดเวลา

2) ข้อมูลปัจจุบันที่ได้จากเครื่องวัดค่า pH

ข้อมูลในส่วนนี้จะป็นรายละเอียดของค่าข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องวัดค่า pH โดยจะบอกรายละเอียดต่างๆ ของข้อมูลนั้นอย่างครบถ้วน ตั้งแต่วันที่ทำการผลิต เวลาในขณะนั้น เวลาในระบบของการผลิต ค่า pH อุณหภูมิ ขั้นตอนการผลิต และสิ่งที่กำลังดำเนินการ ซึ่งจะเป็นส่วนที่บ่งบอกถึงสถานภาพในปัจจุบันของระบบ โดยข้อมูลในส่วนนี้จะนำไปเก็บยังฐานข้อมูลอีกที่หนึ่งเพื่อเรียกขึ้นมาใช้งานข้อมูลเหล่านี้ในภายหลัง ฐานข้อมูลที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ Microsoft Access XP

3) ข้อมูลล่าสุดที่ผ่านมา

ข้อมูลส่วนนี้เป็นข้อมูลในอดีตที่เพิ่งผ่านมาไม่นานนัก มีประโยชน์ในการพิจารณาแนวโน้มที่เกิดขึ้นในช่วงที่เพิ่งผ่านมาและจะมีผลต่อข้อมูลที่กำลังจะเกิดต่อไปในอนาคต อย่างไรก็ตามการพิจารณาแนวโน้มของข้อมูลในขณะเวลาใดๆ (Real time) จากเครื่องบันทึกข้อมูลจะทำให้มองเห็นภาพได้ชัดเจนกว่า ดังนั้นหากผู้ใช้งานพิจารณาประกอบกันทั้งสองส่วนจะทำให้เกิดผลดีที่สุด เนื่องจากสามารถทราบถึงแนวโน้มที่เกิดขึ้นของระบบอย่างชัดเจน และยังทราบตัวเลขที่แน่นอนไปพร้อมๆ กันด้วย ข้อมูลดังกล่าวนี้จะจัดรูปแบบไว้ในตารางโดยมีอยู่ประมาณ 30 ชุดข้อมูล เมื่อมีข้อมูลใหม่เพิ่มเข้ามา ข้อมูลใหม่จะถูกนำไปใส่ไว้ด้านบน ข้อมูลที่เก่ากว่าจะเลื่อน

ลงไปด้านล่างเรื่อยๆ ทั้งนี้ วัตถุประสงค์ในการแสดงข้อมูลดังกล่าวเป็นไปเพื่อการพิจารณา แนวโน้มที่จะมีผลต่อข้อมูลปัจจุบันและอนาคตเป็นสำคัญ หากต้องการพินิจพิเคราะห์ข้อมูล ทั้งหมดอย่างละเอียดสามารถเรียกดูภายหลังจากการเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตได้ในฐานข้อมูล ของ Microsoft Access XP ซึ่งบันทึกข้อมูลทั้งหมดไว้เรียบร้อยแล้ว

อนึ่ง โปรแกรมระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สร้างขึ้นใน งานวิจัยนี้ จำเป็นที่จะต้องใช้ร่วมกับโปรแกรม DSDData Server เนื่องจากข้อมูลต่างๆ ที่ต้องส่งจาก เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมโดย PLC นั้นจำเป็นต้องผ่านโปรแกรมตัวกลางที่ใช้ ในการติดต่อกับ อุปกรณ์ PLC อีกทีหนึ่ง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า อุปกรณ์ PLC จะดำเนินกระบวนการ ผลิตโดยควบคุมลำดับการทำงานของระบบกลไกต่างๆ ตามแผนภาพแลดเดอร์ (Ladder diagram) ที่ได้สร้างขึ้นไว้แล้วจากโปรแกรม DirectSOFT32 และเขียนลงไปหน่วยความจำของ อุปกรณ์ PLC จากนั้นจะดึงข้อมูลที่ประมวลมาจากเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางโปรแกรม DSDData Server เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการตัดสินใจของระบบ สำหรับตัวอย่างบางส่วน of โปรแกรม ระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ โปรแกรม DSDData Server รวมไปถึงจนถึง โปรแกรมฐานข้อมูล ได้แสดงไว้แล้วในภาคผนวก ฉ

3.3 การทดสอบระบบอัตโนมัติที่ได้จากการออกแบบและสร้างขึ้น

3.3.1 การทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ ด้วยระบบอัตโนมัติ

ในการทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ระบบอัตโนมัติ นั้นจะทำการทดสอบโดยการดำเนินกระบวนการผลิตในสภาวะการผลิตที่กำหนดขึ้น 3 สภาวะ และให้แต่ละสภาวะมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้ผู้วิจัยได้พยายามกำหนดให้ทั้ง 3 สภาวะนั้น ครอบคลุมพิสัยของปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อลักษณะสมบัติของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์และที่ ควบคุมได้ยาก โดยทั้ง 3 สภาวะดังกล่าวได้กำหนดให้มีการดำเนินกระบวนการซ้ำสภาวะละ 2 ครั้ง เพื่อพิจารณาว่าระบบอัตโนมัติมีความสามารถในการดำเนินงานซ้ำเดิมมากน้อยเพียงใด รวมจำนวนครั้งที่ต้องทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบเป็น 6 ครั้งและนำมาเปรียบเทียบกับ ผลที่ได้จากการผลิตโดยระบบปฏิบัติการควบคุม ทั้งนี้สิ่งที่ต้องประเมินมีดังต่อไปนี้คือ

1) น้ำหนักของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้ในแต่ละรอบการผลิต

เพื่อบ่งชี้ว่ากระบวนการผลิตสามารถผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ตามกำลังการผลิตที่ตั้งไว้หรือไม่ และน้ำหนักที่วัดค่าได้จริงผิดพลาดไปจากน้ำหนักที่กำหนดไว้ตามทฤษฎีมากน้อยเพียงใด ประสิทธิภาพเป็นเช่นใด และเกิดความสูญเสียขึ้นเท่าใด

2) ผลการควบคุมปัจจัยอุณหภูมิ และค่า pH ในระหว่างกระบวนการผลิต

เพื่อพิจารณาความสามารถในการควบคุมปัจจัยการผลิตที่สำคัญและควบคุมได้ยากว่าสามารถควบคุมปัจจัยให้อยู่ในระดับที่คงที่ตามที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ และมีความแปรปรวนของค่าข้อมูลอย่างไรบ้าง ทั้งนี้จะต้องมีทั้งการประเมินแยกเป็นแต่ละขั้นตอนและการประเมินโดยรวมทั้งกระบวนการ

อนึ่ง รายละเอียดเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ทั้งสามสภาวะนั้นได้แสดงไว้แล้วในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ปัจจัยของสภาวะทั้ง 3 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของระบบอัตโนมัติ

ปัจจัย (Parameter)	หน่วย (Unit)	สภาวะที่ 1	สภาวะที่ 2	สภาวะที่ 3
กำลังการผลิตในแต่ละรอบ	กรัม	30	30	30
อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา	°C	30.0	60.0	90.0
ค่า pH ในการเกิดปฏิกิริยา	-	7.00	8.00	9.00
อัตราการเติมผสมสารตั้งต้น	ml / min	110	70	30
อัตราเร็วรอบในการกวนสารตั้งต้น	rpm	400	400	400
อัตราเร็วรอบในการกวนระหว่างปฏิกิริยา	rpm	800	800	800
เวลาในการกวนสารผลิตภัณฑ์	ชั่วโมง	2	2	2
เวลาดังสารผลิตภัณฑ์ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิกำหนด	ชั่วโมง	1	1	1
เวลาดังสารผลิตภัณฑ์ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิต่ำ	ชั่วโมง	12	12	12

3.3.2 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้จากระบบอัตโนมัติ

3.3.2.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้อย่างละ 1 ตัวอย่างทั้งจากระบบปฏิบัติการควบคุมและระบบอัตโนมัติที่ทุกๆ สภาวะการผลิตจะต้องผ่านการตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวของสารประกอบว่ามีลักษณะตรงกับเฟสมาตรฐานของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งสามารถพิจารณาข้อมูลอ้างอิงได้ในภาคผนวก ข เพื่อยืนยันว่าสารที่ผลิตได้เป็นสารไฮดรอกซีอะพาไทต์อย่างแท้จริง วิธีการวิเคราะห์ที่สามารถทำได้โดยใช้การตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) อาศัยหลักการทำงานคือ ให้รังสีเอกซ์ตกกระทบผลึกผงสารตัวอย่าง โดยทำมุมตกกระทบกับระนาบของผลึกผงสารตัวอย่างเป็นมุม θ จะทำให้อัตราการเลี้ยวเบนไปเป็นมุม 2θ กับแนวรังสีตกกระทบ และไปรวมกันที่จุดๆ หนึ่ง ทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างมุม 2θ กับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้ออกมาจากเครื่อง XRD โดยใช้รังสี $\text{CuK}\alpha$ ในการเลี้ยวเบน ซึ่งมีความยาวคลื่นเฉลี่ยเป็น 1.5418 อังสตรอม และกำหนดการควบคุมการทำงานของเครื่อง XRD โดยพิจารณาการเลี้ยวเบนที่มุม 2θ ระหว่าง 5 ถึง 60 องศา ด้วยอัตรา 1.6 องศาต่อวินาที ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือ XRD ยี่ห้อ Jeol รุ่น JDX-8030 ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการทดสอบผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากการผลิตด้วยระบบปฏิบัติการควบคุม และได้ใช้เครื่องมือ XRD ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8Advance ของภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการทดสอบผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติ เนื่องจากเครื่องมือของศูนย์เครื่องมือวิจัยฯ ชัดข้อง ไม่สามารถใช้งานได้

3.3.2.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบให้แน่ชัดสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีใต้แดง (Fourier Transformed Infra Red Spectrophotometer, FT-IR) โดยอาศัยหลักการดูดกลืนของสารตัวอย่างที่มีต่อรังสีใต้แดงในย่านความถี่ 1.2×10^{14} ถึง 2×10^{13} เฮิรตซ์ หรือในช่วงเลขคลื่น (Wave Number) ตั้งแต่ 4000-400 ต่อเซนติเมตร โดยการสแกนรังสีในย่านความถี่ดังกล่าวผ่านสารตัวอย่าง และจดบันทึกผลการตอบสนองบนกระดาษกราฟ โดยในงานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้จากระบบปฏิบัติการควบคุมและระบบอัตโนมัติที่ทุกสภาวะการผลิตอย่างละ 1 ตัวอย่างไปดำเนินการวิเคราะห์ผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีใต้แดงด้วยเครื่อง FT-IR ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น 1760X ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.3 การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้นได้นำผงตัวอย่างไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้จากระบบปฏิบัติการควบคุมและระบบอัตโนมัติในทุกสภาวะการผลิตอย่างละ 1 ตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Laser Analyzer, PSLA) ซึ่งสามารถแสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของวัสดุ และจำนวนเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง PSLA ยี่ห้อ Mastersizer S รุ่น 2.11 ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.4 การศึกษาลักษณะรูปทรง

การศึกษาลักษณะรูปทรงของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้จากระบบปฏิบัติการควบคุมและระบบอัตโนมัติในทุกสภาวะการผลิตอย่างละ 1 ตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์ได้จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยมีหลักการทำงานคือการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูงให้แก่โลหะทั้งสแตนท์ จันกระทั่งโลหะทั้งสแตนท์ร้อนจัดและปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ซึ่งเรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary Electron) จากนั้น ลำของอิเล็กตรอนจะถูกรวมให้เป็นจุดและตกลงบนตัวอย่าง เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิตกลงบนตัวอย่าง จะทำให้เกิดกลุ่มของอิเล็กตรอนอีกชุดหนึ่งเรียกว่า อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ออกมาจากผิวของตัวอย่างและถูกรวบรวมเข้าสู่ตัววัดสัญญาณ (Detector) ซึ่งมีตัวขยายสัญญาณและแปรสัญญาณให้ปรากฏเป็นภาพบนจอแสดงผล ภาพที่เกิดขึ้นนี้เป็นสัญญาณรวมจากจุดต่างๆ บนผิวตัวอย่าง การศึกษาลักษณะรูปทรงในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือ SEM ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM6400 ในการถ่ายภาพโครงสร้างทางจุลภาค